



一种新型的低成本双向传输相干无源光网络系统

邱顺利¹, 杨毅², 胡荣³

(1. 国网辽宁省电力有限公司信息通信分公司, 辽宁 沈阳 110006;

2. 沈阳工程学院通信工程系, 辽宁 沈阳 110136;

3. 武汉邮电科学研究院光纤通信与网络国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 基于相干光通信技术, 提出一种采用直调激光器(DML)的光网络单元(ONU)收发装置及系统结构, 其主要用于密集波分复用无源光网络。低成本的单 DML 同时用于上下行传输链路, 以减少所需光源的数量。通过实验分析比较了不同驱动电压及偏置电流对 DML 的影响, 同时也分析了上下行数据的频率间隔和反向瑞利散射对双向传输系统性能的影响。实验结果表明, 该方法具有较好的系统接收灵敏度性能, 同时能够有效降低相干无源光网络系统的成本和复杂性。

关键词: 数字相干检测; 无源光网络; 光接入网络

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016202

A novel low cost bidirectional transmission coherent passive optical network system

QIU Shunli¹, YANG Yi², HU Rong³

1. State Grid Liaoning Electric Power Company Information and Communication Company, Shenyang 110006, China

2. Department of Communication Engineering, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China

3. State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430072, China

Abstract: Based on the coherent optical reception technology, a cost-effective structure for the optical network unit (ONU) transceivers in ultra-dense wavelength division multiplexing passive optical network using a single directly modulated laser (DML) was proposed. To reduce the number of required light sources, only one DML was used in both upstream and downstream links. By experimental investigations, the impacts of driving amplitude and bias current on DML's performance were analyzed. Meanwhile, the impact of frequency spacing between upstream and downstream signal and the Rayleigh backscattering interference on system performance were investigated. The method has better performance of system receiving and can effectively reduce the cost and complexity of coherent passive optical network system.

Key words: digital coherent detection, passive optical network, optical access network

收稿日期: 2016-05-03; 修回日期: 2016-07-13

通信作者: 邱顺利, xhz050212@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61505154)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61505154)

1 引言

将光相干检测技术用于密集波分复用无源光网络(ultra-dense wavelength division multiplexing-passive optical network, UDWDM-PON)能够极大地提升系统性能,如提高系统接收灵敏度、延长传输距离、增加波长密度等。相干UDWDM-PON面临的挑战主要包括无色、成本、灵敏度等问题。针对无色要求的解决途径主要是通过波长可调激光器来进行通道的灵活选择。同时相干检测在不依赖光放大器的前提下能够获得较高的接收机灵敏度。然而相对于传统的直接检测系统而言,该方法仍然存在不足之处,主要体现在接收机结构复杂并且成本昂贵^[1-4]。传统相干接收机需要独立的窄线宽光源,以内差或外差的方式与接收信号在90°光混频器中进行混频,然后由平衡探测器进行光电探测,因此单个集成相干接收机需要4对平衡探测器以接收偏置复用的发送信号。寻求一种成本低廉、结构简单、系统稳定的相干接收的技术方案成为该领域的研究热点。目前其主要技术方案有两种:一种方案是简化相干接收机的系统结构,同时减少所需要光电探测器的数量,以降低成本,如Presi M^[5]等人提出一种低成本的二进制开关键控相干接收机,该方案利用相位变更的3×3光耦合器及3个光电探测器进行相干接收;另一种方案则是使用低成本的激光器或者调制器以降低光网络单元(optical network unit, ONU)的成本。如使用直接调制分布反馈式激光器(DML)或者垂直腔面发射激光器(VCSEL)作为调制光源^[6,7],方案二在发送端采用单个DML或VCSEL取代了原有的外部调制方案,即采用独立光源与外部调制器来产生调制后的光

信号,因此极大地降低了器件成本与体积。

在上述研究的基础上,本文提出了一种全新的低成本双向传输ONU解决方案。该方案仅使用一个低成本的DML激光器,该DML激光器即被用于调制并传输上行数据,也被用作下行数据相干接收的本振光源。同时在接收端使用外差接收的技术以避免在双向传输中瑞利反向散射的干扰。实验结果表明,基于单个DML的双向传输相干ONU系统具有良好的传输性能,同时实验分析也为未来构建低成本的接入网络提供了一定程度的指导。

2 系统原理与结构

2.1 原理介绍

图1(a)为基于单个DML的相干PON中ONU端的系统结构。对于上行链路,OOK信号由脉冲发生器产生,并且直接驱动DML产生光信号。之后DML产生的光信号分成两路,一路作为下行信号相干接收的本振光源,而另一路作为上行链路的传输信号,向OLT(optical line terminal)端传输上行数据。对于下行链路,其调制信号由一个光强度调制器(Mach-Zehnder modulator, MZM)调制产生,并且与DML产生的本振光通过一个光相干接收机拍频接收。信号光为: $E_s(t) = A_s(t) \exp(j\omega_s t + \theta_s(t))$ 其中, E_s 代表信号光场, A_s 为信号光场幅度, ω_s 为光场频率, $\theta_s(t)$ 为信号光场相位。本振光为 $E_{lo}(t) = A_{lo}(t) \exp(j\omega_{lo} t)$, 其中, E_{lo} 代表信号光场, A_{lo} 为信号光场幅度, ω_{lo} 为本振光场频率。最终通过平衡探测相干接收机的输出信号如式(1)所示:

$$I(t) = 2R \sqrt{P_s(t)P_{lo}} \cos\{\omega_{lt} + \theta_s(t) + \theta_{lo}(t)\} \quad (1)$$

其中, I 为输出光电流, R 为光电转换系数, P_s 为信号

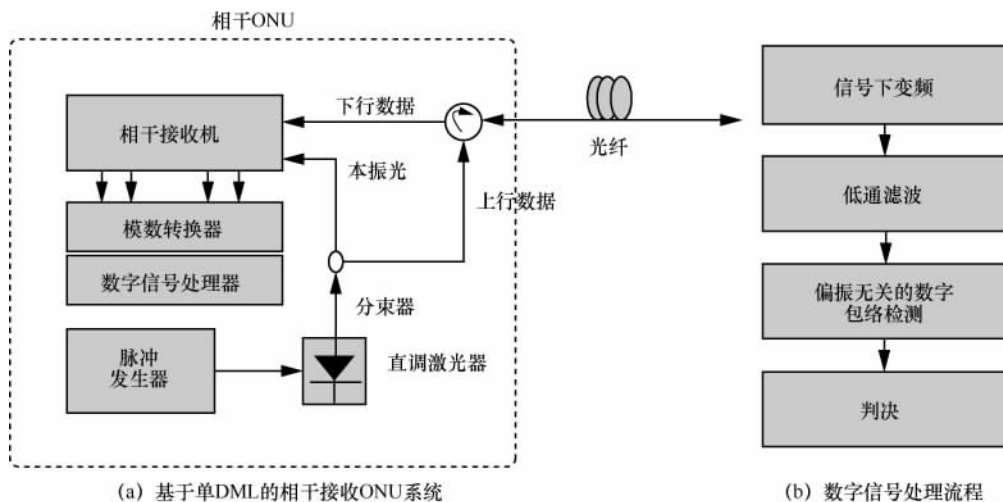


图1 相干ONU系统



光功率, P_{L} 为本振光功率, ω_{IF} 为信号光与本振光的差频, θ_{n} 为相位噪声。如图 1(b) 所示为上下行链路接收信号的数字信号处理算法。首先, 通过下变频算法估计中频 (intermediate frequency, IF), 使得接收到的信号恢复到基带信号; 其次, 通过一个低通滤波器滤出带外噪声 (如瑞利反向散射干扰), 再通过偏振无关的数字包络检测算法以消除偏振态变换对信号的影响; 最后, 对信号进行判决并进行误码检测。

如图 2(a) 所示, 在相干接收的 ONU 中, 本振光必须同下行信号波长具有一定的频率间隔以避免瑞利反向散射干扰的影响 (系统性能制约因素之一)。图 2(a) 还显示了 DML 调制消光比对于下行链路接收信号的性能的影响,

该影响主要取决于 DML 驱动电压的大小及偏置电流的选择, 这将在实验部分详细讨论。与之对应的上行 OLT 端接收光谱如图 2(b) 所示, 最主要的差别在于其使用的是窄线宽 ECL (external cavity laser) 作为本振光源。低通滤波器 (LPF) 的作用是恢复上行信号并滤除瑞利反向散射噪声。

2.2 实验系统结构

实验系统结构如图 3 所示, 该实验为验证 2.5 Gbit/s 单波长双向传输 PON 的系统结构。在 ONU 端, 仅使用一个 DML 既作为上行链路调制器同时也作为下行链路的本振光源。该 DML 仅由一个任意波形发生器 (arbitrary waveform generator, AWG) 驱动, 其输出速率为 2.5 Gbit/s 的 OOK 信号。DML 经调制后输出的光信号通过 1:2 光耦合器分成两

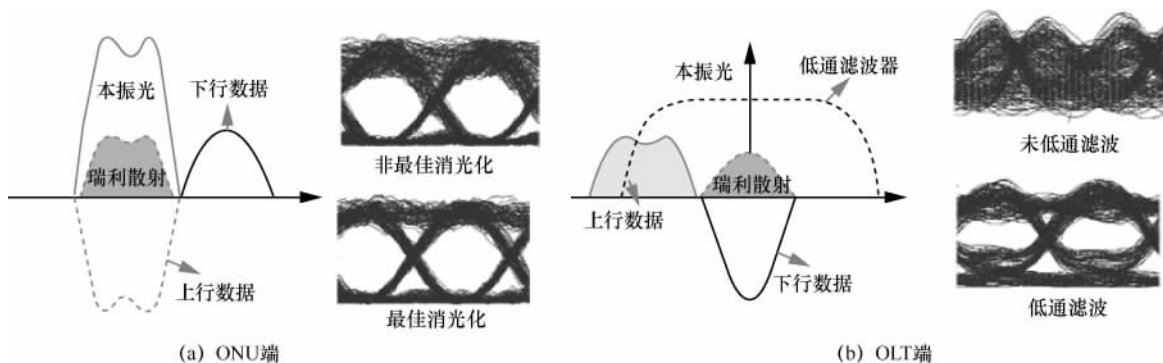


图 2 系统频谱及眼图

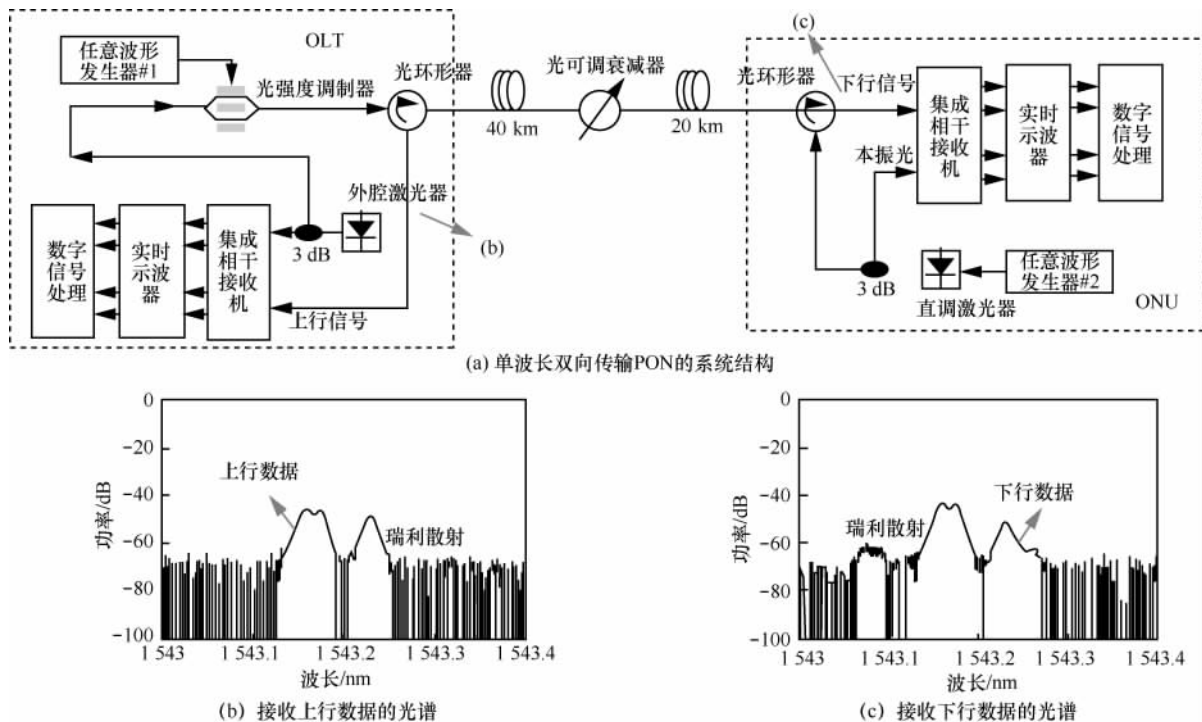


图 3 实验系统结构

路,一路输出到光环形器中作为上行光信号,另一路作为本振光源输入集成相干接收机 (intradyne coherent receiver, ICR)中。集成相干接收机输出的信号由实时采样示波器进行接收,并通过离线数字信号处理算法恢复。

传输链路由两段分别为 40 km 和 20 km 的光纤构成,并且在其中间插入一个光衰减器以调节接收功率。在 OLT 端,也仅使用一个窄线宽的 ECL 作为光源,它既用作上行数据相干接收的本振光源,也作为下行信号的调制光载波。ECL 波长设定为与 DML 波长相差几 GHz 间隔,以避免上下行链路的信号串扰。下行链路 2.5 Gbit/s 的 OOK 信号同样由一台 AWG 产生,并且通过一个 MZM 进行调制,加载到光信号上。考虑到 PON 系统的成本要求,整个实验系统未使用光放大器。

3 实验结果及讨论

根据原理所述,要正确地对系统性能进行评估,首先需对 DML 调制参数做出最优化的设定,而控制 DML 调制性能的参数主要有两个:输入信号幅度、偏置电流的大小。首先将偏置电流设定为 600 mA,同时选择不同的驱动电压幅度对系统性能进行测试,实验中信号电压幅度分别为 0 V、0.5 V 和 1 V。值得注意的是,当驱动电压为 0 V 时,DML 输出为直流光。图 4(a)显示了在上述 3 种情况下接收功率与系统误码率关系的曲线。由图 4(a)可得,驱动电压越低,下行信号的接收性能越好。当输入电压为 0 V 时,即将 DML 输入直流光作为本振光源时,系统在 7% 的误码率门限下接收灵敏度约为 -43.7 dBm。而当输入驱动电压幅度为 1 V 时,大约会产生 2 dB 的灵敏度代价。之后将偏置电流设置为 900 mA,在同样的条件下测试下行信号接收灵敏度的性能。如图 4(b)所示,同偏置电流设定为 600 mA 一样,当驱动电压越小时,系统性能越好。当输入电压幅度一样时,在 900 mA 偏置电流的条件下,性能灵敏度性能约有 1 dB 的性能提升。因此,根据上述实验结果,得出结论:当输入偏置电流越大或者输入驱动电压越小,即 DML 输出调制信号的消光比(extinction ratio, ER)越小时,下行链路信号的相干接收性能越好。

同理,根据不同 DML 的输入信号幅度、偏置电流的大小,对上行信号的灵敏度和误码率性能进行分析。其结果如图 5 所示。不同于下行链路,对于上行链路来说,驱动电压越大,ER 越高,其性能越好。1 V 驱动电压相比 0.5 V 驱动电压约有 0.5 dB 的灵敏度性能提升。同时偏置电流对

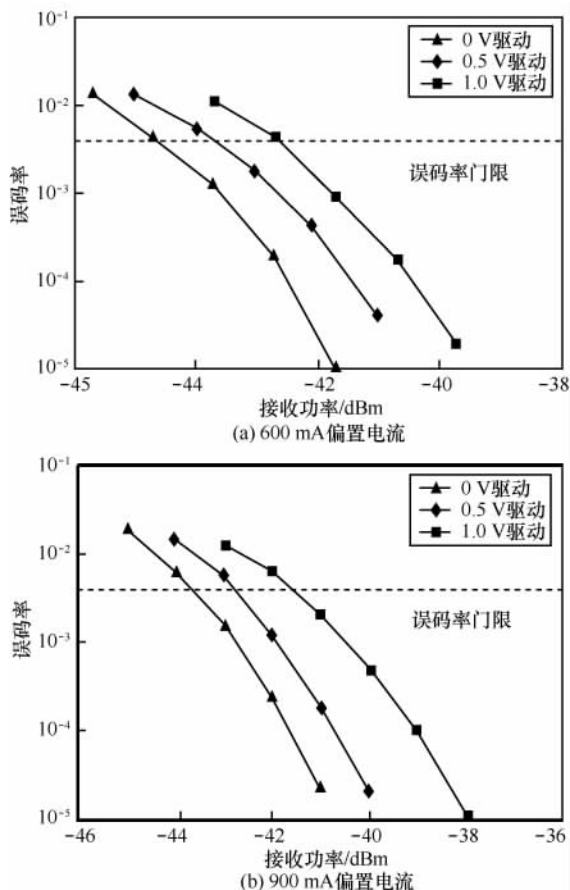


图 4 下行链路在不同驱动电压下的接收灵敏度

系统性能的影响几乎可以忽略不计。综合上下行链路的性能影响,最终确定驱动电压 0.5 V、偏置电流 900 mA 为 DML 的实验参数,以对该实验系统的功率预算性能进行分析。

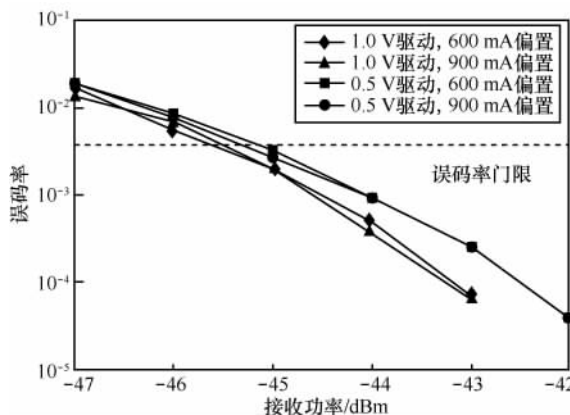


图 5 不同驱动电压及偏置电流条件下上行信号接收灵敏度曲线

在双向传输中,布里渊反向散射对系统性能有着不可忽略的影响,因此必须对其进行一定的研究分析。实验分



析了上下行链路在不同的频率间隔下对双向传输性能的影响。图 6(a)为下行链路在不同频率间隔下的接收信号灵敏度曲线,图 6(b)为对应上行链路接收信号的灵敏度曲线。由图 6 可知,对于下行链路,最佳驱动电压为 0.5 V,频率间隔为 7.5 GHz。当小于 7.5 GHz 时,布里渊反向散射会明显对系统性能产生影响。而对于上行链路,最佳驱动电压为 0.5 V,最佳频率间隔为 5 GHz。综合上下链路统一要求,并考虑到 12.5 GHz 的 UDWDM 频率间隔标准,最终设定频率间隔为 7.5 GHz。

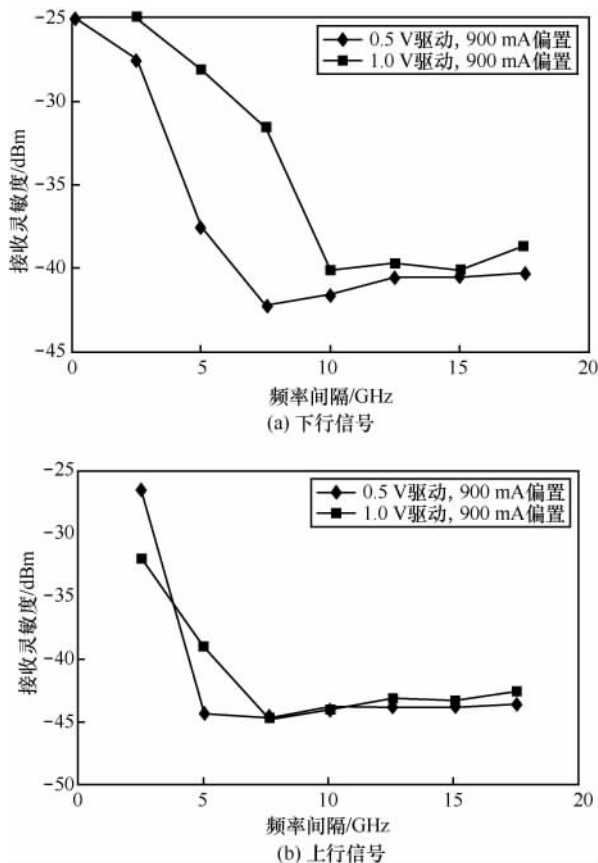


图 6 不同频率间隔下,上下行信号接收灵敏度曲线

根据上述实验结果,在最佳系统参数下(驱动电压为 0.5 V、偏置电流为 900 mA、频率间隔为 7.5 GHz),通过实验分析 DML 双向传输 PON 的性能,其结果如图 7 所示。经过 60 km 的光纤传输和 VOA 衰减,在 7% 的 FEC 门限下,上行链路的接收灵敏度约为 -45 dB,而下行链路约为 -43 dB。参考文献[5]中,系统在 1.25 Gbit/s 速率下的功率预算约为 48 dB,其下行信号检测需要采用额外的光源作为本地振荡器。本文所提方法以 3 dBm 的入纤功率计算,在 2.5 Gbit/s 速率下能够支持 46/48 dB 的下/上行功率预算,因此在功

率预算方面能够提供相同的性能。但是,在相干接收过程中对上行信号发送所用 DML 进行复用,使之同时作为下行相干检测的本地振荡器,因此较参考文献[5]进一步节约了独立光源所需成本。

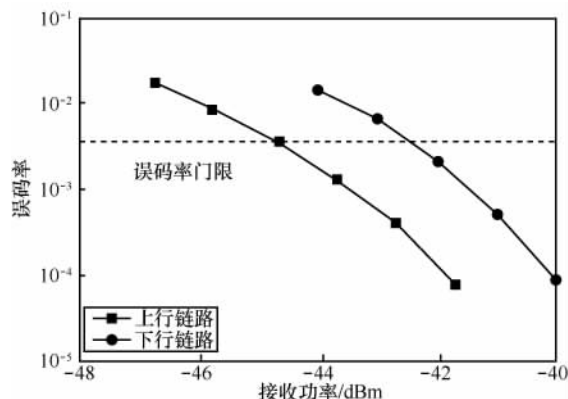


图 7 上行链路(US)及下行链路(DS)接收灵敏度曲线

4 结束语

本文提出了一种基于直调激光器(DML)的光网络单元(ONU)收发装置的系统结构,其主要用于密集波分复用无源光网络(UDWDM-PON)之中,且具有较高的成本效益。在该系统中,低成本的单 DML 同时用于上下行传输链路之中,以减少所需光源的数量。实验结果表明,相比于常规相干接收的方案,该方法同样具有较好的系统接收灵敏度性能,同时能够有效降低系统成本和复杂性。

参考文献:

- [1] WONG E. Next-generation broadband access networks and technologies [J]. Journal of IEEE Lightwave Technology, 2012, 30(4): 597-608.
- [2] EZRA L P, LAU A P T, BARROS D J F, et al. Coherent detection in optical fiber systems [J]. Optics Express, 2008, 16(2): 753-791.
- [3] SHIEH W, BAO H, TANG Y, et al. Coherent optical OFDM: theory and design [J]. Optics Express, 2008, 16(2): 841-859.
- [4] LAVERY D, MAHER R, MILLAR D S, et al. Digital coherent receivers for long-reach optical access networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 609-620.
- [5] PRESI M, CORSINI R, CIARAMELLA E. Experimental demonstration of a novel polarization-independent coherent receiver for PONs [C]//Optical Fiber Communication Conference, March 9-13, 2014, San Francisco, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1-3.
- [6] CANO I N, LERIN A, POLO V, et al. Direct phase modulation

DFBs for cost-effective ONU transmitter in udWDM PONs [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(10): 973-975.

- [7] JENSEN B, RODES R, CHENG N, et al. VCSELs for coherent PON[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 22-26, 2015, Los Angeles, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015:1-3.

[作者简介]



邱顺利(1961-),男,国网辽宁省电力有限公司信息通信分公司高级工程师,主要从事电力系统通信规划、计划与工程管理工作,主要研究方向为光通信及相关技术、光纤通信系统等。



杨毅(1965-),女,沈阳工程学院通信工程系副教授,主要从事通信网络规划、优化研究与教学工作,主要研究方向为智能与光网络技术。



胡荣(1982-),男,博士,武汉邮电科学研究院光纤通信与网络国家重点实验室高级工程师,主要研究方向为先进的数字信号处理技术、短距离光互联及子系统以及下一代光接入网络等,在国内外知名期刊和会议上发表了 25 篇以上的论文。