

WDM 系统中光信噪比的分析

王健全 王东昱 张民 顾晓仪

(北京邮电大学光通信中心)

摘要: 本文详细分析了在 WDM 系统中, 四波混频 (FWM) 和节点内部损耗 (主要是 EDFA) 影响信道中信号的光信噪比 (OSNR) 的原因, 同时给出了计算 FWM 影响 OSNR 的等价分析模型——联立方程的分析方法, EDFA 对 OSNR 的影响则给出了其求解 OSNR 的综合表达式, 并且给出了相应的模拟结果。利用本文给出的 FWM 和 EDFA 对 OSNR 影响的分析方法, 可以对 WDM 光网络规模 (长度、节点数和跳数) 进行规划和设计, 同时也可以对特定的光网络进行性能的模拟和分析。

1 引言

当前, 随着光纤通信的飞速发展, 从骨干网、城域网甚至局域网都采用全光的传输和交换的方式。由于光纤传输的损耗、色散以及各种效应的影响, 以及节点对光信噪比 (OSNR) 的影响, 使得信号的传输距离和经过的节点受到了一定的限制。特别是对于跨网业务的传输, 传输到接收端时, 其光信噪比可能会降到阈值之下而导致信号传输的失效, 为此分析光纤中各种效应和节点内部损耗对光信噪比的影响对于 WDM 光网络的模拟、规划和设计具有指导性的意义。本文就是就该问题提出分析影响全光网中光信噪比因素的具体方法, 并着重分析了 WDM 系统下, 四波混频 (FWM) 效应对 OSNR 的影响, 以及节点中光放大器对 OSNR 的影响, 并给出了相应的分析模型和模拟的结果。

2 光纤的非线性

2.1 WDM 系统中的非线性效应

为深入了解与分析 WDM 系统中非线性效应对系统的影响, 我们仍从非线性薛定谔方程入手进行分析。对于单信道和双信道的薛定谔方程我们已经熟知[1], 借助于光纤中光子的相互作用以及麦克斯维方程分析 WDM 系统中各信道之间的相互作用, 由于信道之间的非线性相互作用的大小与信道之间的间隔直接相关, 信道之间的距离增大, 信道之间的相互作用就相应减弱, 所以下面仅仅考虑相邻信道之间的相互作用, 见方程 (1):

$$\frac{\partial}{\partial z} A_i + \frac{\alpha}{2} A_i + \beta_{11} \frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{j}{2} \beta_{12} \frac{\partial^2 A_i}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_{13} \frac{\partial^3 A_i}{\partial t^3} = j\gamma \left[|A_i|^2 + 2f(L_w, L_{eff}) (|A_{i-1}|^2 + |A_{i+1}|^2) \right]$$

$i \in \{1 \dots N\}$ (1)

其中:

$$f(L_w, L_{eff}) = \frac{(L_{eff})^2}{L_{NL} \cdot L_w}, \quad L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha}, \quad L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0}, \quad L_w = \frac{T_0}{|d|}, \quad \alpha \text{ 为衰减}$$

系数。可以看出方程组 (1) 中仅仅考虑了 SPM 和 XPM 的作用, 并未包括 FWM 效应的影响。

2.2 FWM 对 OSNR 的影响

由于现有的波分复用系统相邻信道之间均为等间距, 所以中间波长涉及到的四波混频效应的分析十分复杂, 所以对其单独进行考虑, 下面具体地分析其性能。

设信道复用数为 N , 仅考虑相邻信道之间的影响, 信道之间的功率差可以忽略不计, 即设入纤端功率已均衡得非常好。

由于四波混频效应产生的新频率可以表示为: $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$, 且 $(i \neq k, j \neq k)$, 又因为信道之间等间距, 所以由于 FWM 效应产生的新的频率中, 有很多与原有信道相重合, 由此而造成了对 WDM 信道的同频串扰, 使得信道中的信号 OSNR 恶化。

由上面假设可以推知 $1 \sim N$ 个等间距信道对应一步长为 1 的等差数列 $\{i\}$, $1 \leq i \leq N$, 所以最后由于四波混频造成对系统影响, 即形成同频串扰的新频率对应上述数列的项数符合以下条件:

$$m = i + j - k, \quad m \in \{1 \cdots N\}, \quad \text{且有 } (i \neq k, j \neq k)$$

若记满足以上条件的 m 的组数为 n_m , 即 $n_m = \prod_{\substack{m=i+j-k \\ m \in \{1 \cdots N\} \\ (i \neq k, j \neq k)}} 1$ 经分析知, 能产生 m 的对应

的 FWM 组合项数有以下几种情况:

$\{m-1, m-1, m-2\}$, $\{m-1, m, m+1\}$, $\{m+1, m+1, m+2\}$, $\{m-1, m-2, m-3\}$, $\{m+1, m+2, m+3\}$, 所以可以得出以下表达式: (要求 $N > 3$)

$$n_m = \begin{cases} 2 & m = 1, N \\ 3 & m = 2, N-1 \\ 4 & m = 3, N-2 \\ 5 & m = 4 \cdots N-3 \end{cases} \quad (2)$$

从以上分析可以得知, WDM 系统中, FWM 的影响相对复杂, 中间信道受 FWM 影响最大, 两边其次。

若考虑所有信道之间的相互影响, 则情况更为复杂, 对于 8 波系统由于四波混频效应产生的有重复的新频率就有 $C_8^3 C_3^2 + C_8^2 = 196$ 种, 16 波系统的对应有 1800 种, N 个信道对应 $C_N^3 C_3^2 + C_N^2$, 而且各种不同信道产生效应影响的作用和力度不同, 所以给分析带来很大的不便。由于走离效应和相位匹配的缘故, 不相邻信道之间的四波混频效应的影响远远小于相邻信道所产生的影响。所以仅考虑相邻信道之间的四波混频效应造成的误差不大。

对 8 波等间距波分复用系统而言, 仅考虑相邻信道之间的相互影响时, 由于四波混频效应一共可产生可重复频率 $(8-1) \times 2 + (8-2) \times C_3^1 = 32$ 种, 可对有用信道造成同频串扰的总共有 $2(2+3+4+5)=28$ 种。对 16 波而言, 由于四波混频效应一共可产生可重复频率 $(16-1) \times 2 + (16-2) \times C_3^1 = 72$ 种, 可对有用信道造成同频串扰的总共有 $2(2+3+4) + 10 \times 2 = 38$ 种, 对 N 个信道的系统而言, 考虑相邻信道影响时一共可产生可重复频率 $2(N-1) + (N-2)C_3^1$ 种, 对有用信道造成的同频串扰项为 $18 + 2(N-6)$ 种。

我们已经知道信道之间的间距的大小直接影响了四波混频的相位匹配, 间距小, FWM 效应就明显, 反之, 间距大, FWM 效应就比较弱。一般而言, 若 $\Omega_s \geq 200\text{GHz}$, 四波混频效应的影响都非常小, 即不会造成系统性能的严重恶化, 可以忽略不计。

详细地分析了 FWM 效应对参考信道的影响之后, 可以将 FWM 项视作对参考信道的同频串扰, 即作为噪声来处理。所以 FWM 项与参考信道的分析应该用联立的方程组来分析, 因为一个方程难以将其同频串扰表示出来。

$$\begin{cases} \frac{dP_m(z)}{dz} + \alpha P_m(z) + \frac{L_{\text{opt}} L_F}{L_{\text{eff}} L_{\text{NL}}} P_m(z) = 0 \\ P_m(0) = p_0 \\ \frac{dP'_m(z)}{dz} + \alpha P'_m(z) - \frac{L_{\text{opt}} L_F}{L_{\text{eff}} L_{\text{NL}}} P'_m(z) = 0 \\ P'_m(0) = 0 \\ N_m(z) = n_m P'_m(z) \end{cases} \dots\dots\dots(3)$$

其中 $P'_m(z)$ 为等价的 FWM 项, 信噪比可以由下式表示: $\frac{S}{N} = \frac{P_m(z)}{N_m(z)}$ (4)

利用方程组 3, 就可以等价地分析 FWM 效应对参考信道 OSNR 的影响。

3 节点对 OSNR 的影响

3.1 原理分析

我们已经知道, 光信号的传输限制主要有以下几个方面: 光信噪比限制、色散限制以及非线性效应限制。其中色散限制、非线性效应限制完全是由于光纤造成的, 通过合理的色散管理、功率密度控制可以将其影响降至最小, 与 OXC、OADM 设备内部基本无关。而光信噪比限制则与节点内部插入损耗密切相关。每经过一个节点, 光信号的信噪比都会造成一定的损失。下面对节点内部对信号造成的损伤作一简单的分析。

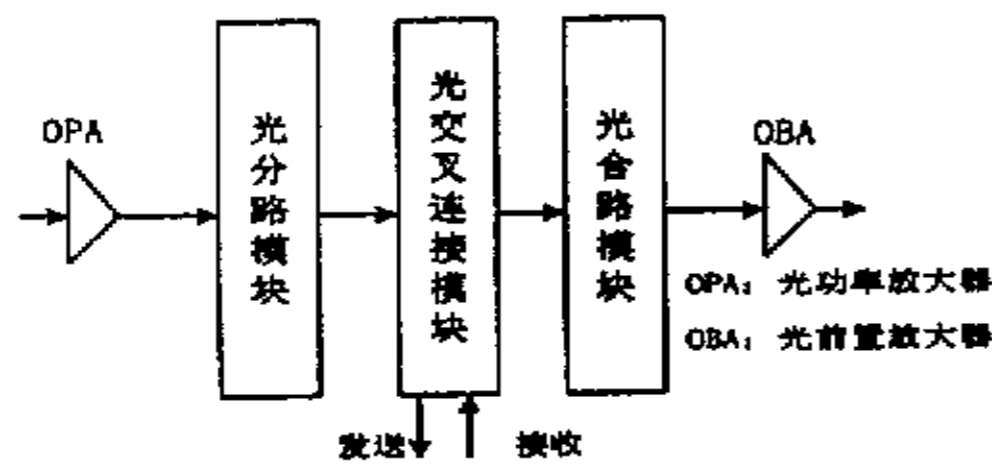


图 1 OXC 简单功能示例图

以 OXC 节点为例, 如图 1 所示: 光信号经过 OXC 节点时, 其必经的器件有光放大器(功放和预放)、分波器和合波器、光开关、分路性器件。这些器件的插入损耗均会造成信号的损伤, 此外光放大器将不可避免地会引入噪声, 分波器的滤波带宽受限也会

使信号损伤,光开关和合波器还可能产生信号之间的串扰。这些都将使 OSNR 恶化。以图 2 为例,对经过 n 节点的信号的 OSNR 作简单分析。

为分析的方便,仅仅考虑对 OSNR 影响最严重的因素,即 EDFA 的 ASE 噪声对系信噪比的影响。假设系统已采用了功率均衡机制,即各路信号之间的功率差可以忽略不计,而且每个光放大器的输入和输出均分别相同,在此假设下,系统的光信噪比(OSNR)可用下式表示:

$$OSNR = P_{OUT-1} - 10 \text{ Log} (h \nu \Delta \nu_o) - 10 \log \left\{ \sum_i 10^{0.1NF_i} (G_i - 1) \prod_{j=i}^{N-1} \frac{1}{G_{j+1} L_j} \right\} \quad (6)$$

其中: P_{OUT-1} 是第一级 EDFA 的单通道输出光功率 (dBm), G_i 为第 i 级 EDFA 的增益, L_j 为第 j 级 EDFA 输出与第 j+1 级 EDFA 输入之间的衰减,光滤波器的带宽为 $\Delta \nu_o$, h 是普朗常数, ν 是光频率, NF_i 为第 i 级 EDFA 的噪声指数。一般取 $\Delta \nu_o$ 为 0.1nm,所以上式中的第二项为 -58dB。因为复用段功率均衡的作用,后级的 EDFA 正好抵消掉前面线路的衰减,即 $G_{i+1}L_i=1$,所以上式可简化为:

$$OSNR = P_{OUT-1} + 58 - 10 \log \left[\sum_i 10^{0.1NF_i} (G_i - 1) \right] \quad (7)$$

根据上述公式,我们得到光信噪比与 OXC 内部损耗及经过 OXC 节点数量的关系曲线(取 $P_{OUT}=0\text{dBm}$, $NF_i=5.5\text{dB}$)。

3.2 模拟

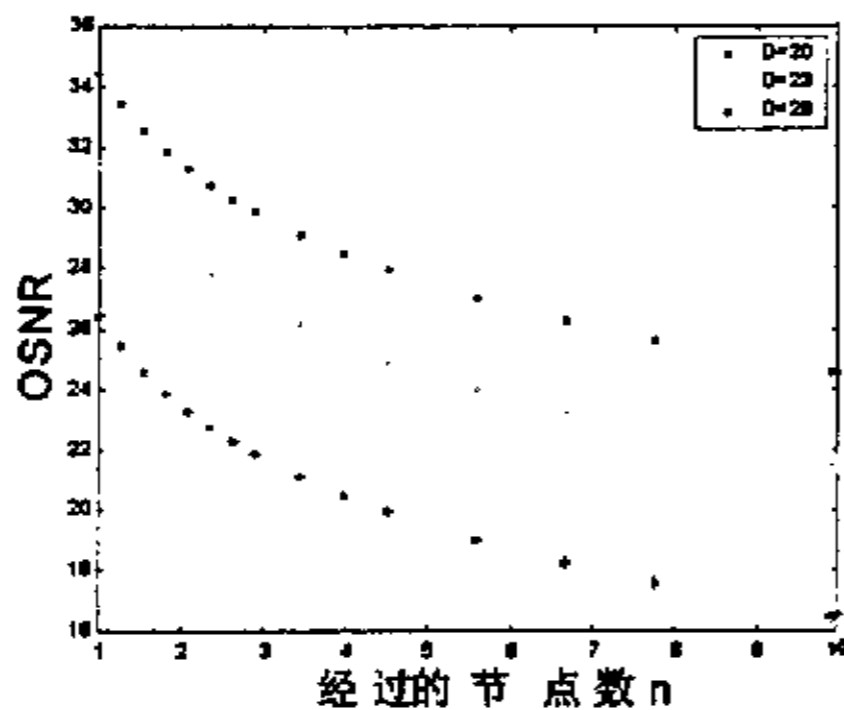


图 2 OSNR 与其经过的节点数的关系曲线

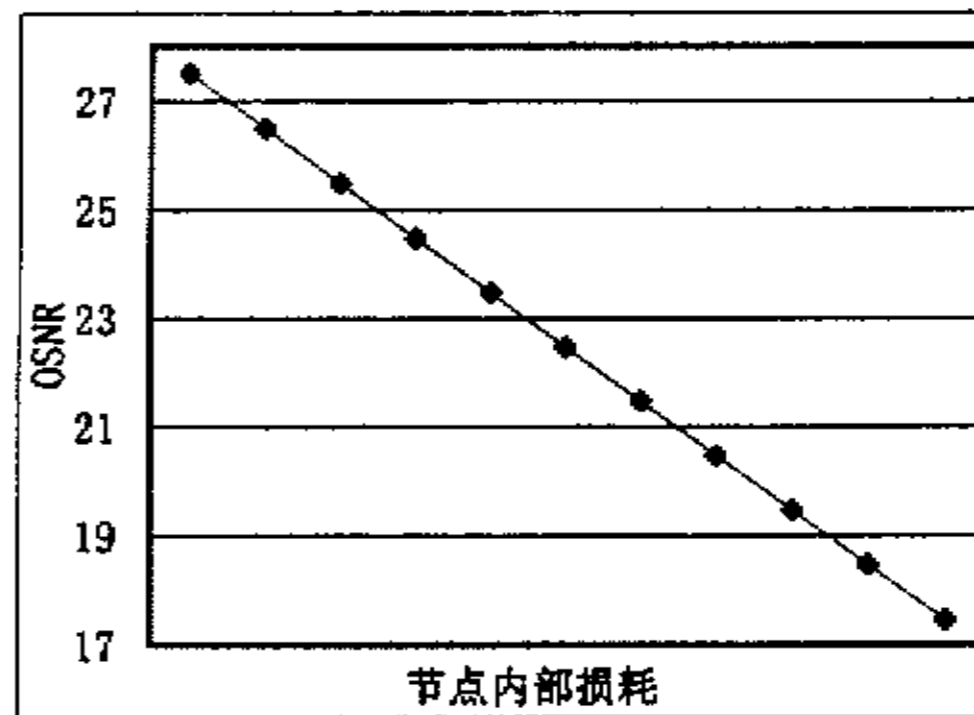


图 3 OSNR 与节点内部损耗的关系曲线 (内部损耗从 20dB 到 30dB) n=5

从图 2 和图 3 不难看出,在经过的节点数一定的情况下,节点内部的损耗的增加对信噪比的影响是很大的。当节点内部损耗一定时,光信噪比随经过的节点数呈线性的变化。当节点的内部损耗大于 25dB 时,光信号经过几个节点其信噪比就降到了域值之下(一般为 22dB)。所以在网络的设计和规划时必须结合节点内部损耗来确定网络的规模。

4 结论

从上面的分析可以得知,非线性效应中的四波混频(FWM)效应和节点内部损耗中对 OSNR 的影响最为严重。这主要是由于在等间距的 WDM 系统中,FWM 效应产生的新的频率成分有很大一部分与系统中信号所在频率相重合,这就相当于产生了对有用

信号的同频串扰,使得所在信道的 OSNR 急剧恶化。而 EDFA 对 OSNR 的影响是由于 EDFA 引入了自发辐射噪声 (ASE),而且由于每一个节点都有两个 EDFA,所以节点内部损耗对 OSNR 的影响也是相当严重的。本文给出的分析 FWM 影响 OSNR 的等价分析模型——联立方程组,对于 EDFA 对 OSNR 的影响则给出了其求解 OSNR 的综合表达式,并且给出了模拟结果。这些分析 OSNR 的方法将有助于 WDM 光网络的规划和设计,同时也可以对特定的光网络进行性能模拟和分析。

参考文献

- [1] 《NONLINER FIBER OPTICS》Second Edition, Govind P.Agrawal, The institute of optics University of Rochester, New York.
- [2] “WDM Systems with Unequally Spaced Channels”, Fabrizio Forghieri, Member,IEEE, R. W. Tkach, Member,IEEE, and A.R. Chraplyvy. Journal of Light Technology, Vol.13. No. 5. May 1995.

通信地址:北京邮电大学光通信中心 128 信箱

E-mail: wangjianquan@263.net

电话: 62283383 传真: 62283728 邮编: 100876

作者: [王健全](#), [王东昱](#), [张民](#), [顾晓仪](#)
作者单位: [北京邮电大学光通信中心](#)

本文读者也读过(10条)

1. [荣莉](#) 波分复用光纤通信中的应用[会议论文]-2001
2. [饶敏](#), [孙小嵩](#), [张明德](#), [丁东](#) WDM网络中同频串扰的研究[会议论文]-2001
3. [刘昆](#), [宁鼎](#), [吴少波](#) 保偏光纤模场直径测量技术研究[会议论文]-2001
4. [娄采云](#), [高以智](#), [姚敏玉](#), [霍力](#), [张剑锋](#), [李智红](#), [董毅](#), [谢世钟](#) 用光电振荡器提取时钟实现4×10Gbit/sOTDM信号165km传输[会议论文]-2001
5. [刘继红](#), [姚英](#), [陆蓉](#) WDM光传送网中的关键技术研究[期刊论文]-西安邮电学院学报2002, 7(1)
6. [李欣](#), [陈建平](#), [尚颖](#), [阎敏辉](#), [陈俊峰](#), [李建国](#), [姜文宁](#) 采用多组共享光缓存的光分组交换节点性能分析[会议论文]-2001
7. [黄方平](#) 光纤初次涂层模量测试方法[会议论文]-2001
8. [马晓东](#) 具有功率均衡功能的WDM的分析与研制[学位论文]2003
9. [雷非](#), [湛谦](#), [谭本明](#) 波分复用系统的光信噪比与代价[会议论文]-2009
10. [杨建军](#) 河南移动IP over WDM测试研究及现网试验工程[学位论文]2008

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_3307453.aspx