

文章编号: 0258-7025(2001)09-0851-03

## 全光网节点规模的分析\*

郑小平 李艳和 张汉一 郭奕理

(清华大学电子工程系 北京 100084)

**摘要** 导出了光信噪比与光节点数量, 掺铒光纤放大器(EDFA)噪声系数, 增益的关系公式, 并分析了光节点数目与EDFA特性参数的关系。分析表明, 当光节点中EDFAs设置成输入EDFA补偿节点损耗, 输出EDFA补偿光纤损耗的工作方式时, 要保持光信号的信噪比不低于20 dB, 则光节点数目最多为19左右, 改善EDFA的噪声系数对提高光节点数目的作用不大; 如降低光节点内部损耗, 优化两个EDFA的增益, 可以最大程度地提高网络节点规模, 网络节点数最大可达56。

**关键词** 全光网, 光节点, 掺铒光纤放大器

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

### Analysis of the Size of All Optical Network

ZHENG Xiao-ping LI Yan-he ZHANG Han-yi GUO Yi-li

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

**Abstract** The dependence of optical signal-noise ratio on the number of optical nodes, both noise figure and gain of EDFAs is derived. The relation between the number of optical nodes and specifications of EDFAs is analyzed. Followings are concluded: 1) The number of optical nodes is about 19 under the case where the first EDFAs of optical nodes are used for the loss of nodes and the second EDFAs for the loss of fiber, and where the OSNR is required more than 20 dB; 2) To modify EDFAs' noise figure increases the number a litter; 3) It can increase the size of the all optical network up to 56 by reducing the loss of the nodes and optimizing each gain of EDFAs as well.

**Key words** all optical network, optical node, EDFA

基于密集波分复用(DWDM)技术的全光网是未来光通信网络发展的趋势<sup>[1]</sup>。全光网中的关键为光节点, 包括光交叉连接(OXC)与光分插复用(OADM)两种。它们的典型结构如图1所示。光节点中包含了掺铒光纤放大器(EDFA), 解复用/复用器, 用于OXC或OADM的一组光开关。图1中略去了其他功能模块, 如功率均衡, OADM可能有的保护倒换等。一般来说, OXC适用在主干网, OADM适用在本地网。全光网要得到广泛的应用, 需要回答的问题之一是全光能够实现的网络规模, 即其光节点数的最大值为多少。

影响光网规模的因素很多, 如串扰<sup>[2]</sup>、色散<sup>[3]</sup>、非线性<sup>[4]</sup>与噪声<sup>[5]</sup>等。现在已有比较实用的色散补

偿技术<sup>[3]</sup>, 而非线性的影响可以通过多种方式进行抑制<sup>[4]</sup>, 串扰的影响可以通过光器件性能的提高加以改善, 因此本文主要考虑噪声对光节点数量的影响。

### 1 原理

由于OXC与OADM节点构成具有相似性, 因此不失一般性, 采用图2所示的光节点简化模型, 即节点等效为一个光损耗器件。

考虑一个光信号经过  $n$  个光节点后的信噪比。每个节点设备的增益及噪声可以表示为<sup>[6]</sup>

$$G = G_1 L_{\text{node}} G_2$$
$$P_{\text{ASE}} = P_{\text{ASE1}}^{(\text{total})} L_{\text{node}} G_2 + P_{\text{ASE2}} \quad (1)$$

式(1)中,  $G_1, G_2$  分别表示节点输入端EDFA1与输出端EDFA2的放大倍数;  $L_{\text{node}}$  表示节点的透过率。  $P_{\text{ASE1}}^{(\text{total})}$  为第一个EDFA的输出自发辐射放大(ASE)

\* 国家重大自然科学基金(编号:69990540), 863, 国家教委基金资助项目。

收稿日期:2000-06-05; 收到修改稿日期:2000-08-09

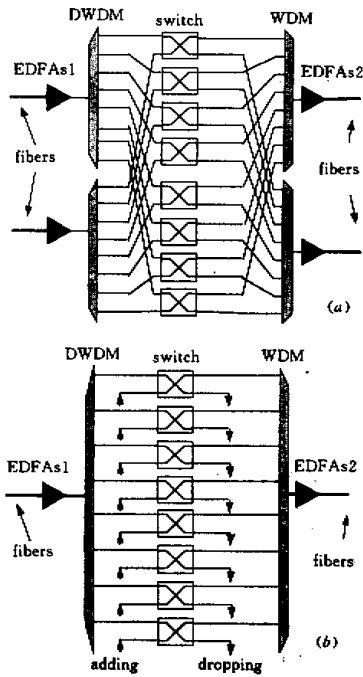


图1 光节点结构简图

(a) OXC原理图; (b) OADM原理图

Fig.1 Schematic diagram of optical nodes

(a) OXC; (b) OADM

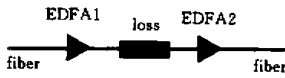


图2 光节点简化模型

Fig.2 Simplified model of optical node

谱功率,  $P_{ASE2}$  为第二个 EDFA 自身的 ASE 谱功率。因此有

$$\begin{aligned}
 P_{ASE1}^{(total)} &= P_{ASE1}^{(in)} G_1 + P_{ASE1} = \\
 &P_{ASE1}^{(in)} G_1 + 2n_{sp1} (G_1 - 1) h\nu B_{ASE} \approx \\
 &(P_{ASE1}^{(in)} + 2n_{sp1} h\nu B_{ASE}) G_1 \\
 P_{ASE} &= (P_{ASE1}^{(in)} + 2n_{sp1} h\nu B_{ASE}) L_{node} G_1 G_2 + \\
 &2n_{sp2} h\nu B_{ASE} G_2 \quad (2)
 \end{aligned}$$

式(2)中,  $2n_{sp1}$ ,  $2n_{sp2}$  分别为 EDFA1 与 EDFA2 的噪声系数,  $h\nu$  为频率为  $\nu$  的光子能量,  $B_{ASE}$  为 ASE 谱的带宽。由于 EDFA 增益一般在 100~1000 之间, 因此  $G_i - 1 \approx G_i$ ,  $i = 1, 2$ 。

设光源的平均输出光功率为  $P_s$ , 经过功放后信

号光的功率与 ASE 谱噪声分别为

$$P_{out} = P_s G_2$$

$$P_{ASE0} = 2n_{sp2} (G_2 - 1) h\nu B_{ASE} \approx 2n_{sp2} G_2 h\nu B_{ASE}$$

假设光节点等间距地分布, 相邻光节点的光纤长度为  $L$ , 其透过率为  $L_f$ , 则在节点隔离原理  $L_f L_{node} G_1 G_2 = 1$  条件下, 当光信号从第  $n$  个光节点输出时, 其光功率与噪声分别为

$$P_{out}^{(n)} = P_{out}^{(n-1)} L_f G = P_{out}^{(n-1)} L_f L_{node} G_1 G_2 = P_{out}$$

$$\begin{aligned}
 P_{ASE}^{(n)} &= 2n_{sp2} G_2 h\nu B_{ASE} \times (n+1) + \\
 &n \times 2n_{sp1} h\nu B_{ASE} L_{node} G_1 G_2
 \end{aligned}$$

因此第  $n$  个节点的输出信噪比为

$$OSNR = \frac{P_{out}^{(n)}}{P_{ASE}^{(n)}}$$

$$\frac{P_{out}}{2n_{sp2} G_2 h\nu B_{ASE} \times (n+1) + n \times 2n_{sp1} h\nu B_{ASE} L_{node} G_1 G_2} \quad (3)$$

设  $n_{sp2}/n_{sp1} = a$ , 上式取对数后, OSNR 的单位为 dB

$$\begin{aligned}
 OSNR &= 10\log P_{out} - 10\log(2n_{sp1}) - 10\log G_2 - \\
 &10\log(h\nu B_{ASE}) - 10\log[(n+1)a + nL_{node} G_1]
 \end{aligned}$$

$B_{ASE}$  取 0.1 nm 带宽,  $\nu$  对应于波长为 1550 nm 的光频, 因此有

$$\begin{aligned}
 OSNR &\approx P_{out} - NF_1 - G_2 - 10\log[(n+1)a + \\
 &nL_{node} G_1] + 58 \text{ (dB)} \quad (4)
 \end{aligned}$$

## 2 讨论

### 2.1 EDFAs 噪声系数对光网络节点规模的影响

EDFAs 噪声系数对光网络节点规模的影响如图 3 所示。图中 4 根曲线都是在  $P_{out} = 7$  dB,  $G_2 = 22$  dB(相邻光节点的光纤距离为 80 km) 条件下获得的。其中, 曲线 1 的  $NF_1 = 4.5$  dB,  $a = 2$  (即  $NF_2 = 7.5$  dB); 曲线 2 的  $NF_1 = 5.5$  dB,  $a = 1.58$  (即  $NF_2 = 7.5$  dB); 曲线 3 的  $NF_1 = 4.5$  dB,  $a = 2.5$  (即  $NF_2 = 8.5$  dB); 曲线 4 的  $NF_1 = 5.5$  dB,  $a = 2$  (即  $NF_2 = 8.5$  dB)。在保证光信噪比不低于 20 dB, 其他条件不变时, 第一个 EDFA 的噪声系数降低 1 dB(从 5.5 dB 降低到 4.5 dB), 信号光可经过的最大节点数从 19 个增加到 20 个, 增加了 1 个; 第二个 EDFA 的噪声系数降低 1 dB(从 8.5 dB 降低到 7.5 dB), 信号光可经过的最大节点数从 19 个增加到 22 个, 增加了 3 个; 两个 EDFA 的噪声系数同时降低 1 dB, 信号光可经过的最大节点数从 19 个增加到 23 个, 增加了 4 个。

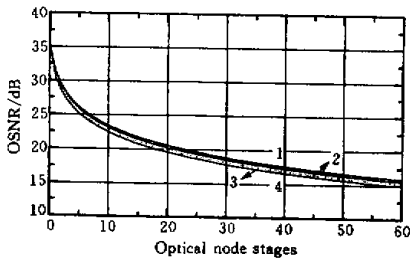


图3 光信噪比与 EDFA 噪声系数的关系

Fig. 3 Relation between OSNR and noise figure of EDFAs

由此可得如下两点结论:1)光节点第二个 EDFA 的噪声系数对光信号信噪比的影响要比第一个 EDFA 的大;2)降低 EDFA 的噪声系数对提高全光网最大光节点数目的作用并不明显。

### 2.2 一般条件下的光节点规模

设计节点时,EDFA 的增益一般这样选取:第一个放大器的增益抵消节点内的损耗,而第二个放大器补偿线路的损耗。这时式(4)为

$$\text{OSNR} = P_{\text{out}} - NF_1 - G_2 - 10 \log [n(\alpha + 1) + \alpha] + 58 \quad (5)$$

显然,只要光节点对第一个 EDFA 的输出功率要求不超过其饱和输出功率,则光信号的信噪比只与第二个 EDFA 的增益有关,而与第一个 EDFA 增益的具体值无关。当线路损耗一定时,光网络的节点规模也就固定了。如  $P_{\text{out}} = 7 \text{ dB}$ ,  $G_2 = 22 \text{ dB}$ ,  $NF_1 = 5.5 \text{ dB}$ ,  $\alpha = 2$ ,则在输出光信噪比不小于 20 dB 的前提下,光节点的数目在 19 个左右。

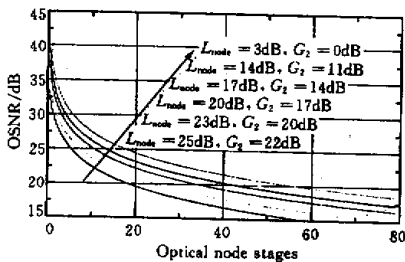


图4 EDFA 增益的调整与信噪比的改善关系

Fig. 4 Relation between gain of EDFAs and OSNR

### 2.3 光节点数的提高:调整 $G_1, G_2$ 的放大倍数

从式(4)可以看到,光信号的信噪比与  $L_{\text{node}} G_1$  的乘积有关,乘积越大,其值越大;但如果  $G_2$  能相应地减小,则光信噪比要比第一个放大器的增益抵消节点内的损耗、第二个放大器补偿线路损耗的情况要好。因此调整  $G_1, G_2$  的放大倍数,可以扩展网络光节点的数目。显然这种调整效果与节点内部的损耗有关,如图4所示。可见随着节点损耗的降低,这种调整的效果越明显。当节点损耗为 3 dB 时,采用该方法,网络节点规模可达 56。

## 3 结论

全光网业务的透明性同时也带来了 EDFAs 噪声的透明性。这种噪声的透明性限制了光网络允许的节点规模。理论分析表明,在光节点中,若第一个 EDFA 用来补偿节点损耗,第二个 EDFA 补偿光纤损耗,则此时如需保持光信号具有足够高的信噪比(20 dB),光节点数目在 19 左右,通过改善 EDFA 的噪声系数对光节点数目的提高作用不大;如降低光节点内部损耗,优化两个 EDFA 的增益,可以最大限度地提高网络节点规模,网络节点数最大可达 56 (光信号的信噪比最小为 20 dB)。

### 参考文献

- 1 M. W. Meada. Management and control of transparent optical network. *IEEE J. Selected Areas in Comm.*, 1998, 16(7):1008~1023
- 2 Yunfeng Shen, Kejie Lu, Wanyi Gu. Coherent and incoherent crosstalk in WDM optical networks. *J. Lightwave Technol.*, 1999, 17(5):759~764
- 3 R. Isabelle, G. Salim, G. Josselyne et al.. Chirped fiber Bragg gratings for WDM chromatic dispersion compensation in multispan 10-Gb/s transmission. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, 1999, 5(5):1312~1324
- 4 Xiang Chu, Young, James F.. Wavelength shift keying technique to reduce four-wave mixing crosstalk in WDM. Proceedings of the 1999 12th Annual Meeting IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS'99), San Francisco, CA, USA, Nov. 8~Nov. 11 1999, 2:609~610
- 5 Jacobsen G., Gillner L., Fransson O.. On the use of OSNR for BER monitoring in WDM systems and optical networks. *J. Optical Comm.*, 2000, 21(1):20~23
- 6 Yuan Rong. Optical Communication Networks. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1999 (in Chinese)