

文章编号: 0258-7025(2010)12-3037-07

光轨网络节点结构设计及性能分析

乐孜纯 侯继斌 付明磊 陈 君

(浙江工业大学理学院, 浙江 杭州 310023)

摘要 光轨(LT)是一种新型光通信网络结构,具有交换粒度小、带宽利用率高等优点。目前对光轨网络节点结构研究很少,尤其缺乏光轨节点性能仿真和实验研究。鉴于此,设计了一种支持 4 波长双向通信的光轨网络节点结构;搭建了光轨通信系统仿真平台,对单个光轨节点的光功率损耗,以及联网条件下数据波长的误码率和眼图进行了仿真测试。仿真测试结果显示,单个光轨节点的光功率损耗约 16 dB,未配置光放大器时,适用于节点间距小于 20 km 的光轨网络;配置单个半导体光放大器后,可将节点间距增加 5 km。针对节点间距 15 km 和 20 km,系统误码率分别降低了 10^5 和 10^2 ,眼图质量明显改善。该光轨节点具有结构简单、成本低、损耗低的优点,能够满足城域/接入光通信网络的传输要求。

关键词 光通信;光轨网络;节点结构;误码率;眼图

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103712.3037

Design and Performance Analysis of the Node Architecture for Light-Trail Network

Le Zichun Hou Jibin Fu Minglei Chen Jun

(College of Sciences, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract Light trail (LT), a novel optical network, promises small switching granularity and good bandwidth utilization. There is little research on LT node until now, especially on its performance simulation and experimental demonstration. A novel LT node architecture that supports 4 wavelengths for duplex communication is introduced. And a simulation platform is built to test the performance of the LT node, including insertion loss as well as bit error rate (BER) and eye diagram in LT networking. The simulation shows that its insertion loss is about 16 dB, which means that it should work at intervals of less than 20 km if without help of semiconductor optical amplifiers (SOAs). Further simulation shows that a single SOA can be employed to improve eye diagram, increase work distance of 5 km, and decline BER about 10^5 at 15 km distance or 10^2 at 20 km. Finally the conclusion can be drawn that the reported LT node has the advantages of simple structure, low cost and low loss, and is suitable for application in metropolitan and access optical networks.

Key words optical communications; light-trail network; node architecture; bit error rate; eye diagram

1 引 言

光轨(LT)是 Gumaste 等^[1]在 2003 年提出的一种光总线概念。基于光轨概念的网络利用当前成熟的元器件和网络技术,可以提供比特和协议的透明传输,支持多播技术和子波长调度,建设成本低,尤其是能良好地适应 IP 业务传输等优势^[2~5]。从理论上说,将光轨技术应用于现有波分复用(WDM)光网络中,可以有效降低交换粒度并提高带宽利用

率,是一种技术上可行而且有利于现有网络平稳升级的新方案。

光轨节点结构设计是建立光轨网络的一项重要工作,其结构设计是保证光轨节点及其网络的传输性能(包括损耗、误码率、眼图等)和网络性能(包括拥塞率、吞吐量、带宽利用率等)的基础。因此可以说光轨节点性能的优劣直接影响到整个光轨网络的性能。但是,近几年针对光轨技术的研究主要集中

收稿日期:2010-04-26; 收到修改稿日期:2010-06-06

基金项目:浙江省自然科学基金(Y1080172)和浙江省重大科技计划(2009C11051)资助课题。

作者简介:乐孜纯(1965—),女,博士,教授,主要从事光纤通信组网技术和微结构光电子器件等方面的研究。

E-mail:lzc@zjut.edu.cn

于光轨在已有 WDM 网络中的组网技术(比如带宽使用公平性)以及光轨网络的介质访问控制(MAC)协议等方面^[6~9],对光轨节点结构设计方面的报道不多,尤其缺乏相关的性能仿真和实验研究报道。Gumaste 等^[10,11]虽然给出了一种用于 WDM 通信系统的光轨节点结构,但并未对所设计光轨节点结构进行进一步的性能分析。而且其设计的节点结构中,使用了比较多的光放大器及滤波器,致使单个光轨节点的设计成本偏高,且有可能引入更大的附加损耗。

本文对 Gumaste 等设计的光轨节点结构进行了改进,将技术复杂、价格较高的上路滤波器用上路耦合器来替代,其次,在功率预算满足传输条件的基础上减少放大器的个数,并采用可实现宽谱放大的半导体光放大器(SOA)对多个波长同时放大,在保证节点性能的情况下,达到降低单个节点成本的目的。在此基础上,通过设计和构建仿真平台对本文提出的单个光轨节点及其联网状态下的传输性能进行了仿真测试和分析。包括测试了单个光轨节点的光功率损耗特性和各通道损耗均匀性,同时也测试了上述光轨节点在联网条件下的误码率(BER)和眼图,并对仿真结果进行了分析和讨论。

2 光轨节点的结构设计

给出了一个具有 4 个数据波长和 1 个控制波长的可双向通信的光轨节点设计方案,包括交换单元(如图 1 所示)、控制单元(如图 2 所示)和收发单元(如图 3 所示)。

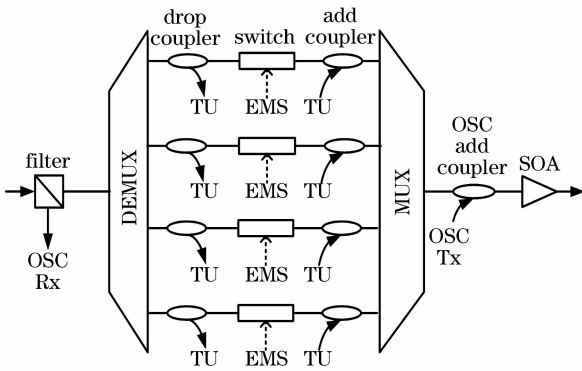


图 1 光轨节点中的交换单元

Fig.1 Switching unit in LT node

如图 1 所示,光轨节点交换单元主要包括滤波器、解复用器、下路耦合器、光开关、上路耦合器、复用器、控制信号上路耦合器以及 SOA。其中耦合器中箭头的方向表示上路或下路方向,光开关中的箭

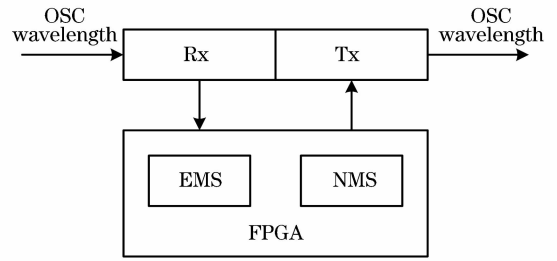


图 2 光轨节点中的控制单元

Fig.2 Control unit in LT node

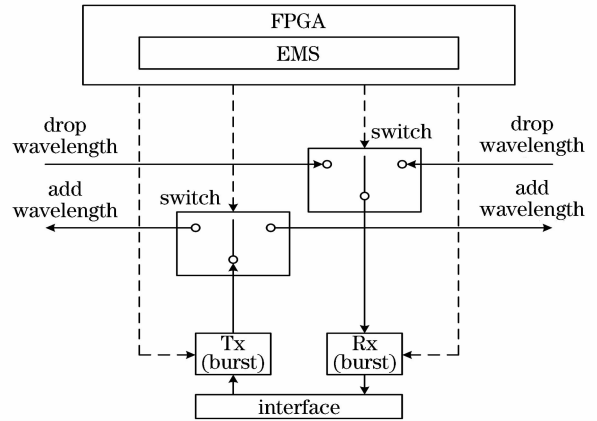


图 3 光轨节点中的收发单元

Fig.3 Transceiving unit in LT node

头表示其接受来自控制单元的数字信号输入。在交换单元中,滤波器的功能是从波分复用光信号中滤出控制波长^[12~14],并将其传输到控制波长接收机。而其余的复用数据波长经过解复用后通过下路耦合器来实现单路波长的下路功能。光开关在控制单元的控制下实现单路波长的通/断。上路的数据波长经过上路耦合器后进入复用器。控制波长也同样通过控制信号上路耦合器进入光纤传输。最后,波分复用光信号由 SOA 放大,然后传输到下一光轨节点。

在光轨节点结构中,上路耦合器代替了价格较高的上路滤波器,其优点是降低了单个光轨节点的成本,缺点是会使控制信号经历更大的光功率损耗。然而,由于在该光轨节点结构中,4 个数据信号的传输通道上配置了更多的无源器件,其功率损耗远大于控制信号,因此上路耦合器对控制信号引入的光功率损耗,反而在一定程度上起到了数据信道和控制信道之间功率均衡的效果,有利于抑制串扰。将光放大器数目减少为 1 个,并采用 SOA,因为其具有 20~30 nm 增益谱宽(可覆盖 4 个数据信道)、带内增益平坦的特性,能实现对 WDM 信号的同时放大^[15]。减少光放大器的个数不仅可以大幅度降

低单个光轨节点的成本,也有利于抑制噪声。

如图 2 所示,光轨节点控制单元(OSC)主要包括控制信号的接收机、发射机以及现场可编程门阵列(FPGA)。控制信号接收机与交换单元(见图 1)中滤波器的下路信号相连,接收控制波长信号。控制信号发射机与交换单元中的控制信号上路耦合器相连。FPGA 是控制单元的核心,它主要完成两大功能,即网络管理系统(NMS)功能和网元管理系统(EMS)功能。其中 NMS 主要用于整个光轨网络的信令交换和通信控制;EMS 主要用于对单个光轨节点中光学器件的控制,并且 NMS 和 EMS 之间可以互相通信。

如图 3 所示,光轨节点收发单元(TU)主要由光开关、工作在突发模式的光接收机和光发射机以及用户接口组成。其中光开关、光接收机和光发射机由控制单元中的 EMS 控制。光轨节点收发单元的主要功能是负责网络信息的下路(通过下路波长)和本地信息的上传(通过上路波长)。

3 光轨通信系统仿真平台构建

为了对光轨节点的传输性能进行量化评估,在专业通信系统仿真软件 VPI 8.2 试用版的基础上,利用其 VPItransmission Maker Optical System 模块搭建了光轨节点,并根据所需仿真的传输性能指标,构建了分析模块,将其与光轨节点相连,进行性能指标的测试。在仿真测试中,主要针对单个光轨节点进行光功率损耗特性和各通道损耗均匀性的测试;同时针对光轨节点在联网条件下,测试分析系统传输时的误码率,并且从眼图直观地观察所接收光信号的噪声及码间干扰。

基于上述目的,设计了两种场景下的光轨通信系统仿真平台。一种是针对单个光轨节点的仿真平台,另一种是光轨节点联网条件下的光轨通信系统仿真平台。图 4 为光轨通信系统仿真平台的框图,它主要由 6 个部分构成:发送模块、滤波模块、交换模块、控制单元模块、收发模块和分析模块。

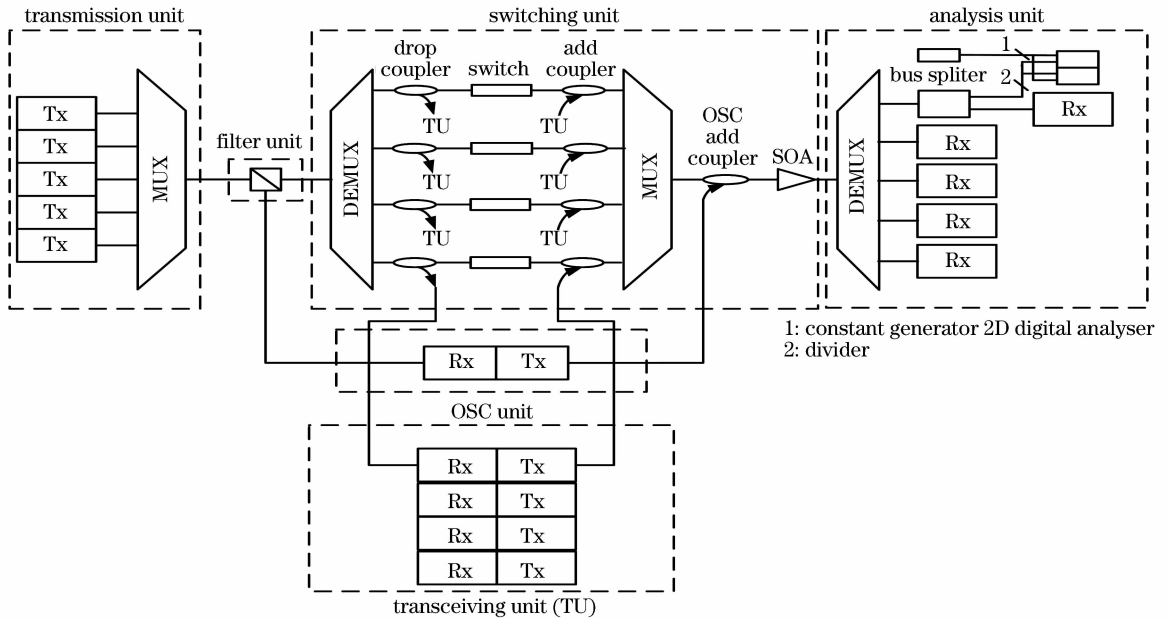


图 4 单个光轨节点的光轨通信系统仿真平台

Fig. 4 Communication system test-bed for single LT node

发射模块由 5 个发射机和 1 个复用器组成,发射机的调制方式为开关键控(OOK)。5 个光发射机的发射频率分别为: $f_1 = 191.6 \text{ THz}$, $f_2 = 192.6 \text{ THz}$, $f_3 = 193.6 \text{ THz}$, $f_4 = 194.6 \text{ THz}$, $f_5 = 195.6 \text{ THz}$,对应的波长分别为 $\lambda_1 = 1566 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1558 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 1550 \text{ nm}$, $\lambda_4 = 1542 \text{ nm}$, $\lambda_5 = 1534 \text{ nm}$,平均光发射功率设定为 0 dBm 。其中 λ_5 为控制信号波长,其余均为数据波长。5 路光信号由 1 个复用器复用到 1 根光纤中后进入交换模块。

滤波模块由 1 个滤波器组成,对输入的 WDM 信号进行滤波。滤出控制的信号波长并连接到控制信号接收机,其余数据信号 WDM 波长继续传输到交换模块。

交换模块是光轨节点的核心,主要包括 1 个解复用器,4 个下路耦合器,4 个上路耦合器,4 个光开关,1 个控制信号上路耦合器和 1 个复用器。所有耦合器均为 3 dB 耦合器。

控制信号收发模块主要包括一个发射机和一个接收机。发射机的发送频率为 $f_5 = 195.6$ THz, 发射功率设定为 0 dBm。

接收模块包括 4 个接收机和 4 个发射机, 用于模拟本地信号的上下路, 观察所接收信号的强弱。4 个光发射机的发射频率分别为: $f_1 = 191.6$ THz, $f_2 = 192.6$ THz, $f_3 = 193.6$ THz, $f_4 = 194.6$ THz, 发射功率均设定为 0 dBm。

分析模块是用于参数测试和数值分析的模块, 包括解复用器、总线分离器、分路器、常数发生器、二维数字分析器, 可以同时测得误码率、线性 Q 因子和信号眼图。解复用后的单路波长信号经过总线分离器分离后, 一部分信号经分路器分别输入到两个二维数字分析器中, 经处理后从两个二维数字分析器输出的分别是误码率和线性 Q 因子, 作为 Y 值。总线分离器另一部分输出信号连接到接收机, 可观察电信号的眼图。常数发生器经分路器后提供二维数字分析器的 X 值输入, X 值为长度。

最后所设计的仿真平台中其他参数设定为: 采用标准单模光纤, 光纤长度的变化范围为 10 ~ 50 km 的链路, 光纤衰减系数为 0.2 dB/km, 系统的信息传输速率为单波长 10 Gb/s。

4 结果与讨论

4.1 单个光轨节点引入的光功率损耗

图 5 表示通过单个光轨节点后的控制波长与 4 个数据波长的光频谱仿真结果, 光轨节点中未配置 SOA。图中横坐标表示频率, 纵坐标表示光功率, 4 个数据波长对应的频率依次为 $f_1 = 191.6$ THz, $f_2 = 192.6$ THz, $f_3 = 193.6$ THz, $f_4 = 194.6$ THz, 控制波长对应的频率为 $f_5 =$

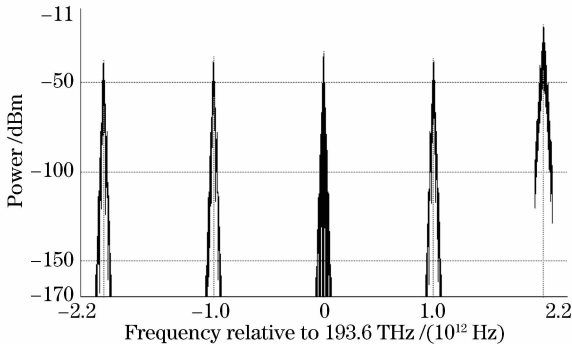


图 5 经单个光轨节点传输后的控制波长与数据波长的光频谱

Fig. 5 Optical spectrum of control wavelength and data wavelengths after single LT node transmission

195.6 THz。其中控制波长首先经过光轨节点的滤波模块滤波, 之后再通过节点交换模块的控制信号上路耦合器重新加载并传入节点交换模块中的 SOA; 而 4 个数据波长则是从节点交换模块的入口经解复用器、下路耦合器、光开关、上路耦合器、复用器, 再与控制波长信号会合传输到节点交换模块中的 SOA (如图 4 所示)。从图 5 可以看出, 由于控制波长只经历了上路耦合器引入的功率损耗, 所以控制波长信号光功率明显高于其他 4 路数据波长的光功率。对比控制波长和数据波长光功率的仿真结果得出: 在节点未配置 SOA 的情况下, 数据波长光信号在节点传输所经历的功率损耗约为 16 dB, 4 路数据波长的功率基本上是均衡的, 而控制波长经历的光功率损耗约为 3 dB。因此可以得出结论: 这里设计的单个光轨节点将对光轨上传输的光通信信号带来约 16 dB 的功率损耗, 可以认为是光轨节点的插入损耗。另外控制波长信道与数据波长信道的功率不平衡, 容易引起串扰, 因此需选择发射功率小 (比如发射功率为 -10 dBm) 的控制信号波长发射机。

4.2 光轨节点联网条件下的传输性能仿真结果

4.2.1 未配置 SOA 时的仿真结果

首先测试了光轨通信系统在未配置 SOA 情况下的误码率和眼图结果, 如图 6, 7 所示。

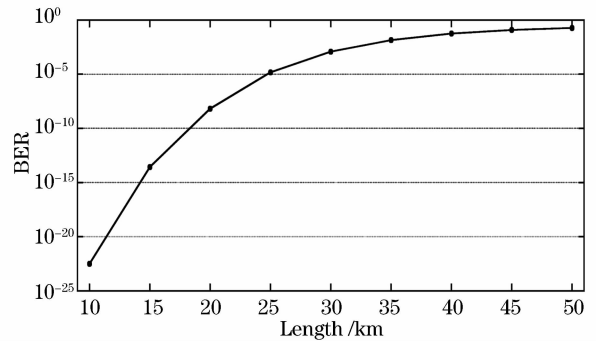


图 6 未配置 SOA 时的误码率随传输距离的变化

Fig. 6 BER versus fiber length without SOA

图 6 为误码率随传输距离的变化曲线。利用构建的仿真平台, 测得传输距离在 10, 15 和 20 km 时的误码率分别为 3×10^{-23} , 3×10^{-14} 和 6×10^{-9} 。结果显示, 随着光纤链路长度的增加, 系统的误码率快速地增加, 并且在传输距离为 20 km 时, 系统误码率达到 6×10^{-9} , 已不能满足信息传输的准确性要求 (数字通信系统要求误码率小于 1×10^{-9})。

图 7(a)~(c) 给出了在不同光纤链路长度情况下系统眼图的仿真结果。

图 7(a) 给出的是光纤链路长度为 10 km 时的眼

图,这时的码间干扰很小,眼图很清晰。图 7(b)是光纤链路长度为 15 km 时的眼图,与光纤链路长度 10 km 时相比,码间干扰增加,眼图质量明显下降,

但还可以分辨眼图形状,基本可以满足光轨通信需求。图 7(c)是光纤链路长度为 50 km 时的眼图,此时系统的码间干扰非常大,眼图已经难以辨识。

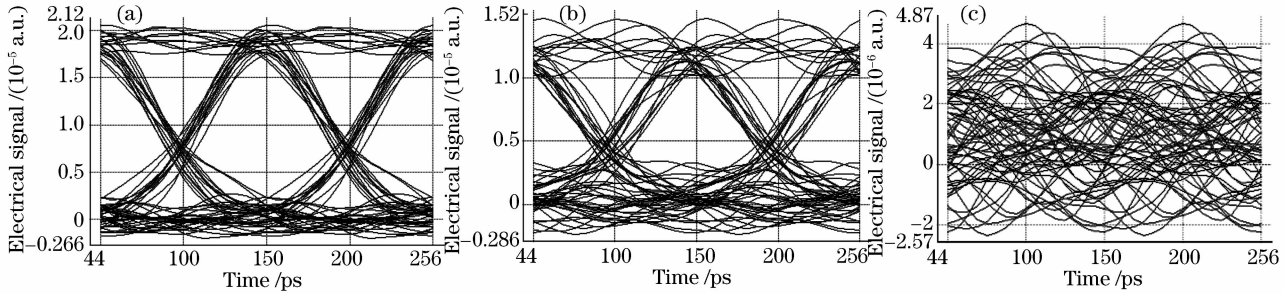


图 7 未配置 SOA 时的眼图。光纤链路长度为(a) 10 km,(b) 15 km,(c) 50 km

Fig. 7 Eye diagram without SOA. The length of fiber is (a) 10 km, (b) 15 km and (c) 50 km, respectively

由图 6,7 的误码率和眼图仿真结果可以看出,光轨节点结构可以满足大于 15 km 但小于 20 km 时光通信的要求,显然,要提高系统性能就必须对光功率进行一定的补偿。然而,若以城域边缘网或接入网作为应用场景,由于其单节点连接范围约 20 km,那么一个 4~6 个节点的光轨通信系统,可以覆盖 60~100 km 范围,完全能够满足其在此条件下的应用。

经过其传输的光信号放大 10 dB 计算,应该可以增加大约 50 km 的传输距离。显然仿真测试结果和理论分析结果有比较大的差距。分析其原因,可以认为在进行 10 Gb/s 数据传输且链路长度较长时,由于色散及非线性因素的影响,此时即使再增加 SOA 的数量也不可能大幅度地延长传输链路。因此,节点中采用 1 个 SOA 已经能够满足城域/接入网的传输要求,而若要将光轨应用于广域网进行更大距离的传输,还需要在光轨节点结构设计中进一步考虑色散补偿和非线性抑制,而不能仅仅靠增加光放大器数目来实现此目的。

4.2.2 配置单个 SOA 时的仿真结果

测试了在光轨节点配置一个 SOA 的情况下的误码率和眼图结果。图 8 给出了系统误码率随传输距离的变化。为了与未配置 SOA 时光轨节点的传输性能进行比较,也对光纤链路长度分别为 10, 15 和 20 km 时的误码率进行了仿真,得到的误码率分别为 2×10^{-31} , 7×10^{-19} 和 1×10^{-11} ,并在表 1 中给出了未配置 SOA 和配置了 1 个 SOA 时的系统误码率值的对比结果。结果显示,在光轨节点配置了单个 SOA 的情况下,系统误码率在光纤链路长度大于 20 km 的情况下仍小于 1×10^{-9} ,即依然可以满足信息传输的要求。分析误码率仿真结果可以看出,在配置单个 SOA 的情况下,光轨节点可以将光纤链路的传输距离增加大约 5 km。然而,若按 SOA 对

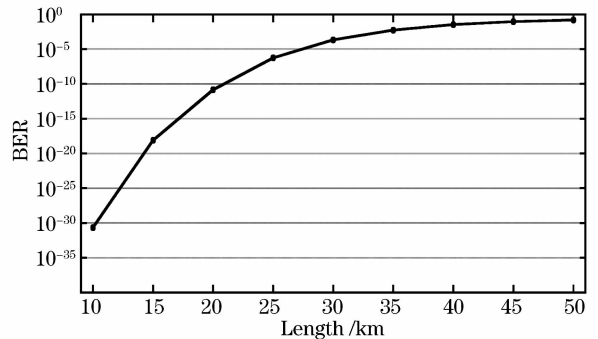


图 8 配置 SOA 条件下误码率与光纤长度的对应关系

Fig. 8 BER versus fiber length with SOA

表 1 未配置 SOA 和配置了单个 SOA 情况下的系统误码率值

Table 1 BER of light trails with SOA and without SOA

Fiber length /km	BER values (without SOA)	BER values (with an SOA)
10	$3.14047906393831 \times 10^{-23}$	$2.17178283135361 \times 10^{-31}$
15	$2.67638935064897 \times 10^{-14}$	$7.82110601025191 \times 10^{-19}$
20	$6.53570820158403 \times 10^{-9}$	$1.44668942252087 \times 10^{-11}$
25	$1.49172828712612 \times 10^{-5}$	$5.60355847619923 \times 10^{-7}$
30	0.00121484749378281	0.000216964388433033
40	0.0562156414020205	0.0342886775903801
50	0.184855864404912	0.15506818106493

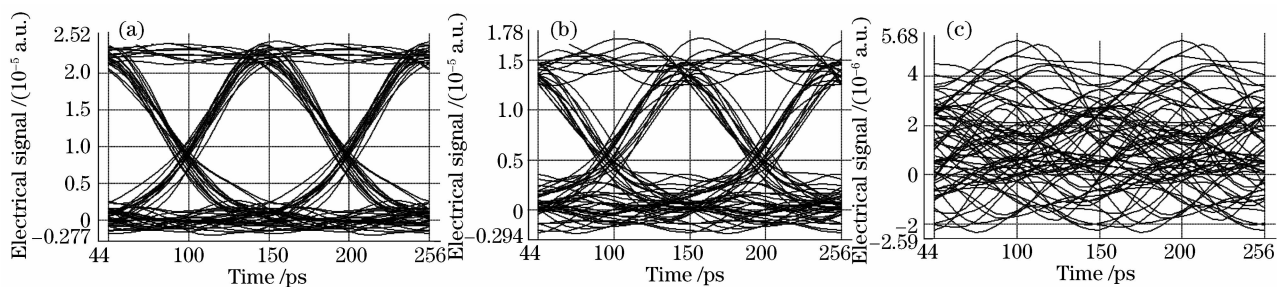


图9 配置 SOA 时的眼图。光纤链路长度为(a) 10 km, (b) 15 km, (c) 50 km

Fig. 9 Eye diagram with SOA. The length of fiber is (a) 10 km, (b) 15 km and (c) 50 km, respectively

图9(a)~(c)给出了在光轨节点配置了单个SOA之后,不同光纤链路长度情况下的系统眼图结果。结果显示,在光轨节点配置SOA能提高系统眼图质量。

综合以上有SOA和没有SOA时的仿真结果可以看出,在光轨节点本身损耗固定的情况下,链路长度较小时光功率的衰减是导致误码率上升的主要原因,所以在经过一段距离的传输后,必须对光信号进行放大,以补偿其功率衰减。但是,在长距离传输的情况下,仿真结果显示,即使在配置了SOA后,光轨通信系统能够增加支持的链路长度有限。分析其原因为,光纤色散以及交叉相位调制、四波混频等非线性效应引起的系统性能的恶化已经到了不可忽略的程度,不可能单纯依靠增加SOA的办法来提高系统性能。

5 结 论

给出了一种能够支持4波长实现双向通信的光轨节点结构,并对这种结构在单节点和联网条件下的传输性能进行了测试。着重对比了光纤链路长度为10, 15, 20 km时,配置了SOA和没有配置SOA情况下光轨系统的误码率和眼图。结果表明,在配置单个SOA的情况下,误码率分别为 2×10^{-31} , 7×10^{-19} , 1×10^{-11} ;而没有配置SOA时,参数的结果分别为 3×10^{-23} , 3×10^{-14} , 6×10^{-9} ,同时与后者相比,系统眼图也得到了一定程度的改善。因此在光纤链路长度约20 km的情况下,配置SOA能够有效地提高光轨通信系统的传输性能。设计的配置了单个SOA的光轨节点,可满足应用于城域/接入网中的系统传输性能的要求。然而,随着传输距离的增加,系统累积的色散和非线性效应已经不可忽略,不可能单纯依靠增加SOA来提高系统性能。因此若要将光轨应用于广域网进行更大距离的传输,或者应用于更高的信息传输速率的场合,则还需要在

光轨节点结构设计中进一步考虑色散补偿和非线性抑制。

参 考 文 献

- 1 Ashwin Gumaste, Imrich Chlamtac. Light-trails: an optical solution for IP transport [J]. *J. Opt. Netw.*, 2004, 3(5): 261~281
- 2 I. Chlamtac, A. Gumaste. Light-trails: A solution to IP centric communication in the optical domain [C]. *Quality of Service in Multiservice IP Networks: Second International Workshop, QoS-IP 2003*, Milano, 2003;634~644
- 3 Li Yan, Wang Jianping, Ashwin Gumaste *et al.*. Multicast routing in light-trail WDM networks [C]. *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM*, New Orleans, 2008;2633~2637
- 4 T. Michael, Frederick Anthan, A. Nathan *et al.*. Light trails: A sub-wavelength solution for optical networking [C]. *Workshop on High Performance Switching and Routing, HPSR*, Phoenix, 2004;175~179
- 5 Vanderhorn Anthan, Balasubramanian Srivatsan, Mina Mani *et al.*. Light-trail testbed for metro optical networks [C]. *2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, TRIDENTCOM*, Barcelona, 2006;310~315
- 6 Zhang Weiyi, Xue Guoliang, Tang Jian *et al.*. Dynamic light trail routing and protection issues in WDM optical networks [C]. *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM*, St. Louis, 2005;1963~1967
- 7 Balasubramanian Srivatsan, E. Kamal Ahmed, K. Somani Arun. Network design for IP-centric light-trail networks [C]. *2nd International Conference on Broadband Networks, BROADNETS 2005*, Boston, 2005;45~54
- 8 Le Zichun, Quan Bisheng, Zhang Ming *et al.*. Optimal utilization with fairness and priority considerations in optical networks based on light trail [C]. *IEEE 2009 Symposium on Photonics and Optoelectronics*, Wuhan, China, 2009;1~4
- 9 Fukushima, Yukinobul, A. Tanak *et al.*. Performance evaluation of medium access control methods in light trail networks [C]. *International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT*, Phoenix Park, 2009; 1421~1425
- 10 Ashwine Anal Gumaste, Pappara Palacharla, Susumu Kinoshita. System and method for establish transmission priority for optical light-trails [P]. US patent, 2006/0210273 AL, 2006
- 11 Ashwine Anal Gumaste, Susumu Kinoshita. System and method for implementing optical light-trails [P]. US patent, 2006/0210268 AL, 2006
- 12 Feng Dejun, Kai Guiyun, Zhang Weigang *et al.*. Experiment on channel-switching add/drop multiplexer in a multi-channel WDM

- system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **B11**(1):57~60
- 13 Jiang Yan, Luo Zongnan, Zhong Yuan *et al.*. Nonlinear codirectional coupler filter used in WDM networks [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **B9**(1):41~46
- 14 Liu Fengqing, Zeng Qingji, Zhu Xu *et al.*. Reconfiguring the logical topology with performance guarantees in WDM networks

- [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(z1):5~9
- 15 Yu Mingfei, Chen Xiaojun. Comparison between several kinds of main optical amplifier technologies [J]. *Digital Communication World*, 2008, (5):66~69
- 于明飞,陈孝君. 几种主要的光放大技术比较[J]. *数字通信世界*, 2008, (5):66~69

“2010 年中国光学重要成果”征稿启事

《激光与光电子学进展》的重点栏目——“年度中国光学重要成果”旨在介绍了中国光学领域科研人员在国际著名物理学、光学期刊(如 *Nature*, *Science*, *Phys. Rev. Lett.*, *Appl. Phys. Lett.*, *Opt. Lett.* 等)发表的具有重要学术、应用价值的论文。本栏目 2009 年度共评选出近 30 篇高质量的论文,获得了读者的广泛好评。

本刊 2011 年第 3 期继续推出“2010 年中国光学重要成果”栏目,现邀请您向本刊推荐稿件(包括自荐)。推荐稿件要求说明如下:

1. 稿件条件:研究成果已发表在 2010-01-01~2010-12-31 期间出版的国际知名物理学、光学刊物上,如 *Nature*, *Science*, *Phys. Rev. Lett.*, *Appl. Phys. Lett.*, *Opt. Lett.* 等。
2. 推荐形式:提供推荐稿件的 pdf 版本,并最好提供 500 字左右的推荐意见。标出推荐论文的所属研究领域,如自适应光学,生物光子学,探测器,衍射光学,光纤光学,纳米光学,非线性光学,光学工程,光子结构等。
3. 投稿截止日期:2010 年 12 月 31 日。投稿邮箱:lop@siom.ac.cn。

《激光与光电子学进展》编辑部
2010-10-20