

文章编号 : 0258-7025(2001)03-0257-04

SOA 功率均衡技术的误码率性能分析^{*}

费运思 张汉一 戴无惧 叶亚斌 郭奕理 周炳琨

(清华大学电子工程系 北京 100084)

提要 对光交叉连接(OXC)节点中采用半导体光放大器(SOA)功率均衡技术的方案性能进行了理论分析。首先模拟计算了链路中引入 SOA 后的功率代价,然后逐一讨论了发射机消光比,信号码率,SOA 的噪声系数对系统性能的影响,最后计算了 OXC 节点级联链路的误码率性能。从而为 OXC 节点和网络设计提供了理论分析和指导依据。

关键词 功率均衡, 半导体光放大器, 误码率性能

中图分类号 TN 365; TN 913.33 文献标识码 A

Analysis on BER Performance of OXC Nodes with Power Equalization Function Module

FEI Yun-si ZHANG Han-yi DAI Wu-ju YE Ya-bin GUO Yi-li ZHOU Bing-kun

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Theoretical analysis on the performance of OXC nodes in which SOA is used as power equalization device is presented. The power penalty of link with SOA is simulated; and then the impact of some factors on system, including extinction ratio of transmitter, bit rate of signal, spontaneous noise factor of SOA, is discussed; finally the BER performance of cascaded OXC nodes with SOA-based equalization module is given. All these provide the theoretical foundation for the design of OXC nodes and the optical network.

Key words power equalization, semiconductor optical amplifier(SOA), BER performance

1 引言

波分复用(WDM)光通信网是目前光通信领域中的一大热点,它将构成下一代长途干线通信网的主体。WDM 光通信网的技术分为三大类:传输技术、节点技术和网络管理技术。在现阶段,基于 WDM+掺铒光纤放大器(EDFA)模式的传输技术是比较成熟的,但节点技术和网络管理技术则在未来的实际应用中更具重要性,也是目前研究的重点。在 OXC、ROADM 等节点内实现功率均衡就是提高其传输质量、完善网络管理功能的一项关键技术。

功率均衡的方案很多,按实现方式可分为分立、集成,按其具体结构组成又可分为有源、无源两种。虽然集成的方法^[1,2]有着诱人的前景,但其主要依赖于器件的突破,而且存在如何适应光网络的灵活性和扩展性等问题,无源方法^[3]实现简单,对系统的

影响小,但是要以衰减信号作为代价。因此结合目前正在建设中的“WDM 全光通信实验网”,我们提出了一种基于半导体光放大器(SOA)的有源、分立的功率均衡实现方案,并对其性能进行分析。

图 1 所示为一种内含 SOA 单波长信道功率均衡功能模块的 OXC 节点结构。随着节点功能的完善及网络传输速率的提高,节点内部将增加色散补偿、波长变换等功能单元,相应地需要在节点内部增加功率均衡。利用 SOA 的增益电可调特性,采用 SOA 作为单波长信道功率均衡器件,应用“节点隔离原理”^[3],使得通过每个 OXC 节点的各个波长信道的光信号功率都达到预设值,从而达到 WDM 信号的功率均衡。因为 SOA 中载流子平均寿命短,其增益随注入电流的变化速度相应很快,因而用它作为增益可调因子可实现快速功率均衡,满足网络动态特性的要求。然而它的 ASE 噪声的引入对系统的影响程度却是决定方案优劣的关键。

^{*} 国家自然科学基金和 863 计划资助项目。

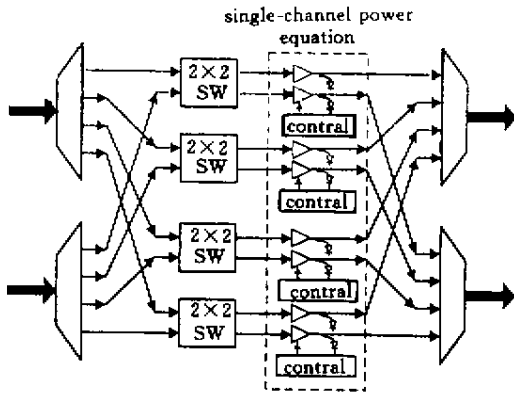


图 1 配置单波长信道功率均衡的 OXC 结构示意图

Fig.1 OXC structure with single-channel power equalization based on SOA

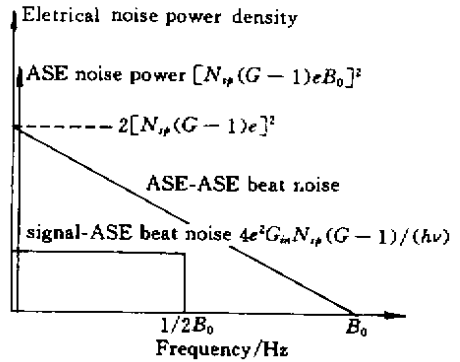


图 2 与 ASE 有关的噪声的功率密度谱

Fig.2 Electrical noise power spectrum related with ASE

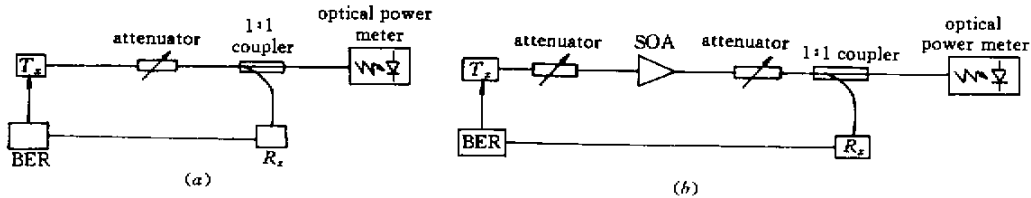


图 3 背靠背时的 (a) 及链路中加入 SOA 后的 (b) 误码率测量

Fig.3 Setup for BER measurement of back-back transmission (a) and setup for BER measurement of link with SOA (b)

2 链路中加入 SOA 引起的功率代价

信噪比是通信系统中最重要指标之一,但是对于 WDM 信号在光域上不易直接测量其光信噪比 (OSNR),故一般采用误码率 (BER) 来衡量传输质量。对强度调制-直接检测 (IM-DD) 光纤系统,假定接收机的量子效率为 1,检测经 SOA 放大的光信号,得到的各种噪声频谱如图 2 所示^[4],主要有信号-ASE 拍频噪声,接收机热噪声,信号散粒噪声,ASE 散粒噪声以及 ASE-ASE 拍频噪声。其中前四项都近似为高斯白噪声分布,ASE-ASE 拍频噪声频谱为三角形,在直流处功率谱密度为 $2[N_{sp}(G-1)e_0]B_0$,在频率为 B_0 处功率谱密度为 0。

在信号背靠背传输时,链路噪声源只有信号散粒噪声和接收机热噪声;而经过 SOA 后,将主要考虑信号-ASE 拍频噪声的影响,后两项噪声影响较小,可以忽略。另外,由于在 OXC 或 OADM 节点中用作功率均衡的 SOA 都是工作在小信号线性增益区,为分析方便可以忽略 SOA 非线性的影响。

$$\text{BER} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_Q^{\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy =$$

$$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(Q/\sqrt{2}\right), Q = \frac{\sqrt{P_{s, \text{mark}}} - \sqrt{P_{s, \text{space}}}}{\sqrt{P_{n, \text{mark}}} + \sqrt{P_{n, \text{space}}}}$$

其中, $P_{s, \text{mark}}$ 和 $P_{s, \text{space}}$ 分别为传号和空号时的功率。

先假设发射信号具有理想消光比,则背靠背时:

$$\sqrt{P_{s, \text{mark}}} = 2R_0 \cdot P_s \text{ 其中 } P_s \text{ 为接收到的平均功率}$$

率, $R_0 = \frac{\eta \cdot e}{h\nu}$ 代表接收机响应度, η 为探测器量子效率, e 为电子电荷, h 为普朗克常数, ν 为光信号频率,理想情况下取为 $1/\sqrt{P_{s, \text{space}}} = 0$ 。

$P_{n, \text{mark}} = \sigma_{sh}^2 + \sigma_{th}^2$; $P_{s, \text{space}} = \sigma_{th}^2$ 其中 $\sigma_{th}^2 = I_{th}^2 \cdot B_e$ 为接收机热噪声, $I_{th} = 10.0 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$; B_e 为接收机电带宽,取为 0.7 Bit-rate ; $\sigma_{sh}^2 = 2 \cdot e \cdot R_0 \cdot P_{sig} \cdot B_e$ 为信号散粒噪声。

根据以上关系式可得出背靠背传输时误码率与接收功率之间的关系曲线。

在链路中加入 SOA 时, $P_{n, \text{mark}} = \sigma_{S-ASE}^2 + \sigma_{sh}^2 + \sigma_{th}^2$ 其中 $\sigma_{S-ASE}^2 = 4R_0^2 \cdot P_{sig} \cdot P_{ASE} \cdot B_e/B_0$ 为信号光和 ASE 之间的拍频噪声, SOA 的自发辐射谱噪声为 $P_{ASE} = m_l \cdot n_{sp} \cdot h\nu \cdot B_0 \cdot (G-1)$, n_{sp} 为粒子数反转因子,取为 1.6。 G 为信号光增益, m_l 为偏振态数。测试方法如图 3 所示。

对于不同的 SOA 输入光功率,有不同的误码率

性能。图 4(a) ~ (c) 分别为输入功率为 -34 dBm, -30 dBm, -28 dBm 时的计算曲线。从图 4 中可以看出, SOA 的增益越大, 引入的 ASE 噪声越强, 链路的功率代价越大。对于不同的 SOA 输入功率, 性能也不

一样。输入功率越大, 功率代价越小。当其为 -34 dBm 时, 引起了误码率平顶; -32 dBm 时, 代价在 3 dB 之内; -28 dBm 时, 功率代价在 2 dB 左右。

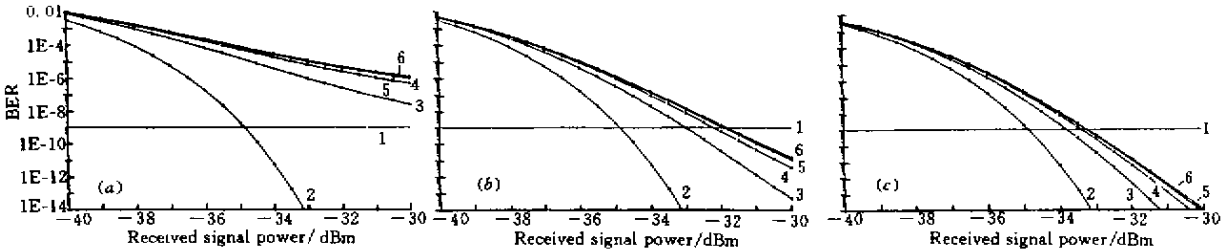


图 4 链路中加入 SOA 作线路放大器时的功率代价。SOA 的增益为 0~20 dB, 发射机信号设为理想消光比 (a) 进入 SOA 的信号功率为 -34 dBm; (b) 进入 SOA 的信号功率为 -30 dBm; (c) 进入 SOA 的信号功率为 -28 dBm

Fig.4 Power penalty of transmission link with SOA as line amplifier

(a) input power of SOA -34 dBm; (b) input power of SOA -30 dBm; (c) input power of SOA -28 dBm
 1: Bit-error-rate BER = 10⁻⁹; 2: back-back; 3: G = 5 dB; 4: G = 10 dB; 5: G = 15 dB; 6: G = 20 dB

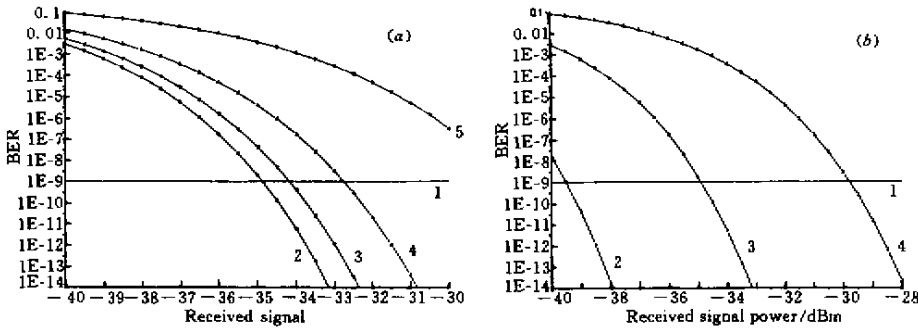


图 5 不同消光比 (a) 和不同速率 (b) 时的系统性能

Fig.5 System performance with different extinction ratio (a) and under different bit-rate (b)

(a) 1: BER = 10⁻⁹; 2: r = infinite; 3: r = 15 dB; 4: r = 10 dB; 5: r = 5 dB
 (b) 1: BER = 10⁻⁹; 2: B_r = 622 Mbit/s; 3: B_r = 25 Gbit/s; 4: B_r = 10 Gbit/s

3 影响系统性能的几个重要因素讨论

以上讨论中设定系统传输速率为 2.5 Gb/s, 发射机的消光比设为无穷大, 即理想的 NRZ 码; SOA 的自发辐射系数为 1.6。而在实际系统中, 发射机的消光比及系统工作速率对性能影响很大, 不同的噪声系数引入的恶化也不一样。以下将分别讨论。

3.1 背靠背传输时不同消光比的情况

不同消光比的影响体现在接收信号中“mark” (传号) 和“space” (空号) 的相对功率大小及引起的接收噪声的不同。设接收到的平均光功率为 P_s, 则对应于传号和空号的电接收功率分别为: $\sqrt{P_{s,mark}}$
 $= 2R_0 \cdot P_s \cdot \frac{r}{r+1}$; $\sqrt{P_{s,space}} = 2R_0 \cdot P_s \cdot \frac{1}{r+1}$ 。背靠背时, 信号的散粒噪声不同。从图 5(a) 可以看出

其所引起的功率代价。

若消光比太小, 则会引入较大的误码率。在消光比只有 5dB 时, 功率代价超过了 3 dB。这是不可接受的。而在一般发射机的消光比为 10 dB 时, 误码率 10⁻⁹ 时对应于理想消光比时的功率代价在 2 dB 之内; 消光比为 15 dB 时, 功率代价只有 0.5 dB。消光比反映了发射机的差别, 其影响主要体现在接收的信号和噪声功率上, 因而对加入了 SOA 的链路和背靠背时的影响是一致的。

3.2 背靠背传输时不同传输速率的情况

当系统工作速率不同时, 接收机的电接收带宽不同, 引起落入接收机范围之内噪声功率差别很大, 从而造成不同的误码率。

从图 5(b) 可以看出, 速率对误码率性能的影响

响很大。速率相差4倍时,在BER为 10^{-9} 时的接收信号功率相差近5 dB。速率的影响主要体现在接收机上,因而对背靠背和加入了SOA的链路的影响也是一致的。

3.3 SOA不同噪声系数的影响

我们的方案中采用SOA作为功率均衡与放大因子,关键是考虑其噪声对系统性能的影响。SOA自发辐射噪声系数一般在4~9 dB之间^[3]。以下分别取5 dB、6 dB、8 dB进行计算。取SOA的增益为20 dB,进入SOA的功率为-26 dBm,发射机的消光比为10 dB。

由图6可见噪声系数的影响也很大,当其为5 dB时,功率代价为1.0 dB;6 dB时,功率代价为1.7 dB;9 dB时,功率代价为2.2 dB。

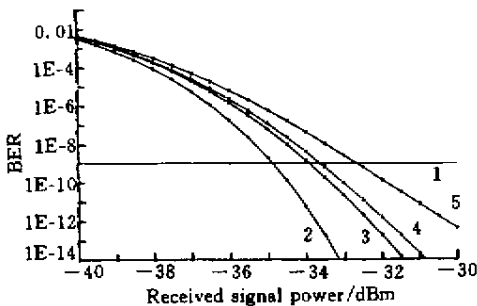


图6 SOA的噪声系数对系统的影响

Fig.6 Impact of SOA on system with different noise figure

1: BER = 10^{-9} ; 2: Back-back; 3: SOA n_{sp} = 5 dB;
4: n_{sp} = 6 dB; 5: n_{sp} = 8 dB

4 多节点级联传输链路的性能分析

考虑加入了功率均衡模块后的OXC节点的级联链路,并且采用“总功率均衡”方案,即设定的均衡功率包括信号功率和噪声功率。设定系统工作速率为2.5 Gbit/s,发射机消光比 r 为10 dB,得到图7。由于SOA单波长信道功率均衡的作用是保证每个节点输出WDM的功率平坦性,而且其响应速度很快,所以在级联节点数比较多的情况下,各节点内部的SOA增益变化与总的级联节点数无明显关系。

图中可以得出随着级联级数的增加,系统误码率性能不断恶化。其传输受到两个限制:一是通信系统要求 $BER \leq 10^{-9}$;二是使EDFA和SOA都工作在小信号增益范围内时对设定功率的要求,由此决定最大单路信号设定功率为2 dBm。图7显示不同设定功率情况下,误码率与级联节点数之间的关系,可见随着设定功率的不同,系统中允许经过的最大

节点数也不同,即网络规模不同(网络可以简单等效于若干OXC节点的级联)。在最大设定功率为2 dBm时,可经过的节点数为21;若要使网络规模至少为10个节点,则设定功率应该大于-1 dBm。

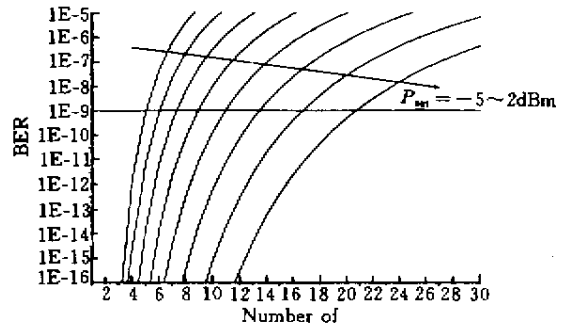


图7 不同设定功率下的节点级联性能

Fig.7 Performance of cascaded nodes under different set power

5 结论

从以上分析与计算可以看出,传输链路中引入SOA作为线路放大器后将引入一定的功率代价。SOA的增益越大,性能恶化越多;进入SOA的功率越小,引起的功率代价越大。同时影响传输系统性能的还有发射机消光比,信号码率,SOA的噪声系数等,其中信号码率影响接收机的电带宽,因而其对系统性能影响很大。最后分析在OXC节点中SOA同时作为线路放大器和增益可调器件的增益均衡模块性能,得到了在最大单路信号功率为2 dBm时,网络可允许级联的节点数为21;对于固定规模的网络,相应的有最小工作信号功率。

参考文献

- 1 C. R. Doerr, C. H. Joyner, L. W. Stulz. Integrated WDM dynamic power equalizer with potentially low insertion loss. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(10):1443~1445
- 2 Joseph E. Ford, James A. Walker. Dynamic spectral power equalization using micro-opto-mechanics. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(10):1440~1442
- 3 J. Zhou, M. J. O'Mahony. Power management system design of an optical multiwavelength transport network. *IEE Proc. -Optoelectron.*, 1996, **143**(3):178~188
- 4 N. A. Olsson. Lightwave systems with optical amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(7):1071~1082
- 5 L. Gillner. Properties of optical switching networks with passive or active space switches. *IEE Proc. -Optoelectron.*, 1993, **140**(5):309~315