

文章编号: 0258-7025(2003)12-1095-04

全光网中的光信噪比估算与系统设计

戴无惧¹, 张汉一¹, 何永琪²

(¹ 清华大学电子工程系, 北京 100084; ² 大唐电信集团公司, 北京 100081)

摘要 指出了 WDM 光传送网中, 级联光上下路节点或光交叉连接节点后, 系统构成上与传统级联线路放大器情况下的差异以及常用光信噪比评估公式的近似性。对 WDM 光传送网中线路给出了一个等效模型, 并详细推导了光信噪比的计算公式, 同时计入了光放大器的自发辐射噪声引起的饱和效应。最后针对不同系统配置情况进行了光信噪比的估算, 分析了估算结果及其对线路设计的指导意义。

关键词 光纤通信技术; 波分复用; 光信噪比; 光交叉连接; 光上下路; 掺铒光纤放大器; 自发辐射噪声; 增益; 噪声系数

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

Estimation of Optical Signal-to-noise Ratio and System Design in All-optical Network

DAI Wu-ju¹, ZHANG Han-yi¹, HE Yong-qi²

(¹ *Department of Electronics and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*
² *DTT Group Company, Beijing 100081, China*)

Abstract The system difference between the link of cascaded line-amplifiers and the link of cascaded optical add-drop-module (OADM)/optical cross-connection (OXC) nodes is pointed out. A new formula to estimate the optical signal-to-noise ratio (OSNR) for the link with cascaded OADM/OXC nodes in all-optical network (AON) is presented. Based on the formula, a set of OSNR results is given. The analysis and numerical result show that the OSNR formula for link with cascaded line-amplifiers, which is widely used in engineering designing, could not be applied directly in AON design without correction.

Key words fiber communication technique; wavelength-division-multiplex; optical signal-to-noise ratio; OXC; OADM; EDFA; ASE accumulation; gain; noise-figure

1 引言

目前, 波分复用系统(WDM)已经成为大容量长途干线电信传输网的主体; 商用系统容量已经从最初的 4×2.5 Gbit/s 发展到现在的 128×10 Gbit/s。在不远的将来, 随着光分插复用节点(OADM)和光交叉连接节点(OXC)的引入, 越来越多的网络功能将在光域中完成, 全光传送将在网络中得到更多的应用。

在 WDM 光传送网中, 光信噪比(OSNR)是一

个衡量传输光信号的重要指标。虽然 OSNR 与信号误码率没有直接的关系, 但由于在 WDM 系统中不是逐站实现电再生, 所以评估信号光的传输质量只有通过 OSNR 的监测才能够较为直接和快捷地实现。

在以往采用掺铒光纤放大器的线路放大器的点到点 WDM 系统中, 多数^[1]采用以下公式对 OSNR 进行估算

$$\text{OSNR} = P_s - F_{\text{LA}} - G_{\text{LA}} - 10 \lg(k+1) + 58.03 \quad (1)$$

收稿日期: 2002-07-11; 收到修改稿日期: 2002-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(69990540)及国家 863(863-300-01-99)资助项目。

作者简介: 戴无惧(1966—), 男, 清华大学电子工程系博士研究生, 主要从事光通信网方面的研究。E-mail: daiwuju98@mails.tsinghua.org.cn

P_S 为 EDFA 输出的单波长信道平均功率; F_{LA} 和 G_{LA} 分别为线路放大器的噪声系数和增益; k 为线路中光纤链路总数。在网络中引入 OADM 和 OXC 节点(以下都简称为功能节点)后,对于相同光纤链路总数的一条光路由,光放大器的数目实际上增加了一倍,尤其是该公式并未考虑光放大器中自发辐射噪声(ASE)的饱和效应;所以再采用式(1)显然是不妥当的。另外,对于功能节点,节点内部的光纤链路与线路光缆长度相比很短,因此可以不考虑光纤的非线性效应,故节点输入预放大器的输出功率可以比节点输出端口的功率放大器的输出功率高一些。因此在评估 WDM 光传送网中的线路 OSNR 时不能再简单地套用式(1)。

本文将首先给出 WDM 光传送网中线路 OSNR

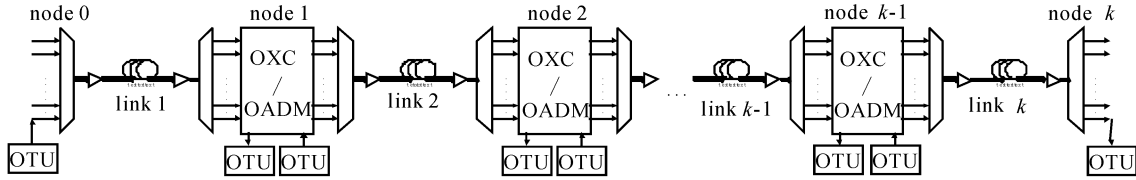


图 1 WDM 光传送网中功能节点级联情况下的线路模型

Fig. 1 Cascaded function nodes link model in all-optical network

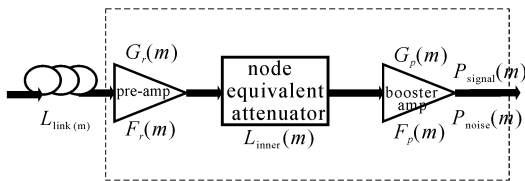


图 2 功能节点的等效模型

Fig. 2 Equivalent model for function nodes

在以下的公式推导中,各个相应符号的物理意义是: $G_P(m)$ 为第 m 个节点功率放大器的增益; $F_P(m)$ 为第 m 个节点功率放大器的噪声系数;对于 EDFA 有 $F_P(m) = [2G_P(m)n_{sp,P}(m) - 1]/G_P(m)$, 其中 $n_{sp,P}(m)$ 为放大器的自发辐射因子。 $G_r(m)$ 为第 m 个节点前置放大器的增益; $F_r(m)$ 为第 m 个节点前置放大器的噪声系数; $F_r(m) = [2G_r(m)n_{sp,r}(m) - 1]/G_r(m)$, 其中 $n_{sp,r}(m)$ 为放大器的自发辐射因子。 L_{link} 为第 m 条链路的线路损耗; $L_{node}(m)$ 为第 m 个节点的节点损耗。 $m = 0, 1, 2, \dots, N, N$ 为全光传输线路中的光缆链路总数。

在全光传输起始节点 ($m = 0$), 输入线路光缆的单波长信号功率为 $P_{signal}(0) = P_S$; 而输入光缆的自发辐射噪声为 $P_{noise}(0) = F_P(0)[G_P(0) - 1]A$, 其

的详细公式及其推导,并计及自发辐射噪声的饱和效应;然后对四种不同系统配置方案进行了计算,并分析了相应的结果。

2 节点模型与估算公式

图 1 给出了所采用的线路模型;一般的功能节点由输入预放大器、解复用器、开关阵列、光传送模块(OTU)、可调均衡器、复用器和输出功率放大器构成;其中的解复用器、开关阵列、可调均衡器、复用器均为衰减器件。图 2 给出了功能节点的等效模型。应该注意的是在该模型中,所有衰减器件被共同等效为一个衰减器,而不是等效为一段衰减量对应的光纤。

中 $A = h\nu B_{optical}$, h 为普朗克常数, ν 为光载波频率, B_O 为等效光通道带宽(一般取 0.1 nm)。在第一个接收的功能节点,前置预放大器的信号输出功率为

$$P_{signal,pre}(1) = \frac{G_r(1)}{L_{link}(1)} P_{signal}(0) = \frac{G_r(1)}{L_{link}(1)} P_S \quad (2)$$

前置预放大器的噪声输出功率为

$$P_{noise,pre}(1) = \frac{G_r(1)}{L_{link}(1)} P_{noise}(0) + F_r(1)[G_r(1) - 1]A = \frac{G_r(1)}{L_{link}(1)} F_P(0)[G_P(0) - 1]A + F_r(1)[G_r(1) - 1]A \quad (3)$$

该节点的信号输出功率为

$$P_{signal}(1) = G_P(1)P_{signal,inner}(1) = \frac{G_r(1)G_P(1)}{L_{link}(1)L_{inner}(1)} P_S \quad (4)$$

该节点的噪声输出功率为

$$P_{noise}(1) = \frac{G_r(1)G_P(1)}{L_{link}(1)L_{node}(1)} F_P(0)[G_P(0) - 1]A + \frac{G_P(1)}{L_{node}(1)} F_r(1)[G_r(1) - 1]A + F_P(1)[G_P(1) - 1]A \quad (5)$$

依此类推,第 m 个功能节点的前置预放大器的信号输出功率为

$$P_{\text{signal,pre}}(m) = \frac{\prod_{n=1}^m G_r(n) \prod_{n=1}^{m-1} G_p(n)}{\prod_{n=1}^m L_{\text{link}}(n) \prod_{n=1}^{m-1} L_{\text{node}}(n)} P_S \quad (6)$$

其噪声输出功率为

$$P_{\text{noise,pre}}(m) = \frac{G_r(m)}{L_{\text{link}}(m)} P_{\text{noise}}(m-1) + F_r(m)[G_r(m) - 1]A \quad (7)$$

该节点的接收光信噪比(OSNR)为

$$\text{OSNR}_{\text{rec}} = 10 \lg(P_{\text{signal,pre}}/P_{\text{noise,pre}}) \quad (8)$$

同理,第 m 个功能节点输出的单波长信号功率为

$$P_{\text{signal,pre}}(m) = \frac{\prod_{n=1}^m G_r(n) \prod_{n=1}^m G_p(n)}{\prod_{n=1}^m L_{\text{link}}(n) \prod_{n=1}^m L_{\text{node}}(n)} P_S \quad (9)$$

输出的噪声功率为

$$P_{\text{noise}}(m) = \frac{G_r(m)G_p(m)}{L_{\text{link}}(m)L_{\text{node}}(m)} P_{\text{noise}}(m-1) + \frac{G_p(m)}{L_{\text{node}}(m)} F_r(m)[G_r(m) - 1]A + F_p(m)[G_p(m) - 1]A \quad (10)$$

式(10)中,第一项为该节点以前的各个全光功能节点引入的 ASE 噪声累积结果,第二项为该节点前置预放大器引入的 ASE 噪声,第三项为该节点功率放大器引入的 ASE 噪声。

在计及 ASE 的饱和效应与放大器的功率输出限制时,以上各式应满足以下限制条件

$$P_{\text{signal,pre}}(m) + P_{\text{noise,pre}}(m) \leq P_{\text{SA,pre}}(m) \quad (11)$$

$$P_{\text{signal}}(m) + P_{\text{noise}}(m) \leq P_{\text{SA}}(m) \quad (12)$$

$P_{\text{SA,pre}}(m)$ 为第 m 个节点的前置预放大器的最大输出功率; $P_{\text{SA}}(m)$ 为第 m 个节点的功率放大器的最大输出功率。

对于最简单的情况, $G_p(m) = L_{\text{inner}}(m) = 1$, $G_r(m) = L_{\text{link}}(m) = G_{\text{LP}}$, $F_r(m) = F_{\text{LP}}$, $G_p(0) = G_{\text{LP}}$, $F_p(0) = F_{\text{LP}}$, $P_{\text{signal}}(m) = P_S$ ($m = 1, 2, 3, \dots, k$), 其中 $G_{\text{LP}}(m)$ 为第 m 个线路放大器的增益, $F_{\text{LP}}(m)$ 为其噪声系数。当假设 $G_{\text{LP}}(m) = 1$ 成立时,即可得到式(1)。

3 计算结果与分析

计算中假设所有功能节点的输出功率放大器具有相同的增益和噪声系数;所有的输入预放大器也是相同的。各个光纤链路具有相同的损耗;各个功

能节点的内部损耗也相同。在系统参数取值时遵循节点隔离原理,即 $G_p G_r = L_{\text{link}} L_{\text{node}}$ 。

另外,计算时节点输出功率放大器的最大(饱和)输出功率为 +15 dBm,节点输出的单波长信号平均功率取 +6 dBm(对应 8 个波长的系统,节点总的信号输出功率刚好达到饱和输出)。节点输入光放大器的饱和输出功率取 +17 dBm(对应单波长信号平均功率 +8 dBm)。光纤链路损耗取 23 dB(光缆损耗取 22 dB,对应 80 km 标准单模光纤的正常损耗;外加输入与输出端口保护倒换模块的 1 dB 附加损耗)。

我们研究了 4 种节点系统配置情况:1) 带广播功能的高内部损耗普通噪声特性节点(节点损耗 23 dB,输入预放大器噪声系数为 5.5 dB,增益变化范围为 24~30 dB,输出功率放大器噪声系数为 9 dB);2) 低内部损耗普通噪声特性节点(节点损耗 17 dB,输入预放大器噪声系数为 5.5 dB,增益变化范围为 20~28 dB,输出功率放大器噪声系数为 9 dB);3) 高内部损耗良好噪声特性节点(节点损耗 23 dB,输入预放大器噪声系数为 4.5 dB,增益变化范围为 22~30 dB,输出功率放大器噪声系数为 6.5 dB);4) 低内部损耗良好噪声节点(节点损耗 17 dB,输入预放大器噪声系数为 4.5 dB,增益变化范围为 24~32 dB,输出功率放大器噪声系数为 6.5 dB)。计算结果见图 3(a)~(d)。在各种情况中,也按公式(1)计算了对应的级联线路放大器 EDFA 的链路 OSNR 作为参照对比。

由图示结果可以发现,在功能节点级联情况下线路中 ASE 累积是有明显影响的;这一方面是由于虽然此时的线路中光纤链路的数目没有变化,但 EDFA 的数目增加了一倍;另一方面是显示在进行光信噪比估算时不能忽略 ASE 累积引起的 EDFA 饱和效应;式(1)即使作简单的修正(如计及 EDFA 数目加倍而增加 3 dB 恶化),仍不适于功能节点数目较大的情况(对于纯粹的线路放大器级联链路亦然)。另外,功能节点的内部损耗对 OSNR 有一定的影响,6 dB 的节点损耗差异就引入了 3 dB 左右的 OSNR 变化。值得注意的是,无论功能节点中损耗如何,输出功率放大器的增益与噪声特性如何,输入预放大器的增益并不是越高越好,一个略为偏小的输入预放大器增益(我们所研究的情况为 26 dB)可以获得很好的性能改善。这一结论与传统的通信系统中要求接收机前置低噪声放大器增益越高越好的结论是完全不同的;其原因在于 EDFA 的噪声产

生机制,即 EDFA 的 ASE 与 EDFA 的增益有关,同时 ASE 对 EDFA 具有饱和效应(即限制了 EDFA

对信号光的实际放大能力)。

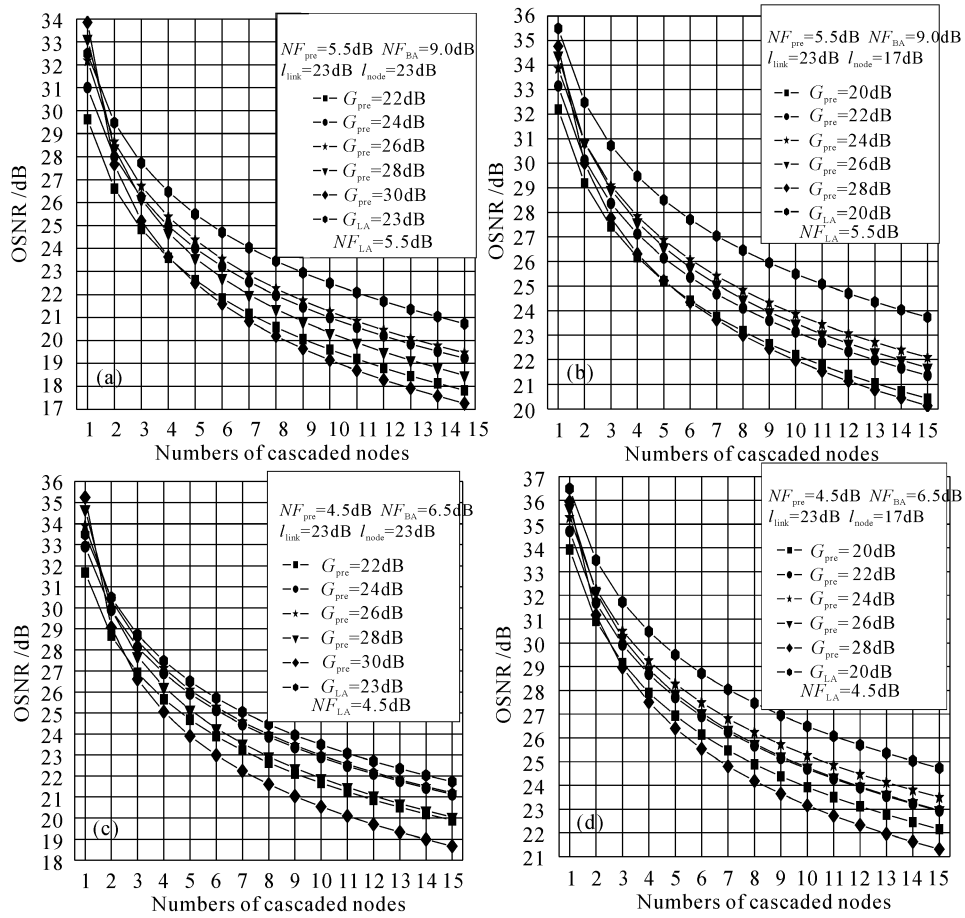


图3 节点级联结果

(a) 高损耗、普通噪声;(b) 低损耗、普通噪声;(c) 高损耗、良好噪声;(d) 低损耗、良好噪声

Fig. 3 Results for cascaded nodes

(a) with high node-loss and normal noise performance; (b) with low node-loss and normal noise performance; (c) with high node-loss and better noise performance; (d) with low node-loss and better noise performance

参 考 文 献

1 E. Desurvire. Erbium Doped Fiber Amplifiers;

Principles and Applications [M]. New York; Wiley, 1994