

基于 PL 的无多进多出 MDM 带宽可调的双向光纤传输系统

陈 成¹, 诸明琛², 诸 波^{1*}, 胡芳仁¹, 江梦月¹

(1. 南京邮电大学 光电工程学院, 南京 210003 中国; 2. 路易斯安那大学, 拉斐特 美国)

摘要: 为实现低成本、长距离以及大容量的数据传输场景, 设计了一种无多进多出(MIMO)模分复用(MDM)带宽可调的双向光纤传输系统, 利用 6 模式选择光子灯笼(PL)分别作为模式复用/解复用器, 选取 LP21 和 LP01 2 个非简并模式作为正向传输信道, LP02 模式和 LP01 模式作为反向传输信道, 同时通过光开关控制选择 LP11 的 2 个简并模式作为正反向传输信道, 从而实现 12.5 km 的双向带宽可调传输。该系统为低成本、长距离以及大容量的数据传输场景提供了解决方案。

关键词: 光通信; 模分复用; 光子灯笼; 多模光纤; 光开关

中图分类号: TN256 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2020)06-0024-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.06.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Bi directional optical fiber transmission system without MIMO MDM bandwidth adjustment based on PL

CHEN Cheng¹, ZHU Mingchen², ZHU Bo^{1*}, HU Fangren¹, JIANG Mengyue¹

(1. School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. University of Louisiana, Lafayette, USA)

Abstract: In order to achieve low-cost, long-distance and large capacity data transmission scenarios, a fiber-optic bidirectional optical fiber transmission system without multiple in multiple out (MIMO) mode division multiplexing (MDM) adjustment bandwidth is designed. Using six modes to select the photon lantern(PL) as the mode multiplexer and demultiplexer respectively, LP21 and LP01 are selected two non degenerate modes as forward transmission channels, LP02 mode and LP01 mode as reverse transmission channels. At the same time, two degenerate modes of LP11 are selected as forward and reverse transmission channels through optical switch control, thus realizing 12.5 km bidirectional bandwidth adjustable transmission. The system provides a solution for low-cost, long-distance and large capacity data transmission scenarios.

Key words: optical communication; mode division multiplexing; photon lantern; multimode fiber; optical switch

0 引言

近年来, 随着人们对互联网产品及其应用需求的日益增长, 光纤通信网络规模不断扩大, 尤其是数据量的爆发性增长, 未来光通信网络技术的突破将朝着更高速率、更大容量和更长距离光传输方向发展^[1,2]。目前, 一些以单模光纤(SMF)为传输媒介的扩容技术(如

时分复用(TDM)^[3]、波分复用(WDM)^[4]、偏振复用(PDM)^[5]和码分复用^[6]等)已经得到广泛应用, 但是由于受 SMF 非线性效应的影响, 其通信容量逐渐趋近于理论极限^[7]。从空间维度上来看, 基于少模光纤的模分复用(MDM)技术^[8]对进一步提高光纤通信系统的传输容量有很大的作用。MDM 技术通过光纤中各个模式间相互正交, 将每个模式作为独立的信道加载信号, 有效地提高了通信容量和频谱效率。

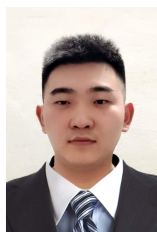
2011 年, Sebastian 等人研究了 33 km 多模光纤的 MDM, 结果表明在一种新型少模光纤支持的 6 种空间和偏振模上传输不相关的 28 GBaud 正交相移键控(QPSK)信号的系统中, 6×6 多进多出(MIMO)处理几乎可以完全补偿模耦合引起的串扰和符号间干扰^[9]。2012 年, 贝尔实验室提出了基于自由空间光学

收稿日期: 2019-11-04。

基金项目: 国家自然科学基金(61574080)资助。

作者简介: 陈成(1994—), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 现就读于南京邮电大学光学工程专业, 主要研究方向为高速大容量光纤通信与全光信号处理。获得了 2018 年、2019 年“研究生组织单项奖”, 参与了江苏省光通信工程技术研究中心模分复用高速大容量试验床(ZXF201803)项目。

* 通信作者: 诸波(Email: zhubo@njupt.edu.cn)。



的 MDM 实验系统, 实现了 6 个空间模式和偏振模式 40 Gb/s QPSK 信号的 96 km 传输, 并在接收端通过 MIMO 算法对接收信号进行了数字信号处理^[10]。同年, R. Ryf 等人提出光子灯笼(PL)型模分复用器, 并基于 PL 型模分复用器演示了 40 Gb/s QPSK 信号的 130 km 传输, 获得了 3.8 Tb/s 的传输容量^[11]。2014 年, Leon-Saval 等人制作出了基于 PL 的模分复用/解复用器, 经模分复用/解复用器具有较好的实用性和灵活性^[12,13]。2017 年, 陈嘉轲等人采用弱模式耦合少模光纤和模式选择性 PL 型复用/解复用器建立了 3×3 的 MDM 通信系统^[14]。2018 年, 陈键等人利用模间串扰较低的模式选择性 PL 分别作为模分复用/解复用器, 选用 LP01 模式与 LP11b 模式作为发送信道, 利用正交频分复用调制方式在长 50 m 的 OM4 多模光纤上实现了 7.2 Gb/s 的传输^[15]。2019 年, 陈保峰等人采用 IM-DD 系统, 通过使用 PL 在 50 m 少模光纤上实现了 2×20 Gb/s 4 脉冲幅度调制(PAM4)信号的传输^[16]。综上所述, 目前 MDM 系统的大部分研究使用了复杂的 MIMO 处理信号, 成本较高、系统复杂且耗电; 其次, 采用少模光纤虽然能提供很好的信道质量, 但是少模光纤价格达到 40 元/米, 对于长距离传输而言, 成本太高; 此外, 传输系统带宽均不可调, 无法适应下一代光传输动态路由的网络需求。

在短距离情况下, 一种弱耦合 MDM 无 MIMO 传输系统被提出和证实^[17,18], 但无 MIMO 传输的距离与传输介质的模式耦合有关, 模式耦合越大、交调越严重, 传输距离就越近。文献[19]采用了少模光纤进行 WDM-MDM 较远距离的传输。文献[20]采用了 OM3 通用多模光纤, 但只能传输 1 km。一般情况下, 少模光纤的模间耦合较小, 但价格昂贵; OM3 通用多模光纤尽管模间耦合较大, 但是价格便宜, 而且具有模式可扩展的优势。本文设计一种基于 PL 的无 MIMO MDM 带

宽可调的双向光纤传输系统, 以实现低成本、长距离及大容量的数据传输场景。

1 基于 PL 的无 MIMO MDM 带宽可调的双向光纤传输系统设计

基于 PL 的无 MIMO MDM 带宽可调的双向光纤传输系统设计图如图 1 所示。正向传输时, 4 个光端机分别发出 4 个不同波长(1548.52 nm、1554.13 nm、1554.94 nm 和 1560.61 nm)的数字光信号, 经过 WDM1 复用后再进入 1:3 的分路器分成 3 路信号; 掺铒光纤放大器(EDFA)对 3 路信号功率补偿再作去耦合处理, 然后进入可编程光开关 1; 由 PL 模分复用/解复用器 1 进行模分复用后, 配置成 LP01、LP21 和 LP11a 3 个非简并模式正向信号, 经过 12.5 km 的 OM3 多模光纤传输到 PL 模分复用/解复用器 2 模分解复用; 接着进入可编程光开关 2 配置接收信道, 最后再经过波分解复用器 1(DEWDM1)到达光接收机。反向传输时, 从 4 个光端机发出 4 个不同波长的光信号, 经过 WDM2 复用后进入 1:3 的分路器分成 3 路信号; 通过 EDFA 对 3 路信号功率补偿再去耦合处理, 然后进入可编程光开关 2, 再进入 PL 模分复用/解复用器 2 进行模分复用后, 配置成 LP02、LP01 和 LP11b 3 个非简并模式反向信号; 经过 12.5 km 的 OM3 多模光纤传输到 PL 模分复用/解复用器 1 解复用后进入可编程光开关 1 配置接收信道, 最后再经过 DEWDM2 解复用后到达光接收机。

实验中使用的光开关实物图如图 2 所示。采用 Light LEADER3424 型 8×8 的光交换矩阵完成光层的路由选择。光开关矩阵的连接是通过计算机(PC)端的软件控制, 在用户图形界面可以设置通道连接状态。

实验中使用的 PL 模分复用/解复用器是一种 6×6 全封装的空间模分复用/解复用器, 其实物图如图 3 所

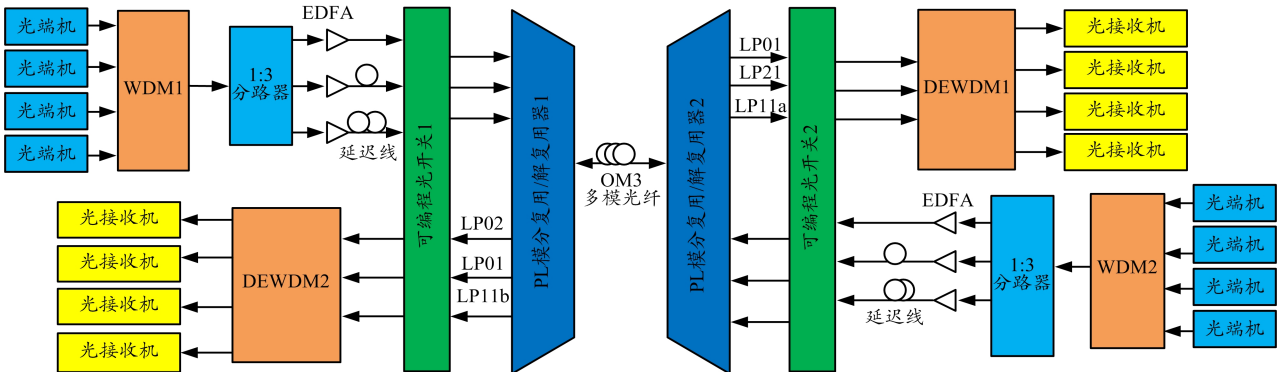


图 1 基于 PL 的无 MIMO MDM 带宽可调双向光纤传输系统设计图



图2 可编程光开关实物图

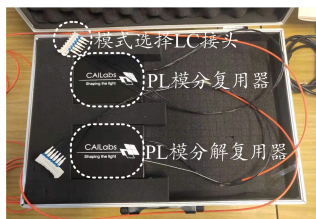


图3 PL 模分复用/解复用器实物图

示。该复用器提供了 SMF 与少模无源或有源光纤以及少模组件之间的最佳接口, 用于 MDM 系统中进行模分复用和解复用。利用该技术可有效地将少模光纤输入光束, 同时转换为少模光纤的传输模式。系统搭建时需要用 LC 接头转 FC 接头的适配器来连接到光开关上。

2 系统传输模式性能测试

在 1550 nm 波长区的 C (1530~1565 nm) 和 L (1570~1605 nm) 2 个波段上, 本文测量了 3 个传输模式的传输损耗和模间交调, 如图 4 所示。从图中左纵轴上可以看出, LP01、LP21 和 LP11a 3 个非简并模经 12.5 km 传输后损耗均小于 -11 dB, 损耗不大, 证明传输距离还有扩大的空间。LP01 模式、LP21 模式和 LP11a 模式在 2 个波段上传输时损耗平均值约为 -11.98 dB、-11.95 dB 和 -11.93 dB。3 个非简并模的模式相关损耗约为 1.2 dB。图中右纵轴的数值可以看出, 3 个非简并模之间的交调值都较低, 其中该传输系统在 C 波段上的交调平均值比 L 波段上的低, 说明在 C 波段上传输性能较好。另外, 在 2 个波段上非简并模之间的交叉调制均小于 -24 dB。其中, LP02-LP11a 模间交调的平均值约为 -28.8 dB; LP01-LP02 模式交调的平均值约为 -29.9 dB; LP11a-LP01 模式交调的平均值约为 -28.5 dB。

3 个非简并模的传输损耗和模间交调相差约 12 dB, 这种情况下可无需 MIMO 算法进行处理通信。

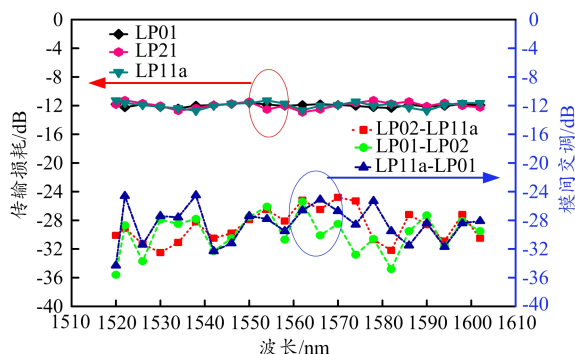


图4 系统在 C 和 L 波段上的传输损耗和模间交调

3 双向带宽可调传输的实现

本设计通过光开关来调节正反向传输的模式数以调节传输带宽。首先, 通过视频图形阵列 (VGA) 接口线, 将光开关与安装了光开关控制软件的 PC 端相连接, 再进入 PC 上的光开关控制软件的用户图形界面。在用户图形界面显示一个类似 8 行 2 列的矩阵, 一列对应光开关的光输入 (Input) 端口; 一列对应光开关的光输出 (Output) 端口。2 种配置情况如下:

当选择 3 个模式正向传输、2 个模式反向传输时, 首先将光开关 1 的连接状态设置为 I1、I2、I3、I5 和 I6 分别和 O1、O2、O3、O5 和 O6 相连接; 光开关 2 设置相同的连接状态。正向传输时, 左边的 3 路信号分别从 I1、I2 和 I3 3 个端口进入可编程光开关 1, 从对应的 O1、O2 和 O3 3 个端口输出光开关 1; 然后分别进入 PL1 的 LP01、LP21 和 LP11a 3 个模式通道进行模分复用, 再经过 12.5 km 多模光纤传输后从 PL2 解复用输出进入光开关 2; 最后 3 路信号经过 DEWDM 后到达接收机。类似于正向传输, 反向传输时, 右边的 2 路信号进入光开关 2 的 I5 和 I6 2 个端口, 从对应的 O5 和 O6 2 个端口输出光开关 2; 然后分别进入 PL2 的 LP01 和 LP02 2 个模式通道进行模分复用, 再经过 12.5 km 多模光纤传输后从 PL1 解复用输出进入光开关 1; 最后 2 路信号经过 DEWDM 后到达接收机。

当选择 2 个模式正向传输、3 个模式反向传输时, 首先将光开关 1 的连接状态设置成 I1 连接 O2、I2 连接 O2、I4 连接 O3、I5 连接 O5 以及 I6 连接 O6。光开关 2 的连接状态与光开关 1 基本相同, 只需要重新把 I3 连到 O4, 其余连接不变。正向传输时, 2 路信号进入光开关 1 的 I1 和 I2 2 个端口, 从对应的 O1 和 O2 2 个端口输出光开关 1; 然后分别进入 PL 模分复用/解复用器 1 的 LP01 和 LP21 2 个模式通道进行模分复用, 再经过 12.5 km 多模光纤传输后从 PL 模分复用/解复用器 2 解复用输出进入光开关 2; 最后 2 路信号经过 DEWDM 后到达接收机。类似于正向传输, 反向传输时, 首先 3 路信号从 I3、I5 和 I6 3 个端口进入光开关 2, 从对应的 O4、O5 和 O6 3 个端口输出光开关 2; 然后分别进入 PL 模分复用/解复用器 2 的 LP11b、LP02 和 LP01 3 个模式通道进行模分复用, 再经过 12.5 km 多模光纤传输后从 PL 模分复用/解复用器 1 解复用输出进入光开关 1; 最后 3 路信号经过 DEWDM 后到达接收机。

通过以上 2 种情况的可编程光开关的连接配置, 本文可以实现传输的双向带宽可调。

4 误码率测试及讨论

本文按图 1 搭建了双向传输系统的误码率及眼图测试系统, 通过在光接收机后接误码率测试仪 (BERT) 或示波器测出误码率和眼图。

背靠背 (BtB) 传输系统与 12.5 km 多模光纤传输系统相类似, 只是在 PL 模分复用/解复用器 1 和 PL 模分复用/解复用器 2 之间只连接 50 m 的少模光纤。图 5 给出了经 BtB 和 12.5 km 多模光纤传输后 2 路信号模式为 LP01 和 LP11a 的眼图, 可以明显地看出 BtB 传输后的各模式眼图质量均优于 12.5 km 多模光纤传输后的眼图质量。经 12.5 km 多模光纤传输后, 眼图的张开幅度减小质量降低, 这是由于在长距离传输时信号的传输受模式串扰的影响较大, 且本身多模光纤模间色散大, 在长距离传输时信号会产生畸变, 影响信号的传输性能。此外, 在相同的入射功率下, 本文还测

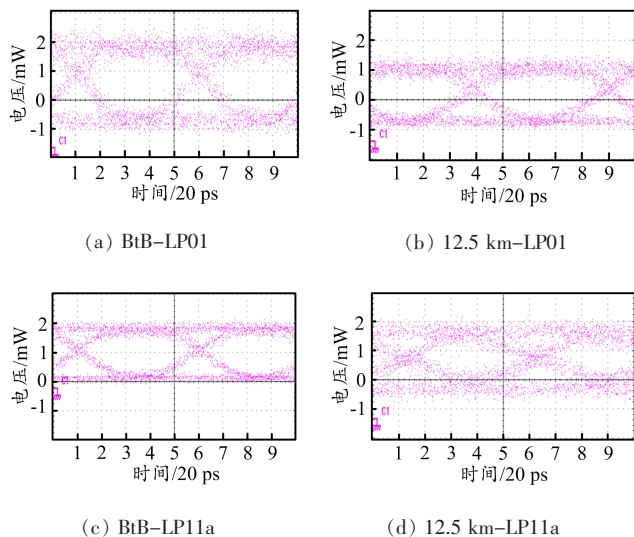


图 5 LP01 和 LP11a 模式经 BtB 传输与 12.5 km 多模光纤传输后接收到的信号眼图

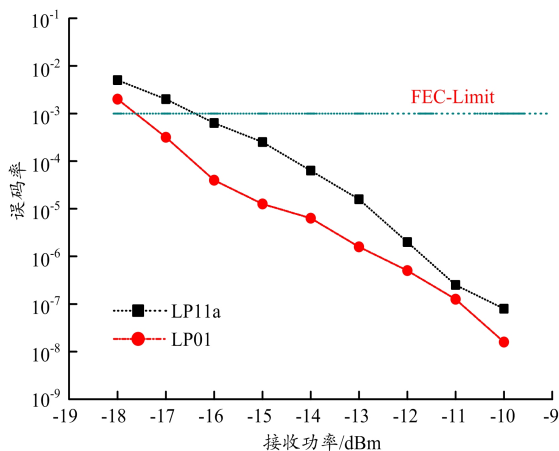


图 6 LP01 和 LP11a 模式接收功率与误码率的相关周曲线

量了 LP01 和 LP11a 2 路模式信号的误码率和接收功率, 其数值如图 6 所示。当接收功率为 -17 dBm 时, LP01 模式的误码率能达到 10^{-3} , 满足了前向纠错限制 (FEC-Limit); 当接收功率为 -16 dBm 时, LP11a 模式的误码率能达到 10^{-3} , 满足了 FEC-Limit。结合曲线图可以看出, 虽然传输了较长距离的多模光纤, 模间交调变大, 但是误码率满足前向纠错指标, 利用前向纠错技术可以实现无误码传输。

5 结束语

本文设计了一种基于 PL 的无 MIMO MDM 带宽可调的双向光纤传输系统, 利用 PL 作为模分复用/解复用器, 选取 LP21 和 LP01 2 个非简并模式作为正向传输信道, LP02 和 LP01 作为反向传输信道; 通过光开关控制 LP11 的 2 个简并模式作为正反向传输信道, 在 C 和 L 2 个波段上对系统传输性能进行测量, 3 个模式的模间交调均小于 -24 dB。通过可编程光开关配置演示了 3 个模式 (每个模式 4 个波长) 正向传输、2 个模式反向传输和 2 个模式正向传输、3 个模式反向传输。最后通过分析比较 BtB 传输和 12.5 km 多模光纤传输的误码率和眼图性能可知, 当 LP01 模式和 LP11a 模式在接收功率低至 -17 dBm 和 -16 dBm 时, 2 路模式信号的误码率都能达到 10^{-3} 。本文所建立的 WDM-MDM 实验系统, 通过多模光纤进行信号的传输, 具有系统结构简单、可靠性好、模式可扩展和成本低的优势, 适用于长距离低成本大容量等通信场景。

参考文献:

- [1] 张帆. 高速光纤传输技术进展 (特邀)[J]. 光通信研究, 2017 (6): 6-15, 31.
- [2] YU Jianjun. Photonics-Assisted Millimeter-Wave Wireless Communication[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2017, 53(6): 1-17.
- [3] ZHANG B, GU H, YANG Y, et al. Flyover Architecture for Cluster and TDM-Based Optical Network-On-Chip [J]. Photonics Technology Letters IEEE, 2014, 26(24): 2422-2425.
- [4] LUO L W, OPHIR N, CHEN C P, et al. WDM-compatible mode-division multiplexing on a silicon chip [J]. Nature Communications, 2014, 1(5): 1-7.
- [5] 赵亮, 杨斐, 刘昕, 等. 基于频率偏移偏振复用技术的高速 WDM PON 系统传输性能研究[J]. 中国新通信, 2016(12): 96-99.
- [6] AQRA B 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]. Social Science Electronic Publishing, 2017, 10(1015): 306-314.
- [7] 邹林森. 单模光纤中的色散和非线性效应[J]. 光通信研究, 1997(3): 27-29.

陈成, 诸明琛, 诸波, 等: 基于 PL 的无多进多出 MDM 带宽可调的双向光纤传输系统

- [8] LEON-SAVAL S G. Mode-selective photonic lanterns for space-division multiplexing[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 1036–1044.
- [9] RANDEL S, RYF R, SIERRA A, et al. 6×56-Gb/s mode-division multiplexed transmission over 33-km few-mode fiber enabled by 6×6 MIMO equalization[J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16697–16707.
- [10] RYF R, RANDEL S, GNAUCK A H, et al. Mode-Division Multiplexing Over 96 km of Few-Mode Fiber Using Coherent 6×6, MIMO Processing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(99): 521–531.
- [11] RYF R, FONTAINE N K, MESTRE M A, et al. 12 × 12 MIMO Transmission over 130-km Few-Mode Fiber, October 14–18, 2012[C]. New York United States: Frontiers in Optics 2012 / Laser Science XXVIII, 2012.
- [12] 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.
- [13] LEONSAVAL S G, FONTAINE N K, GUAN B, et al. All-fiber mode-group-selective photonic lantern using graded-index multimode fibers [C]// Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 22–26, 2015, Los Angeles, USA. Los Angeles: IEEE, 2015: 1–3.
- [14] 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(11): 222–228.

- [15] 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, 435(6): 102–108.
- [16] 陈保峰, 吴雅婷, 张倩武, 等. 基于光子灯笼的 2×20 Gb/s PAM4 信号模分复用传输[J]. 光通信技术, 2019, 43(3): 16–19.
- [17] PETER J WINZER, GERARD J FOSCHINI. MIMO capacities and outage probabilities in spatially multiplexed optical transport systems[J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16680–16696.
- [18] MOHAMMED Y, SOWAILEM S, THANG M. et al. 400G Single Carrier 500-km Transmission With an InP Dual Polarization IQ Modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(11): 1213–1216.
- [19] LEI Shen, DAWEI G, YAPING L, et al. MIMO-free 20 Gb/s×4×2 WDM-MDM Transmission over 151.5 km Single-span Ultra Low-Cross-talk FMFs[C]// European Conference on Optical Communication (ECOC), September 23–27, 2018, Rome, Italy. Rome: IEEE, 2018: 1–3.
- [20] GUILLAUME L, PU J, LIONEL G, et al. JEAN-BAPTISTE TRINEL, et al. 30 Gbit/s transmission over 1 km of conventional multi-mode fiber using mode group multiplexing with OOK modulation and direct detection [C]// European Conference on Optical Communication (ECOC), September 27–October 1, 2015, Valencia, Spain. Valencia: IEEE, 2015: 1–3.

OPTINET
CHINA



2020中国光网络研讨会

中国FTTH论坛 数据中心光互联论坛

400GbE Optics Edge Computing SDN/NFV 5G OTN IoT
Data Center Interconnects Network Slicing Data Center PON Transponders
Coherent Technology

2020年8月26–27日 | 北京粤财JW万豪酒店 August 26 – 27, 2020 | JW Marriott Hotel Beijing Central | China

主办单位 Organizers

中国通信学会光通信专业委员会
Optical Communication Committee of
China Institute of Communications

工信部通信科技委传输与接入专家咨询组
The Expert Advisory Group in Transmission and Access,
Communications Science and Technology Committee, MIIT

承办单位 Co-Organizer

InfoEX
讯息展—世界展览服务有限公司



欲了解更多资讯, 敬请联系大会秘书处: For more information, please contact the Event Secretariat:

李应强 Peter Lee
电话 Tel: (852) 2865 1118
传真 Fax: (852) 2865 1129
电邮 Email: peter.lee@infoexws.com

王丽雅 Lydia Wang
电话 Tel: (86-10) 6277 1798
传真 Fax: (86-10) 6277 1799
电邮 Email: lydia.wang@infoexevents.com.cn



www.optinetchina.com