

文章编号 : 0253-2239(2002)08-0942-05

光分组交换节点中缓存器对串扰相干特性的影响*

王春华 贾潞华 黄肇明 朱炳春 闫晓光
(上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072)

摘要: 研究了光分组交换中光输出缓存器引起的排队延迟对节点串扰特性的影响,建立了节点串扰特性与缓存器长度之间关系的数学模型。结果表明,对光分组交换节点,由于缓存器的存在,串扰源数目随缓存器的长度增加而增加,串扰中,非相干串扰占多数,数目随机的相干串扰的影响较小,且当缓存器较长时,相干串扰的影响可以忽略,即可将所有串扰视为非相干。

关键词: 光分组交换;串扰;光缓存器;相干;非相干;同步数字系列(SDH)
中图分类号: TN929.1 文献标识码: A

1 引 言

基于同步数字系列/波分复用器(SDH/WDM)方式的光交换节点采用电路交换模式,无需光缓存器。而在光分组交换节点中,为降低节点丢包率,需要光缓存器对暂时不能转发的光包缓冲寄存。对光分组交换节点中输出缓存器的延时问题已经有了广泛而深入的讨论^[1,2],但主要针对逻辑层的丢包率及等待延时的讨论,而缓存器延时对物理层性能的影响还未见相关报道。光分组交换节点中,光输出缓存器由光纤延迟线构成,某个输出端口输出的各波长上的光信号及其串扰在不同时刻时,在缓存器中的滞留时间不同,因此相互延迟差不同。

光交换节点中,器件的非理想特性导致串扰信号的产生。节点串扰分为带内串扰和带外串扰。带内串扰指同波长的串扰信号,接收时不能滤除,带外串扰指不同波长的串扰,接收时可以滤除。带内串扰可分为相干串扰和非相干串扰。非相干串扰指串扰与信号相位无关,而相干串扰则相位相关。信号光与串扰之间的延迟时间差直接决定了该串扰与信号是相干还是非相干。串扰噪声主要是由非相干串扰引起,而非相干串扰之间相关特性的不同会导致相对强度噪声的不同^[3]。光分组交换节点中,延迟分为两类,缓存器排队延迟和节点内部路由路径不同引起的延迟。而就相干和非相干串扰本身的特性

已有了深入的研究^[3-6]。

本文研究了光分组交换节点中,由于光输出缓存器引起的排队延迟对节点串扰的相干与非相干特性的影响,导出并分析了串扰来源,建立了串扰引起的功率代价与缓存器长度之间关系的数学模型,最后进行了计算和仿真。

2 理论推导

2.1 串扰信号分析

光分组交换的两种节点结构模型为波长路由型(WRS)和广播选择型(B&S)^[7],由于后者是前者的改进,本文的讨论基于广播选择型光分组交换节点结构,如图 1 所示。

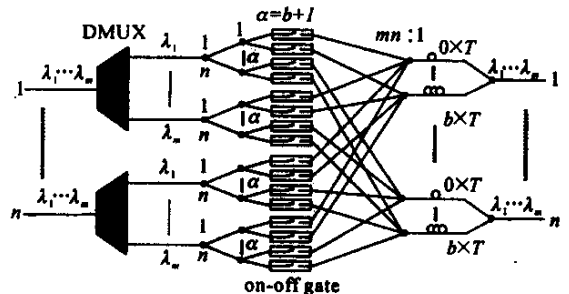


Fig. 1 B&S packet switching node architecture

其中,未考虑波长变换,输入输出端口数均为 n,复用波长数为 m,输出光缓存器由光纤延迟线构成,长度为 b,令 $\alpha = b + 1$, T 为一个包长时间。在全业务情况下,在 1 输出端口,接收 1 输入端口、1 波长信道、u 排队位置(时隙)的信号时,忽略波分复用器和光开关的串扰系数为 $\sqrt{\alpha_{\text{mux}}}$ 和 $\sqrt{\alpha_{\text{gate}}}$ 的二次以上的高阶串扰,接收到的信号及带内串扰为:

*上海市科委基金项目“光分组交换城域网计算机仿真(98JC14006)”资助课题。

E-mail lizawch@citiz.net

收稿日期 2001-06-13;收到修改稿日期 2001-08-10

$$\begin{aligned}
s_1^u(t) = & e_1^u(t) \exp\{-j[\omega_1^u t + \varphi_1^u(t)]\} + \\
& \sqrt{\alpha_{\text{gate}}} \sum_{j=2}^n e_1^{ju}(t - \tau_{q,l}^{ju} - \tau_{r,l}^{ju}) \exp\{-j[\omega_1^j(t - \tau_{q,l}^{ju} - \tau_{r,l}^{ju}) + \varphi_1^j(t - \tau_{q,l}^{ju} - \tau_{r,l}^{ju})]\} + \\
& \sqrt{\alpha_{\text{gate}}} \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq u}}^b \sum_{j=1}^n e_1^{ij}(t - \tau_{q,l}^i - \tau_{r,l}^j) \exp\{-j[\omega_1^j(t - \tau_{q,l}^i - \tau_{r,l}^j) + \varphi_1^j(t - \tau_{q,l}^i - \tau_{r,l}^j)]\} + \\
& \sqrt{\alpha_{\text{mux}}} \sum_{\substack{j' \in [1, m] \\ i' \in [0, b]}}^{m-1} e_1^{i'j'}(t - \tau_{q,l}^{j'} - \tau_{r,l}^{i'}) \exp\{-j[\omega_1^{j'}(t - \tau_{q,l}^{j'} - \tau_{r,l}^{i'}) + \varphi_1^{j'}(t - \tau_{q,l}^{j'} - \tau_{r,l}^{i'})]\}, \quad (1)
\end{aligned}$$

(1)式中, $e(t)$ 为传输数据, $\varphi(t)$ 为光波的相位。右下标“1”表示第一个波长;右上标第一位表示输入端口,第二位表示光缓存器中的排队位置。 j, j' 表示串扰信号由第 j 或 j' 输入端口到达, $j' \in [1, n]$ 为随机变量, 设其为均匀分布, i 和随机变量 $i' \in [0, b]$ 表示串扰信号在缓存器中的排队延迟位置。

τ_q 和 τ_r 表示串扰与被选信号间的排队延迟差和路由路径延迟差。一般的波分复用系统光源, 谱宽大于 10^{-3} nm, 相干长度达 m 量级, 相干时间 τ_c 为 ns 级。对于 2.5 Gb/s 或 10 Gb/s 的传输速率, 一个异步转移模式(ATM)数据包长时间约为 200 ns 和 50 ns, 远远大于光源的相干时间, 因此只要有不小于 1 的排队延迟, 同源相干串扰即变为非相干串扰。

(1)式中, 第一项为 1 输出端口、 u 排队位置、由 1 端口输入、1 波长信道的被选信号。第二项为其它 $n-1$ 个端口到达的同波长信号在 u 排队位置由‘gate-off’泄露产生的串扰, 因为与信号不同源, 所以不相干, 并且相互之间不同源, 即相互独立; 第三项为 $i=0 \sim b, i \neq u$ 排队位置的所有输入端的同波长‘gate-off’串扰, 其中 b 个与信号同源, 但由于与信号光排队延迟差 $|\tau_{q,l}^i| \geq T \gg \tau_c$, 所以第三项中的所有 nb 个串扰全部为非相干串扰, 且串扰间相互无关; 第四项为由路由算法选择 i' 缓存器位置、 j' 端口输入的其它波长信号时, 由‘gate-on’引入的同频串扰, 共 $m-1$ 个。

(1)式中, 共有 $n(b+1) + m-2$ 项串扰, 其中 $n(b+1)-1$ 项为确定的非相干串扰; $m-1$ 项串扰的相干特性不确定, 其是否相干由三个因素共同决定: 1) 是否与被选信号同源, 只有同源才有可能相干; 2) 与被选信号间的排队延迟差是否为零, 只有排队延迟差为零才有可能相干; 3) τ_r 是否小于 τ_c 。在这 $m-1$ 项串扰中, 只有同源、零排队延迟差且 $\tau_r < \tau_c$ 的串扰才相干。所以讨论有输出光缓存器的光分组交换节点串扰影响的统计特性即是讨论这 $m-1$ 项串扰的统计特性。这些串扰与信号同源的

概率为 $1/n$, 不同源概率为 $1-1/n$ 。以下分别讨论排队延迟和路由延迟的统计特性。

2.2 串扰的排队延迟

设缓存器中有 i 个包排队的概率为 π_i , 节点到达业务为伯努利业务, 业务率 ρ , 节点内部无波长转换, 任一输出端口的某波长信道的业务到达概率为:

$$a_k = \binom{n}{k} \left(\frac{\rho}{n}\right)^k \left(1 - \frac{\rho}{n}\right)^{n-k}, \quad (2)$$

排队状态转移概率矩阵 $P = \{p_{ij}\}$, p_{ij} 为 T 时刻有 j 个排队, $T+1$ 时刻变为 i 个排队的概率。根据光纤延迟线缓存器的先入先出特性, 排队模型为 B/D/1/1, 则得到:

$$p_{ji} = \begin{cases} a_0 + a_1 & (i = j = 0), \\ a_{i-j+1} & (b-1 \geq i \geq j-1, \\ & n \geq b \text{ or} \\ & b-1 \geq i \geq j-1+n, \\ & n < b), \\ \sum_{k=i+j+1}^n a_k & (i = b, n > b) \\ 0 & (\text{other}). \end{cases} \quad (3)$$

联立

$$\sum_{i=0}^b \pi_i = 1, \quad (4)$$

求解稳态过程方程

$$P \cdot \Pi = \Pi, \quad (5)$$

其中 $\Pi = \{\pi_i\}$, 可得输出光缓存器的排队状态矢量, 即串扰延时为 i 个包长的概率 $\{\pi_i\}$ 。

由于(1)式第四项中, 串扰与被选信号同源的概率为 $1/n$, 排队延迟差为零的概率为 π_u , 由此得出, 某个串扰与被选信号同源且排队延迟差为零的概率为

$$p_{\text{ident } \rho-q} = \pi_u \frac{1}{n}, \quad (6)$$

满足同源且零排队延迟差的串扰, 其是否相干仅由路由延迟决定。

由排队延迟即可确定非相干的概率为：

$$P_{\text{incoh } q_1} = 1 - \pi_u \frac{1}{n}. \quad (7)$$

2.3 串扰引起的相对强度噪声 (RIN) 和功率代价

由于路由延迟对串扰特性的统计影响已有研究^[3],为简单而又不对本文的结论产生影响,以下讨论两种极限情况由路由延迟对串扰特性的影响。

2.3.1 $\tau_{r,l}^{j'} > \tau_c$

此时所有串扰为非相干,且串扰之间相位无关,因此可得信号在“1”电平 $\alpha_{\text{max}} = \alpha_{\text{gate}} = \alpha$,且不考虑串扰与信号间的偏振影响,即所有串扰与信号同向偏振时,归一化的光电流为：

$$i^{1u} = 1 + 2\sqrt{\alpha} \sum_{j=1}^{n(b+1)+m-2} \epsilon(t - \tau_j) \cos[\Delta\Phi^{ju}(t, \tau_j)], \quad (8)$$

其中 $\Delta\Phi^{ju}$ 为信号与串扰间的相位差。由于平稳过程 $e_i(t - \tau_j) = 0.5$ [参考文献 8],可得串扰引起

的相对强度噪声为：

$$\sigma_{1,\text{RIN}}^2 = \alpha [n(b+1) + m - 2]. \quad (9)$$

2.3.2 $\tau_{r,l}^{j'} \ll T_{\text{bit}}$

此时路由延迟引入的相位差不足以对串扰的相干特性产生影响 (1)式第四项 $m - 1$ 个串扰中,相干与非相干串扰概率由(6)式、(7)式给出。其中相干串扰不引起相对强度噪声,只引起信号幅度的波动。由于(1)式第二、三、四项中非相干串扰之间,来自相同 j 输入端口、相同排队位置 i 的这些串扰之间是相关的,设这些相互相关的串扰数为 K^{ji} ,可导出其概率为：

$$p_{K^{ji}} = \binom{m-1}{K^{ji}} \left(\frac{\pi_i}{n}\right)^{K^{ji}} \left(1 - \frac{\pi_i}{n}\right)^{m-1-K^{ji}} \quad (K^{ji} \in [0, m-1]), \quad (10)$$

且 $\sum_{j=1}^n \sum_{i=0}^b K^{ji} = m - 1$. (11)
同(8)式,得到“1”电平的光电流为：

$$i^{1u} = 1 + 2\sqrt{\alpha} \sum_{k=1}^{K^{1u}} \cos(\psi_k^{1u}) + 2\sqrt{\alpha} \sum_{j=1}^n \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq u}}^b e^{ji}(t - \tau_q^i - \tau_r^i) \cos[\Delta\Phi^{ju}(t, \tau)] \left[1 + \sum_{k=1}^{K^{ji}} \cos(\psi_k^{ji})\right] + 2\sqrt{\alpha} \sum_{j=2}^n e^{ju}(t - \tau_q^j - \tau_r^j) \cos[\Delta\Phi^{ju}(t, \tau)] \left[1 + \sum_{k=1}^{K^{ju}} \cos(\psi_k^{ju})\right], \quad (12)$$

其中 $\psi_k^{ji} = \omega_1 \tau_{r,k}^i$; $\Delta\Phi^{ji}(t, \tau) = \omega_1 t - \omega_1(t - \tau_r^i - \tau_q^i) + \varphi^1(t) - \varphi^i(t - \tau_r^i - \tau_q^i)$.

(12)式中,一、二项为信号光功率, K^{1u} 越大,信号幅值波动越大;三、四项为与信号非相干的串扰,引起的相对强度噪声为：

$$\sigma_{2,\text{RIN}}^2 = \alpha \sum_{j=1}^n \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq u}}^b \left[1 + \sum_{k=1}^{K^{ji}} \cos(\psi_k^{ji})\right]^2 + \alpha \sum_{j=2}^n \left[1 + \sum_{k=1}^{K^{ju}} \cos(\psi_k^{ju})\right]^2. \quad (13)$$

由此得出高斯噪声假设、接收机带宽大于信号噪声带宽、固定阈值检测时的功率代价为^[8]：

$$P = -5 \lg(1 - 4Q^2 \sigma_{\text{RIN}}^2), \quad (14)$$

其中接收信号的品质因数 $Q = 5.9$ 为误码率 $\rho_{\text{ber}} = 10^{-9}$ 时的值。

3 计算与仿真结果

设节点端口数 $n = 16$, 波长数 $m = 8$, 业务率 $\rho = 1$, $\alpha = -50$ dB, 信号排队位置 $u = 0$ 。

$\tau_{r,l}^{j'} > \tau_c$ 时,串扰引起的信号波动为零,所有串扰非相干,且相互无关,串扰功率代价与缓存器长度

之间的关系由图 2 给出。可见,光分组交换节点中,串扰与缓存器长度密切相关, b 增大会引起功率代价的快速增大。对无波长变换的节点,满足 10^{-9} 丢包率时要求 $b = 55^{[1]}$,因此将会引起巨大的串扰噪声。由图 2, $n = 16$ 时, $m = 4, 8, 16$ 三条曲线非常接近,可见节点端口数和缓存器长度给定时,复用波长数改变对功率代价的影响较小;而节点端口数增大,串扰功率代价随之增大,且 b 越大,增大得越多。

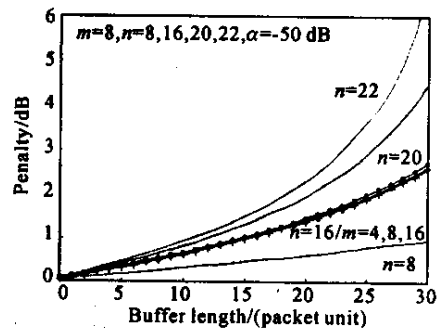


Fig.2 The relationships between crosstalk penalty and buffer length in the case of $\tau_{r,l}^{j'} > \tau_c$.

$\tau_{r,l}^{j'} \ll T_{bit}$ 情况。对一般的集成光波导器件的交换节点,满足 $\tau_{r,l}^{j'} \ll T_{bit}$ 。利用蒙特卡罗仿真方法,随机选取 $m-1$ 个 j' 输入端口, i' 排队位置的串扰,其中 j' 从 $[1, n]$ 中均匀随机选取, i' 从 $[0, b]$ 中按 π_i 分布随机选取。相干串扰之间的相位差 $[0, 2\pi]$ 均匀分布。迭代 10000 次的功率代价的概率密度的仿真结果如图 3 所示。可见,功率代价主要取决于 b , b 增大,功率代价增大;由于 b 的增大,虽然功率代价的绝对统计变化幅度增大,但相对变化减小。图 4 给出了 $m-1$ 个串扰与其他串扰相关时,最坏(串扰间随机相位差同相)一般(随机相差)和最好(反相)情况下,串扰功率代价仿真结果的均值与缓存器长度间的关系。可见,最坏和最好情况的仿真曲线与 $\tau_{r,l}^{j'} > \tau_c$ 情况差别很小,并且一般情况的仿真曲线与串扰间无关的曲线非常接近,因此对分组交换节点,在 b 较大时,可以用 $\tau_{r,l}^{j'} > \tau_c$ 的结果来近似代替其它各种路由延迟情况,即 $m-1$ 个随机串扰带来的随机效应可以忽略不计。

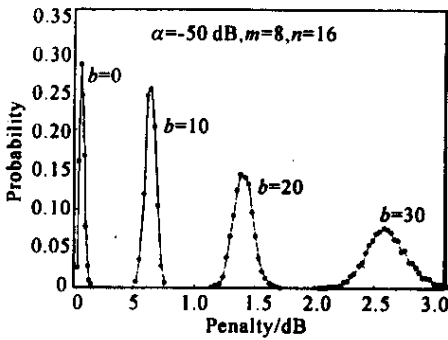


Fig.3 The probabilities of crosstalk penalty for $b = 0, 10, 20, 30$ in the case of $\tau_{r,l}^{j'} \ll T_{bit}$

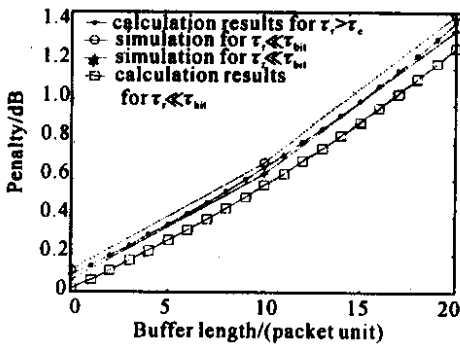


Fig.4 The simulated relationships between crosstalk penalty and buffer length in the worst, best and general cases

$\tau_{r,l}^{j'} > \tau_c$ 时,所有串扰都引起相对强度噪声,不会引起信号功率波动。而 $\tau_{r,l}^{j'} \ll T_{bit}$ 时,有 K^{10} 个串扰对信号光功率有贡献,图 5 给出了信号光功率波动的概率分布。可见存在光缓存器,信号光功率波

动可能减小,但随 b 的增加,变化很小。

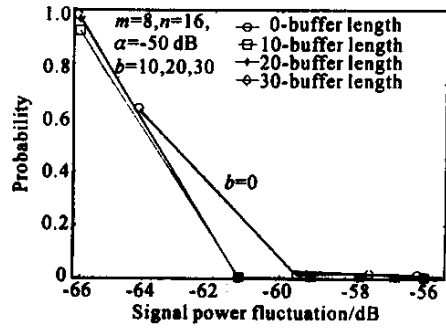


Fig.5 Probability density distribution of signal-current fluctuation for $b = 0, 10, 20, 30$

结论 本文对光分组交换节点的串扰源特性进行了讨论。首先导出并分析了光分组交换节点中,存在光输出缓存器时的串扰噪声来源及其性质,在所有共 $n(b+1)+m-2$ 项串扰中,确定的非相干串扰为 $n(b+1)-1$ 项,剩余的 $m-1$ 项为随机相干或不相干,由路由方案和缓存器排队状态决定。其次导出了 $m-1$ 项不确定串扰中,排队延迟导致串扰非相干的概率;此后,讨论了路由延迟大于光源相干时间和远远小于一个脉冲周期这两种极限情况下的串扰功率代价。最后,计算和仿真结果表明,光分组交换节点中,光缓存器的存在导致了串扰功率代价的大大增加。由于缓存器排队延迟,非相干串扰比例大大增加。 b 较大时,所有串扰可视为互相无关的非相干串扰。

参 考 文 献

[1] Diao J, Chu P L. Analysis of partially shared buffering for WDM optical packet switching. *J. Lightwave Technol.*, 1999, 17(12): 2461 ~ 2469

[2] Hunter D K, Chia M C, Andonovic I. Buffering in optical packet switches. *J. Lightwave Technol.*, 1998, 16(12): 2081 ~ 2094

[3] Shen Yunfeng, Lu Kejie, Gu Wanyi. Coherent and incoherent crosstalk in WDM optical networks. *J. Lightwave Technol.*, 1999, 17(5): 759 ~ 764

[4] Goldstein E L, Eskildsen L. Scaling limitations in transparent optical networks due to low-level crosstalk. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1995, 7(1): 93 ~ 94

[5] Goldstein E L, Eskildsen L, Elrefaie A F. Performance implications of components crosstalk in transparent lightwave networks. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1994, 6(5): 657 ~ 660

[6] Dods S D, Lacey J P R, Tucker R S. Homodyne crosstalk in WDM ring and bus networks. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1997, 9(9): 1285 ~ 1287

[7] Guillemot C, Renaud M, Gambini P et al.. Transparent

optical packet switching : The European ACTS KEOPS projects approach. *J. Lightwave Technol.* , 1998 , **16** (12) :2117 ~ 2133

noise conversion by multiple reflections on gigabit-per-second DFB laser transmission systems. *J. Lightwave Technol.* , 1989 , **7** (6) :888 ~ 895

[8] Gimlett J L , Cheung N K. Effects of phase-to-intensity

Buffer's Effect on Coherent Character of Crosstalk in Optical Packet Switching Node

Wang Chunhua Jia Luhua Huang Zhaoming Zhu Bingchun Yan Xiaoguang
(*School of Communication and Information Engineering , Shanghai University , Shanghai 200072*)

(Received 13 June 2001 ; revised 10 August 2001)

Abstract : The effects of queuing delay of output buffer on the property of crosstalk in optical packet switching nodes are investigated. The analytical relationship between crosstalk and buffer length is derived. It is concluded that the crosstalk increases with the increase of buffer length. Among the crosstalk sources , the most of them are incoherent , and the probability of coherent crosstalk decreases with the increase of buffer length significantly , and if the buffer length is longer enough , the coherent crosstalk could be neglectable.

Key words : optical packet switching ; crosstalk ; optical buffer ; coherent ; incoherent ; synchronous digital hierarchy (SDH)