

文章编号 : 0253-2239(2002)09-1084-04

复用器/解复用器滤波特性研究*

赵 伟 郑小平 张汉一

(清华大学电子工程系 , 北京 100084)

提要 : 研究了复用器/解复用器(MUX/DEMUX)滤波特性对光网络系统的影响。考虑了滤波器的带通特性 , 在噪声为高斯分布的前提下 , 分析了光网络节点对传输速率为 10 Gbit/s 的光信号的影响。结果表明 , 光网络节点传输函数中央平坦区域的微小抖动(0.2 dB ~ 0.5 dB) , 引起系统性能的严重恶化 , 最坏情况下功率代价增加 2 dB ~ 6 dB , 并且中央区域凹陷个数不同 , 对系统性能的影响也不同 , 引起功率代价的差别达到 1 dB ~ 5 dB。

关键词 : 复用器/解复用器 ; 光网络 ; 高斯分布噪声
中图分类号 : TN929.1 文献标识码 : A

1 引 言

目前的波分复用光网络架构在全光器件的基础上。干线上信号的交换和分插复用 , 完全在光域上完成。光分插复用以及光交叉连接设备 , 都离不开对单波长的操作 , 因而解复用器/复用器就成了这些设备中必不可少的关键器件。

串扰是复用器/解复用器的一个重要参数。已经有文章报道对复用器/解复用器信道之间的串扰进行研究^[1-2] , 从相干和非相干角度作出了分析^[3-5]。复用器/解复用器的另一个重要参数是其滤波特性上的缺陷 , 例如 , 边带抑制在相隔一定频率间隔后 , 就不再是剧烈衰减而是要趋于定值 ; 在通带顶部也并非平坦 , 会出现一些抖动或是凹陷等等。这些缺陷不可避免的会对信号造成损伤。

本文综合考虑了复用器/解复用器的幅度与相位特性 , 从理论上对光网络节点的传输函数进行构造 , 分析了光节点对传输信号的作用 , 得到了复用器/解复用器滤波特性对系统的影响。

2 理论分析

光交叉连接与光分插复用设备的典型结构如图 1 所示。光节点中包含了掺铒光纤放大器、解复用/复用器、用于光交叉连接(OXC)或光动态上下路

(OADM) 的一组光开关。图 1 中略去了其它功能模块 , 如功率均衡、光分插复用设备可能的保护倒换等。根据现有构成光节点器件的性能 , 考虑到其中对性能影响最大的复用/解复用器件 , 光交叉连接/光分插复用设备可以简化为图 2 所示结构。

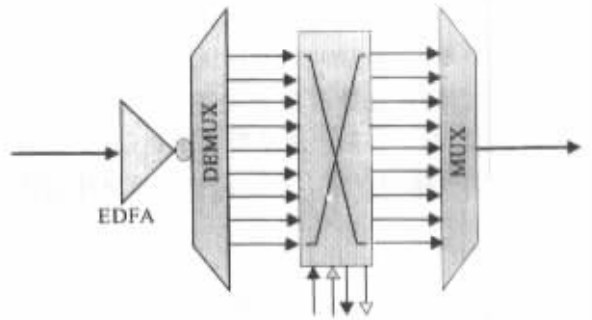


Fig. 1 Structure of conventional OXC/OADM

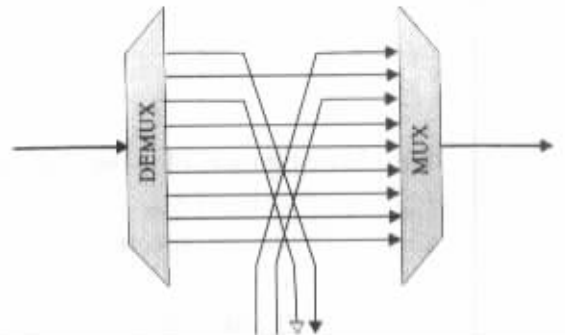


Fig. 2 Simplified schematic diagram of OXC/OADM

假设各个光波长的总输入电场分量为 :

$$E(t) = \sum_{n=0}^{N-1} P_n^{1/2} m_n(t) \cos(2\pi f_n t + \Phi_n), \quad (1)$$

$m_n(t)$ 为随时间随机变化的信号序列 , f_n 为各个光信道的频率 , $f_n = f_0 + nD$, D 为信道间隔 , P_n 为各

* 国家自然科学基金(69990540) , 863 高科技项目、骨干教师资助项目。

E-mail zhaowei00@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期 2001-04-04 ; 收到修改稿日期 2001-09-10

个光信道的输入功率, ϕ_n 为每个信道的随机相位, N 为光信道的数目。光网络节点的传输函数为:

$$H(f) = |H(f)| \exp[j\phi(f)], \quad (2)$$

经过光网络节点后电场分量的总响应为:

$$E_s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} E'(f)H(f) \exp(-2\pi i f t) df$$

式中, $E'(f)$ 为 $E(t)$ 的傅里叶变换。总电场的振幅可以表示成:

$$r(t) = |E_s(t)| = \left| \sum_{n=0}^{N-1} m_n(t) A_n \exp(i\phi_n) \right|. \quad (3)$$

考虑非相干噪声[忽略传输函数的相频特性 $\phi(f)$], (3) 式中 A_n 为每个光信道的幅值响应, A_n 为^[6]:

$$A_n = P_n^{1/2} \left| T_n \int_{-\infty}^{+\infty} |H(f)| \sin[\pi T_n(f + f_n)] \exp(2\pi i f t_d) df \right|, \quad (4)$$

t_d 为信号判决时间, 不失一般性可以取为零; $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$; $T_n = B_n^{-1}$, B_n 为比特率。因此:

$$A_n = P_n^{1/2} \left| B_n^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} |H(f)| \sin[\pi(f + f_0 + nD)/B_n] df \right|. \quad (5)$$

设噪声为高斯分布, 可得功率代价与非相干串扰之间的关系式为^[7]:

$$P_{nc} = -5 \lg \left[1 - 4q^2 \left(\sum_{n=1}^N 10^{C_n/10} \right) \right], \quad (6)$$

$$\text{式中 } q = 5.9 \text{ 而 } C_n = 10 \lg \left(\frac{A_n}{A_0} \right) = 10 \lg \left\{ \frac{P_n^{1/2} \left| B_n^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} |H(f)| \sin[\pi(f + f_n)/B_n] df \right|}{P_0^{1/2} \left| B_0^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} |H(f)| \sin[\pi(f + f_0)/B_0] df \right|} \right\}. \quad (7)$$

综合幅频与相频特性, 考虑信号光与噪声相干的情况, 此时“1”码和“0”码的功率分别为:

$$I'_0 = [r_0(t) < I_D] = \{ B_n^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} |H(f)| \sin[\pi(f + f_n)/B_n] \exp(j2\pi f t) df < I_D \}, \quad (9)$$

$$I'_1 = [r_0(t) > I_D] = \{ B_n^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} |H(f)| \sin[\pi(f + f_n)/B_n] \exp(j2\pi f t) df > I_D \}, \quad (10)$$

在高斯分布前提下, 相干噪声功率为:

$$\text{Noise} = \delta'_0 + \delta'_1 = \sum_{n \neq 0} r_n(t) = \sum_{n \neq 0} \int_{-\infty}^{+\infty} B_n^{-1} |H(f)| \sin[\pi(f + f_n)/B_n] \exp(j2\pi f t) df. \quad (11)$$

定义“0”码及噪声与“1”码功率的比为:

$$y = I'_0 / I'_1, \quad x = \text{Noise} / I'_1, \quad (12)$$

由此可得功率代价与相干噪声的关系式:

$$P_c = 10 \lg(I'/I) = 10 \lg[(1 - y - qx)^{-1}]. \quad (13)$$

考虑到光交叉连接/光分插复用设备中同时存在上述两种噪声, 且各自统计独立, 因而光交叉连接/光分插复用设备引起的总的性能恶化可表示为:

$$P = -5 \lg \left[1 - 4q^2 \left(\sum_{n=1}^N 10^{C_n/10} \right) \right] + 10 \lg[(1 - y - qx)^{-1}]. \quad (14)$$

3 结果与分析

构成光交叉连接/光分插复用设备节点的复用

器/解复用器主要为薄膜型多腔法布里-珀罗、波导阵列光栅(AWG)等, 它们的振幅与相位特性满足希尔伯特变换, 即最小相位滤波器。假设函数为,

$$H(f) = |H(f)| \exp[j\phi_{\min}(f)],$$

则有^[8]:

$$\phi_{\min}(f) = \frac{f}{\pi} \left[\text{P.V.} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\ln |H(F)|}{F^2 - f^2} dF \right], \quad (15)$$

式中 P.V. 代表柯西积分。图 3 为一个实际的复用器/解复用器的传输函数曲线, 据此, 曲线中央区域传输函数选用:

$$|H(f)| = (\eta/2) \{ \cos[\omega f + (n-1)\pi] - 1 \} + 1, \quad (16)$$

其他区域:

$$|H(f)| = \exp(-f^2/g). \quad (17)$$

对于这两种函数(超高斯和正弦)的交点,满足零阶连续。表达式(16)式、(17)式中,已知量为缺陷的幅值 η 、缺陷中尖峰的个数 n 、传输函数的3 dB 带宽 $B_{3\text{ dB}}$ 。得到

$$g = (B_{3\text{ dB}}/2)^4 \times \frac{1}{\ln 2}, \quad (18)$$

$$b = \sqrt[4]{-\ln(1 - \eta/2) \times g}, \quad (19)$$

$$w = (n - 1/2)\pi/b. \quad (20)$$

图 3 所示缺陷的尖峰个数为 3。

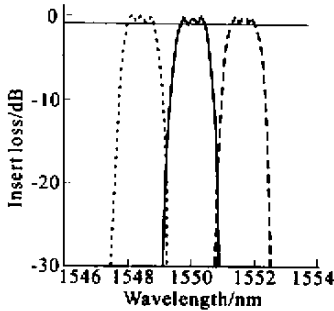


Fig.3 Filter function proposed by calculation (1 dB ripple)

通过希尔伯特变换式(15)得到的相位函数 $\phi_{\min}(\omega)$ 如图 4 所示。可以看到构造的函数与实际的曲线(图 5)之间基本一致,显示了应有的特性。数值计算时,信号的码率取 10 Gb/s。

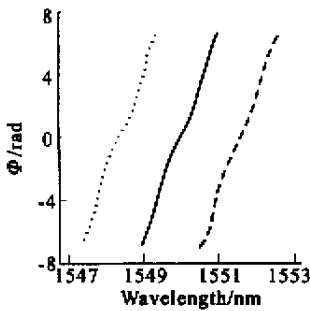


Fig.4 Phase function corresponding with the filter function (shown in Fig. 3)

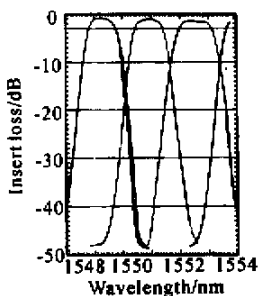


Fig.5 Actual filter function of DEMUX

计算所得复用器/解复用器抖动引起的功率代

价如图 6 所示。图 6 中,中央区域尖峰个数分别为 1、2、3、4、5、10、100(对应图 6 中的曲线 $P_{s1}, P_{s2}, P_{s3}, P_{s4}, P_{s5}, P_{s10}, P_{s100}$)。无论在何种情况下,功率代价都是随着抖动幅度的增加而增加的。在复用器/解复用器的性能之中,对抖动幅值的要求很严格。在抖动幅值为 0.5 dB 时已经比 0.2 dB 时的功率代价增加了 2 dB ~ 4dB。

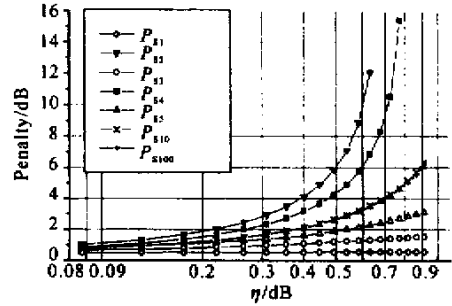


Fig.6 Relation between central ripple amplitude and penalty

从图 6 中可以看到尖峰数目 1 和 2 之间分布着所有的各种情况,也就是说这两种情况是滤波函数的极值情况。还要注意的,通常遇到的复用器/解复用器的尖峰个数(以及位置)就在这两者之间,因而有可能微小的滤波函数的差别带来了较大的功率代价的变化。图 6 还有一个比较显著的特征,当滤波函数缺陷的尖峰数目变得很大时(如 $n = 100$)其功率代价并不与 $n = 1$ 时相同,而是趋向于一个比较大的数值。对于这个现象,可以从相位的变化上来解释。对于不同的滤波函数,其相位函数也不同,也就对信号的延时不同,对信号的抖动产生不同影响。因而没有哪一个函数能同 $n = 1$ 的函数一样,对信号的影响最小,产生最小的功率代价。通过计算来看, $n = 10$ 与 $n = 100$ 之间并没有太大的区别,对信号抖动的影响基本上是相同的,即带来的附加噪声基本相同。这也就是为什么当尖峰数目变得很大的时候,其带来的功率代价基本不发生变化,并且高于 $n = 1$ 这种情况的原因。

固定抖动值,复用器/解复用器滤波函数的抖动阶数与功率代价之间的关系如图 7 所示。图 7 中,作出了总功率代价以及相干噪声和非相干噪声引起的功率代价曲线。可以看到相干噪声引起的功率代价占有主导地位。

当中央缺陷的尖峰个数在 1 和 2 之间时,其功率代价将从 0.5 dB 变化到 1.9 dB;当尖峰的个数再增加,在 2 和 3 之间,功率代价又从 1.9 dB 下降到 0.8 dB,因而这种缺陷的尖峰数目也是决定器件性能的重要指标。精确地测定复用器/解复用器的滤

波特性才能确切的知道这种器件在系统中的影响。

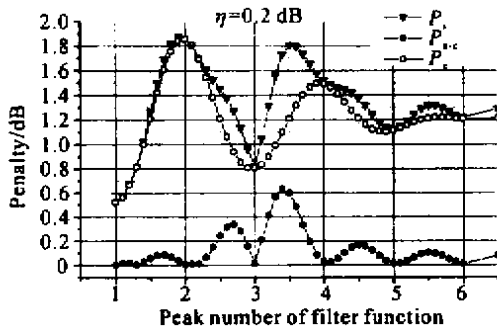


Fig. 7 Relation between central ripple peak number and penalty (P_s : the sum penalty caused by both coherent and non-coherent noise. P_{n-c} : the penalty caused by non-coherent noise. P_c : the penalty caused only by coherent noise)

在图7中有3个极小点,恰好是在 $n=1, 3, 5$ 的奇数位置。因为在这些位置,相干噪声和非相干噪声都得到了很好的抑制,信号的畸变小,所以出现了功率代价的极小点。同时注意到相干噪声在 $n=2, 4$ 的位置上出现极大值,而非相干串扰是在半整数($n=1.5, 2.5, 3.5, 4.5$)附近出现极大值点。当 $n=2, 4$ 时,信号畸变很大,这是因为信号频率谱的主峰被抑制,信息丢失严重。当 n 为半整数时,恰好其抖动的最大值处与相邻信道的频率谱的边峰相遇,因而非相干串扰变得严重,噪声增加,导致了功率代价的增加。

结论 从功率代价的角度分析了复用器/解复用器滤波特性对系统性能的影响,根据目前的复用器/解

复用器传输特性曲线,通过函数的构造,很好地模拟了其所具有的特点。通过数值计算,对其中央缺陷进行了研究。研究表明:光网络节点传输函数中央平坦区域的微小抖动(0.2 dB ~ 0.5 dB),引起系统性能的严重恶化,最坏情况下功率代价增加2 dB ~ 6 dB;并且中央区域凹陷个数不同,对系统性能的影响也不同,引起功率代价的差别达到1 dB ~ 5 dB。

参 考 文 献

- [1] Goldstein E L, Eskildsen L. Scaling limitations in transparent optical networks due to low-level crosstalk. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(1):93 ~ 94
- [2] Zhou J, Cadeddu R, Casaccia E *et al.*. Crosstalk in multiwavelength optical cross-connect networks. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6):1423 ~ 1435
- [3] Shen Y, Lu K, Gu W. Coherent and incoherent crosstalk in WDM optical networks. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(5):759 ~ 764
- [4] Yu C X, Wang W, Brorson S D. System degradation due to multipath coherent crosstalk in WDM network nodes. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(8):1380 ~ 1386
- [5] Dods S D, Lacey J P R, Tucker R S. Homodyne crosstalk in WDM ring and bus networks. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(9):1285 ~ 1287
- [6] Agrawal G P. Crosstalk penalty in multichannel ASK heterodyne lightwave systems. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(12):2064 ~ 2071
- [7] Takahashi H, Oda K, Toba H. Impact of crosstalk in an arrayed-waveguide multiplexer on $N \times N$ optical interconnection. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6):1097 ~ 1105
- [8] Papoulis A. *The Fourier Integral and Its Applications*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1962. 206

Study on Filter Performance of MUX/DEMUX

Zhao Wei Zheng Xiaoping Zhang Hanyi

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

(Received 4 April 2001; revised 10 September 2001)

Abstract: Multiplexer/demultiplexer's impact on optical network system is studied. 10 Gbit/s optical system's degradation caused by optical nodes is identified. Noise distribution is assumed as a Gauss one. The transmission function of optical node is considered as a band pass function. The central region of this band pass function is always not as flat as the ideal function. It causes the degradation of system performance severely. The system penalty is 2 dB ~ 6 dB on the condition of 0.2 dB ~ 0.5 dB variation. Also the difference of the flaw makes discrimination of penalty. The discrimination is 1 dB ~ 5 dB considering the amplitude and rank of variation.

Key words: multiplexer/demultiplexer (MUX/DEMUX); optical network; Gauss noise distribution