

文章编号: 0258-7025(2004)10-1222-05

波分复用光传送网中光路的噪声积累模型

徐志根, 周炳琨, 张汉一, 李艳和, 郭奕理, 郑小平, 秦 涛

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 根据国际电信联盟 (ITU-T) 建议 G. 873 定义的光传送网 (OTN) 中光路的假设参考模型 (HRM), 提出了光路经过多个光节点和光纤传输段后噪声积累的数学模型, 推导了解析计算公式, 并且按照节点隔离原理推导了计算噪声积累的简化公式以及工程等效模型。分析了光节点中增益 (损耗) 分配对噪声功率的影响, 得出了光节点的优化设计原则。提出的光路噪声模型可以为光网络中光节点和光纤传输段的设计提供参考。

关键词 光通信; 光传送网; 噪声积累; 光节点; 波分复用

中图分类号 TN 929. 1; TP 393. 03 **文献标识码** A

Modeling the Noise Accumulation of Optical Paths in WDM Optical Transport Networks

XU Zhi-gen, ZHOU Bing-kun, ZHANG Han-yi,

LI Yan-he, GUO Yi-li, ZHENG Xiao-ping, QIN Tao

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

Abstract A mathematic model is presented for the noise accumulation within optical paths in optical transport networks according to the hypothetical reference model (HRM) defined in ITU-T recommendation G. 873. The optical paths may pass through multiple optical nodes and fiber links with optical amplifiers. Analytic calculation formulae are derived and simplified according to the node isolation principle. An engineering equivalent model is given, as well as the corresponding calculation formulae. The impact of the gain (attenuation) distribution within an optical node on the noise power is analyzed. Optimum design principles are proposed for optical nodes to reduce noise power in optical paths. The noise models for optical path can be used as a reference for designing optical nodes and fiber transmission spans in optical networks.

Key words optical communication; optical transport network; noise accumulation; optical node; wavelength division multiplexing

随着光通信的发展, 基于新型光节点的波分复用 (WDM) 光传送网 (OTN) 是未来光通信网络的发展趋势^[1,2]。OTN 在光域内实现业务信号的传送、复用、路由选择、监控, 并且保证其性能指标和生存性。国际电信联盟 (ITU) 正在制订和完善关于 OTN 的系列建议, 在建议 G. 873^[3] 中, 提出了 OTN 及其光路的一般假设参考模型 (HRM)。OTN 和传统的波分复用终端 + 掺铒光纤放大器 (EDFA) 的光传输线路相比有很多优势, 如: 透明性、可重构性、无

电子瓶颈和低成本等。但同时, OTN 的透明性也使噪声、色散、串扰和非线性效应等在光路中积累, 对光路的性能造成影响。其中, 色散的补偿、串扰和非线性效应的抑制和管理方面已经有很多的方法^[4~6], 但是, 光路中噪声的积累问题还待解决, 基于单纯的光节点级联的光信道噪声积累问题已经有文献进行过讨论^[7]。

本文根据 OTN 中光路的通用假设参考模型 (General HRM), 提出了光路经过多个光节点和光

收稿日期: 2003-06-03

基金项目: 国家 863 计划 (863300010299)、国家自然科学基金 (69990540) 和国家 973 计划 (G2000036604) 资助项目。

作者简介: 徐志根 (1975—), 男, 江西万载人, 清华大学电子工程系博士研究生, 主要从事光通信系统和光网络方面的研究。E-mail: zhigenxu97@mails. tsinghua. edu. cn

纤线路传输段后噪声积累的数学计算模型,推导出了解析计算公式,并进行简化,给出了描述噪声积累的工程等效模型。同时分析了光节点中增益(损耗)分配对噪声功率的影响,得出了光节点的优化设计原则,为光节点和光纤传输段的设计提供参考。

1 光路的一般假设参考模型

光节点是构成 OTN 的最关键的设备,按照功能的不同,光节点分成两种:光交叉互连节点(OXC)和光分插复用节点(OADM)。图 1 和图 2 分别给出了比较完整的 OADM 和 OXC 节点设备的典型结构,它们符合 ITU-T 的相关建议以及我国的相关标准的要求,根据这些典型结构,我们设计研制出了相关的 OADM 和 OXC 设备,正式提供给“中国高速信息示范网(CAINOnet)”使用并通过了相关的工程测试。图 1 和图 2 给出了构成光节点的主要功能单元,包括:预放(PA)EDFA,功放(BA)EDFA,解复用器(DMUX),复用器(MUX),光开关阵列(Switch matrix),功率均衡(PE)和自动保护倒换(APS),省略了其他一些功能单元,如:光波长变换、光性能监控等单元,但这些不会影响其典型性和本文理论分析的普适性。

根据 ITU-T 建议 G. 873,OTN 光路的通用假设参考模型如图 3 所示。一条完整的光路是这样定义的:光信号从源(Source)出发进入 OTN,经过单信道段进入到初始节点。然后,该信号经过多个光纤段、光线路放大器(OLA)和光节点,到达目的节

点,最后经过单信道段进入接收器(Sink)。相邻节点之间的光线路放大器数目为 n ,单信道段的数目为 m ,单信道段的长度为 d' ,多信道段(即波分复用段)的长度为 d ,光路跨越的节点总数为 N 。所以,光路的总长度 $L = (N - 1)(n + 1)d + md'$ 。

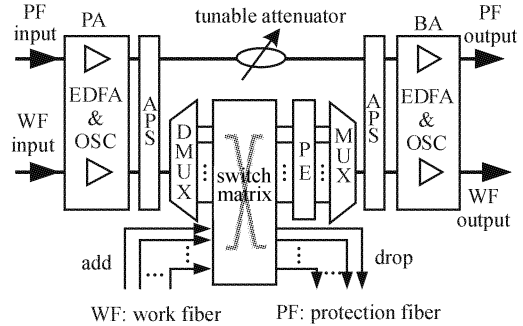


图 1 OADM 节点

Fig. 1 A typical OADM node

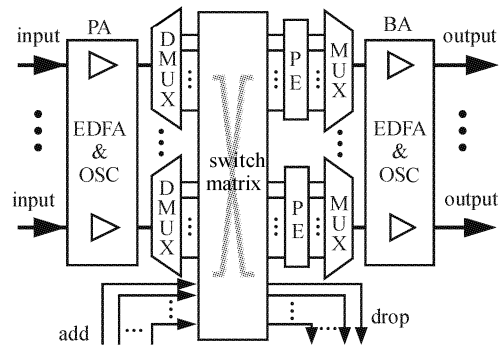


图 2 OXC 节点(带上下路功能)

Fig. 2 A typical OXC node (with add/drop functions)

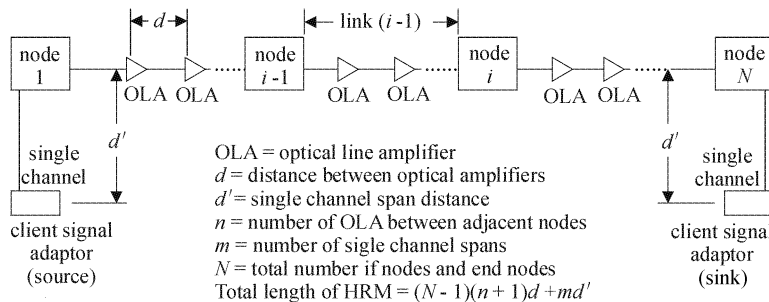


图 3 光路的假设参考模型

Fig. 3 HRM of an optical path

由于引入了光节点,使得 OTN 的光路通用假设参考模型和 ITU-T 建议 G. 692 中给出的波分复用+掺铒光纤放大器光传输线路系统的模型有根本的不同,现有的噪声计算模型也不再适用,需要根据光路的构成(特别是光节点的体系结构)和特性,分

析噪声的来源和积累,推导出相应的计算公式。

2 光路的噪声来源

OTN 中光路的噪声源主要有两类:1) 光线路放大器的放大的自发辐射噪声(ASE);2) 光节点引

人的噪声。

2.1 光线路放大器引入的噪声

光线路放大器的主要噪声是放大自发辐射噪声,在光路通带内的放大自发辐射噪声功率不能被滤除,从而叠加在信号光上,使光路光信噪比(OSNR)下降。单个光线路放大器的放大自发辐射噪声功率为^[8]

$$P_{\text{ASE}}^{(\text{OLA})} = F^{(\text{OLA})} (G^{(\text{OLA})} - 1) h\nu B_0 \quad (1)$$

其中, $F^{(\text{OLA})}$ 为光线路放大器的噪声系数, $G^{(\text{OLA})}$ 为光线路放大器的增益, $h\nu$ 为频率为 ν 的光子的能量, B_0 为光信道的带宽, 通常取 $B_0 = 5B$, B 为信号速率。

2.2 光节点引入的噪声

根据图 1 和图 2 所示的光节点结构,可以把光节点简化成图 4 所示的分析模型。其中,预放掺铒光纤放大器和功放掺铒光纤放大器都会产生放大自发辐射噪声,光节点其他单元简化成一个等效的损耗器件,不引入噪声。由于节点内部有功率均衡单元,所以光节点内部总损耗可以在一定范围内调准。

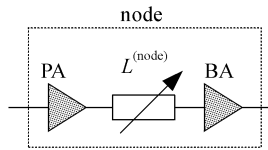


图 4 光节点分析模型

Fig. 4 Analyzing model of an optical node

假设: $L^{(\text{node})}$ 为光节点的总损耗, $G^{(\text{node})}$ 为光节点的总增益,预放和功放的噪声系数分别为 F_{PA} 和 F_{BA} ,增益分别为 G_{PA} 和 G_{BA} 。则预放和功放引入的放大自发辐射噪声功率分别为^[8]

$$\begin{aligned} N_{\text{PA}} &= F_{\text{PA}} (G_{\text{PA}} - 1) h\nu B_0 \\ N_{\text{BA}} &= F_{\text{BA}} (G_{\text{BA}} - 1) h\nu B_0 \end{aligned} \quad (2)$$

在光节点的线路输出端,该节点引入的总的放大自发辐射噪声功率为

$$P_{\text{ASE}}^{(\text{node})} = N_{\text{PA}} L^{(\text{node})} G_{\text{BA}} + N_{\text{BA}} \quad (3)$$

把公式(2)代入(3),得到节点总的放大自发辐射噪声功率的解析表达式为

$$P_{\text{ASE}}^{(\text{node})} = h\nu B_0 G^{(\text{node})} \left(\frac{G_{\text{PA}} - 1}{G_{\text{PA}}} F_{\text{PA}} + \frac{G_{\text{BA}} - 1}{G^{(\text{node})}} F_{\text{BA}} \right) \quad (4)$$

2.3 光节点的设计原则

在设计光节点时,需要考虑支持一定长度的光纤传输(如:80 km,相当于补偿 22 dB 的光纤损耗),所以一般情况下,光节点的总增益 $G^{(\text{node})} = G_{\text{PA}} L^{(\text{node})} G_{\text{BA}}$ 是一定的。从公式(4)可以看出,光节

点总的噪声功率 $P_{\text{ASE}}^{(\text{node})}$ 的大小取决于:总增益、预放和功放的噪声系数和增益分配,分析如下:

1) 当 $G^{(\text{node})}$ 一定时,一般来说 G_{PA} 和 G_{BA} 都在 100 ~ 1000 之间取值, $(G_{\text{PA}} - 1)/G_{\text{PA}} \cong 1$,因此, $P_{\text{ASE}}^{(\text{node})}$ 的变化主要取决于功放的增益配置。图 5 给出了 $P_{\text{ASE}}^{(\text{node})}$ 和功放增益的关系(功放的噪声系数 F_{BA} 从 3 dB 到 9 dB, $G^{(\text{node})}$ 取为 22 dB, F_{PA} 取为 4 dB)。

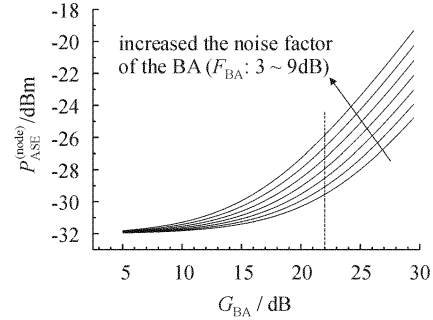


图 5 光节点中噪声功率和功放增益的关系

Fig. 5 Relation between the noise power and the gain of BA within the optical node

2) 光节点的噪声大小受其内部增益配置的影响。当 $G_{\text{BA}} \ll G^{(\text{node})}$ 时, $P_{\text{ASE}}^{(\text{node})}$ 的大小主要取决于预放的噪声系数;当 $G_{\text{BA}} \cong G^{(\text{node})}$ 时, $P_{\text{ASE}}^{(\text{node})}$ 取决于预放和功放的噪声系数;当 $G_{\text{BA}} \gg G^{(\text{node})}$ 时, $P_{\text{ASE}}^{(\text{node})}$ 取决于功放的增益和噪声系数,随着 G_{BA} 的进一步增大, $P_{\text{ASE}}^{(\text{node})}$ 会急剧地增加。

根据以上的分析,得出了光节点的设计原则,以减小光节点引入的噪声:

1) 节点内部增益分配的原则:预放掺铒光纤放大器采取较大增益,功放掺铒光纤放大器采取较小增益。

2) 掺铒光纤放大器噪声系数设计原则:预放掺铒光纤放大器采取小噪声系数的设计,功放掺铒光纤放大器的噪声系数要求可以适当放宽。

由以上分析可知,如果采取让预放掺铒光纤放大器补偿节点内部损耗,功放掺铒光纤放大器补偿光纤线路损耗的增益分配策略,会使得功放掺铒光纤放大器的噪声系数对光节点的噪声影响很大,影响光节点级联信噪比和可以级联的光节点数目。

3 光路的噪声积累模型

在图 3 所示的 OTN 光路的假设参考模型中,一条完整的光路是从源到宿的透明光信道,同时,还有其他光信道没有进行上下路,而是直接通过了所

有节点、光纤段和光线路放大器。下面分别分析完整的光路和直通光信道的噪声积累模型。

3.1 直通光信道的噪声积累模型

如图 3 所示,光节点 i 和 $i+1$ 之间的链路段 $\text{Link}(i)$ 有 n 个光线路放大器。在 $\text{Link}(i)$ 的输出端,假设:该段光线路放大器产生的噪声功率为 $P_{\text{ASE},i}^{(\text{OLA})}$,光节点 i 产生的噪声功率为 $P_{\text{ASE},i}^{(\text{node})}$,则节点 i 和 $\text{Link}(i)$ 产生的总噪声功率为

$$P_{\text{ASE},i}^{\text{total}} = P_{\text{ASE},i}^{(\text{OLA})} + P_{\text{ASE},i}^{(\text{node})} L_{i,0} \prod_{k=1}^n (L_{i,k} G_{i,k}) = \sum_{j=1}^n [P_{\text{ASE},i,j}^{(\text{OLA})} L_{i,j} \prod_{k=j+1}^n (L_{i,k} G_{i,k})] + P_{\text{ASE},i}^{(\text{node})} L_{i,0} \prod_{k=1}^n (L_{i,k} G_{i,k}) \quad (5)$$

其中, $P_{\text{ASE},i,j}^{(\text{OLA})}$ 表示 $\text{Link}(i)$ 中第 j 个光线路放大器产生的噪声功率, $L_{i,j}$ 表示第 j 个光纤段的损耗(光纤段从 0 到 n 顺序编号), $G_{i,k}$ 表示第 k 个光线路放大器的增益。

光节点 i 的增益为 $P_i^{(\text{node})} = G_{\text{PA},i} L_i^{(\text{node})} G_{\text{BA},i}$,则光节点 i 和 $\text{Link}(i)$ 的总损耗为

$$L_i^{\text{total}} = G_i^{(\text{node})} L_{i,0} \prod_{k=1}^n (L_{i,k} G_{i,k}) \quad (6)$$

在光节点 N 的线路输出端,直通光信道的总噪声功率为

$$P_{\text{ASE}}^{\text{total}} = \sum_{i=1}^{N-1} [P_{\text{ASE},i}^{\text{total}} G_N^{(\text{node})} \prod_{k=i+1}^{N-1} (L_k^{\text{total}})] + P_{\text{ASE},N}^{(\text{node})} \quad (7)$$

假设直通光信道在光节点 1 输入端的信号功率为 $P_{\text{sig}}^{\text{in}}$,则在光节点 N 的线路输出端的信号功率为

$$P_{\text{sig}}^{\text{out}} = P_{\text{sig}}^{\text{in}} G_N^{(\text{node})} \prod_{i=1}^{N-1} (L_i^{\text{total}}) \quad (8)$$

根据公式(7)和(8),可以计算出直通光信道的信噪比: $\text{OSNR} = P_{\text{sig}}^{\text{out}} / P_{\text{ASE}}^{\text{total}}$ 。

3.2 OTN 光路的噪声积累模型

根据图 1 和图 2 的光节点结构,参照文献[9]中的图示方法,给出了细化的光路模型,如图 6 所示。光路在光节点 1 上路(TX 端),在光节点 N 下路

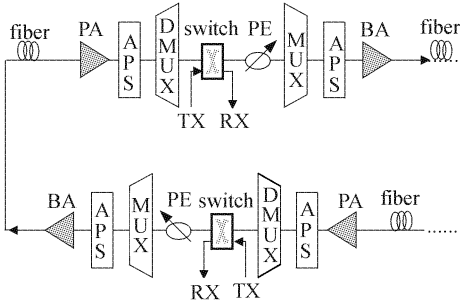


图 6 细化的光路模型

Fig. 6 A detailed optical path model

(RX 端)。

在下面的推导中, $L_{\text{APS},i}$, $L_{\text{DMUX},i}$, $L_{\text{MUX},i}$, L_{PE} 和 $L_{\text{switch},i}$ 分别代表光节点 i 的 APS, DMUX, MUX, PE 和光开关单元对光路的损耗, i 的取值范围为 $1 \sim N$ 。

在下路 RX 端,光路的总噪声功率为

$$P_{\text{ASE}}^{\text{RX}} = \left\{ \sum_{k=1}^n [P_{\text{ASE},1,k}^{(\text{OLA})} L_{1,k} \prod_{j=k+1}^n (G_{1,j} L_{1,j})] \prod_{k=2}^{N-1} (L_k^{\text{total}}) + \sum_{i=2}^{N-1} [P_{\text{ASE},i}^{\text{total}} \prod_{k=i+1}^{N-1} (L_k^{\text{total}})] \right\} \times G_{\text{PA},N} L_{\text{APS},N} L_{\text{DMUX},N} L_{\text{switch},N} + N_{\text{PA},N} L_{\text{APS},N} L_{\text{DMUX},N} L_{\text{switch},N} + N_{\text{BA},1} \left(\prod_{i=1}^{N-1} L_i^{\text{total}} \right) \frac{G_{\text{PA},N} L_{\text{APS},N} L_{\text{DMUX},N} L_{\text{switch},N}}{G_1^{(\text{node})}} \quad (9)$$

假设上路 TX 端信号光功率为 $P_{\text{sig}}^{\text{TX}}$,那么经过了整个光路之后,在下路 RX 端信号光功率为

$$P_{\text{sig}}^{\text{RX}} = P_{\text{sig}}^{\text{TX}} \left(\prod_{i=1}^{N-1} L_i^{\text{total}} \right) \frac{G_{\text{PA},N} L_{\text{APS},N} L_{\text{DMUX},N} L_{\text{switch},N}}{L_{\text{DMUX},1} L_{\text{APS},1} G_{\text{PA},1}} \quad (10)$$

根据公式(9)和(10),可以计算出光路的信噪比: $\text{OSNR} = P_{\text{sig}}^{\text{RX}} / P_{\text{ASE}}^{\text{RX}}$ 。

4 噪声积累的简化模型

4.1 采用节点隔离原理的光路噪声积累模型

式(7)~(10)分别给出了直通光信道和上下光路的噪声积累解析公式,比较复杂。在节点隔离原理的条件下[9],公式可以适当简化。假设:光节点 i 的总增益 $G_i^{(\text{node})}$ 正好补偿输出侧一个光纤段的损耗 $L_{i,0}$, $\text{Link}(i)$ 中第 j 个光线路放大器的增益 $G_{i,j}$ 正好补偿其输出侧一个光纤段的损耗 $L_{i,j}$ 。那么,节点隔离原理为: $G_i^{(\text{node})} L_{i,0} = 1$; $G_{i,j} L_{i,j} = 1$ ($1 \leq i \leq N$, $1 \leq j \leq n$)。

此时,式(7)~(10)可以分别简化为

$$P_{\text{ASE}}^{\text{total}} = \sum_{i=1}^{N-1} \left[\sum_{j=1}^n (P_{\text{ASE},i,j}^{(\text{OLA})} L_{i,j}) + P_{\text{ASE},i}^{(\text{node})} L_{i,0} \right] G_N^{(\text{node})} + P_{\text{ASE},N}^{(\text{node})} \quad (11)$$

$$P_{\text{sig}}^{\text{out}} = P_{\text{sig}}^{\text{in}} P_N^{(\text{node})} \quad (12)$$

$$P_{\text{ASE}}^{\text{RX}} = \left\{ \sum_{k=1}^n (P_{\text{ASE},1,k}^{(\text{OLA})} L_{1,k}) + \sum_{i=2}^{N-1} \left[\sum_{j=1}^n (P_{\text{ASE},i,j}^{(\text{OLA})} L_{i,j}) + P_{\text{ASE},i}^{(\text{node})} L_{i,0} \right] \right\} \times G_{\text{PA},N} L_{\text{APS},N} L_{\text{DMUX},N} L_{\text{switch},N} + N_{\text{PA},N} L_{\text{APS},N} L_{\text{DMUX},N} L_{\text{switch},N} + N_{\text{BA},1} G_{\text{PA},N} L_{\text{APS},N} L_{\text{DMUX},N} L_{\text{switch},N} \frac{1}{G_1^{(\text{node})}} \quad (13)$$

$$P_{\text{sig}}^{\text{RX}} = P_{\text{sig}}^{\text{TX}} \frac{G_{\text{PA},N} L_{\text{APS},N} L_{\text{DMUX},N} L_{\text{switch},N}}{L_{\text{DMUX},1} L_{\text{APS},1} G_{\text{PA},1}} \quad (14)$$

4.2 光路噪声积累的工程等效模型

光传送网设计时,需要对光路的噪声积累进行计算,以确保网络的性能和规模。假设:1) 光路经过的所有光节点、光线路放大器和光纤段都是完全相同的;2) 满足节点隔离原理的条件。在以上假设的前提下,可以算出一条光路在经过一定数目的相

同节点和光纤传输链路之后的光信噪比。反之,光路的下路端(信宿)如果有一定的光信噪比要求,可以反推出该光路最多能跨越的节点数目和光线链路数目。在此把这种简化的模型称为光路噪声积累的工程等效模型。

此时,式(11)~(14)可以进一步简化为(假设:光纤段的损耗均为 L)

$$\begin{aligned} P_{\text{ASE}}^{\text{total}} &= (N-1)nP_{\text{ASE}}^{\text{(OLA)}} + NP_{\text{ASE}}^{\text{(node)}} = \\ & (N-1)nh\nu B_0 F^{\text{(OLA)}} (G^{\text{(OLA)}} - 1) + Nh\nu B_0 G^{\text{(node)}} \left(\frac{G_{\text{PA}} - 1}{G_{\text{PA}}} F_{\text{PA}} + \frac{G_{\text{BA}} - 1}{G^{\text{(node)}}} F_{\text{BA}} \right) \\ & \cong \frac{h\nu B_0}{L} [(N-1)nF^{\text{(OLA)}} + N(F_{\text{PA}} + G_{\text{BA}} L F_{\text{BA}})] \end{aligned} \quad (15)$$

$$P_{\text{sig}}^{\text{out}} = P_{\text{sig}}^{\text{in}} / L \quad (16)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{ASE}}^{\text{RX}} &= [(N-1)nP_{\text{ASE}}^{\text{(OLA)}} + (N-2)P_{\text{ASE}}^{\text{(node)}}] L G_{\text{PA}} L_{\text{APS}} L_{\text{DMUX}} L_{\text{switch}} + (N_{\text{PA}} + N_{\text{BA}} L G_{\text{PA}}) L_{\text{APS}} L_{\text{DMUX}} L_{\text{switch}} \cong \\ & [(N-1)nF^{\text{(OLA)}} + (N-2)(F_{\text{PA}} + G_{\text{BA}} L F_{\text{BA}}) + F_{\text{PA}}/L + F_{\text{BA}} G_{\text{BA}}] \times \\ & h\nu B_0 L G_{\text{PA}} L_{\text{APS}} L_{\text{DMUX}} L_{\text{switch}} \end{aligned} \quad (17)$$

$$P_{\text{sig}}^{\text{RX}} = P_{\text{sig}}^{\text{TX}} L_{\text{switch}} \quad (18)$$

从上面推导可得到直通光信道的光信噪比解析公式

$$\text{OSNR}_{\text{pass}} = \frac{P_{\text{sig}}^{\text{out}}}{P_{\text{ASE}}^{\text{total}}} = \frac{P_{\text{sig}}^{\text{in}}}{h\nu B_0 [(N-1)nF^{\text{(OLA)}} + N(F_{\text{PA}} + G_{\text{BA}} L F_{\text{BA}})]} \quad (19)$$

光路的光信噪比解析公式为

$$\text{OSNR}_{\text{optical path}} = \frac{P_{\text{sig}}^{\text{RX}}}{P_{\text{ASE}}^{\text{RX}}} = \frac{P_{\text{sig}}^{\text{TX}} / (h\nu B_0 L G_{\text{PA}} L_{\text{APS}} L_{\text{DMUX}})}{(N-1)nF^{\text{(OLA)}} + (N-2)(F_{\text{PA}} + G_{\text{BA}} L F_{\text{BA}}) + F_{\text{PA}}/L + F_{\text{BA}} G_{\text{BA}}} \quad (20)$$

式(19)和(20)可以很方便地以分贝表示。

5 结 论

通过分析,得出了光节点的设计原则,并推导了光路噪声积累的工程等效模型。在未来的光节点中,可能会有其他的噪声源(例如:全光波长转换器),需要在节点噪声模型中加入相关的项,再用本文提出的光路噪声积累模型进行计算。此外,如果要进一步研究光路的噪声光谱,需要考虑光路中的滤波器的特性^[10]。

参 考 文 献

- 1 B. Mukherjee. WDM optical communication networks: progress and challenges [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, **18**(10):1810~1824
- 2 Paul Green. Progress in optical networking [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2001, (1):54~61
- 3 ITU-T Recommendation G. 873 (1998): Optical Transport Network Requirements
- 4 R. Isabelle, G. Salim, G. Josselyne *et al.*. Chirped fiber Bragg

- gratings for WDM chromatic dispersion compensation in multispan 10-Gb/s transmission [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1999, **5**(5):1312~1324
- 5 Yunfeng Shen, Kejie Lu, Wanyi Gu. Coherent and incoherent crosstalk in WDM optical networks [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(5):759~764
- 6 Xiang Chu, F. Young James. Wavelength shift keying technique to reduce four-wave mixing crosstalk in WDM [C]. *Processings 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
- 7 Dai Wuju, Zhang Hanyi, He Yongqi. Estimation of optical signal-to-noise ratio and system design in all-optical network [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(12):1095~1098
- 戴无惧,张汉一,何永琪. 全光网中的光信噪比估算与系统设计 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(12):1095~1098
- 8 C. R. Giles, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2):271~283
- 9 J. Zhou, M. J. O'Mahony. Power management system design of an optical multiwavelength transport network [C]. *IEE. Proc. Optoelectron.*, 1996, **143**(3):178~188
- 10 Zhao Wei, Zheng Xiaoping, Zhang Hanyi. Study on filter performance of MUX/DEMUX [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9):1084~1087
- 赵伟,郑小平,张汉一等. 复用器/解复用器滤波特性研究 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(9):1084~1087