

一种反馈 FDL 结构竞争解决丢包率的研究

郑 勉 邱 昆 凌 云

(电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 成都 610054)

摘 要 对反馈 FDL 结构的光分组交换竞争解决方案建立了数学模型并进行了理论分析, 推导出了在反馈 FDL 输入分组比输入光纤输入分组具有更高输出优先级时的系统丢包率公式, 对系统丢包率与负载、输入光纤端口数和 FDL 数目的关系进行了数值计算和讨论. 结果表明: 由于 FDL 缓存分组的概率与输入分组负载的非线性关系导致了反馈 FDL 结构在低负载时对丢包率的改善非常明显, 对高负载的改善却十分有限. 随着 FDL 数目的增加, 对系统丢包率的改善不会趋于一个极限值, 这是与使用波长转换器进行竞争解决的不同之处, 因此使用反馈 FDL 结构可以降低波长转换器的丢包率极限.

关键词 光分组交换; 竞争解决; 光纤延迟线; 丢包率

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

光分组交换在光域上直接对分组进行路由和交换, 具有最小的交换粒度和对上层协议的透明性等优点, 是最理想的光交换形式. 但由于光逻辑器件和光随机存储器件还处于实验室研究阶段, 如何解决光分组交换中出现的多个分组竞争一个输出端口的问题成为光分组交换中亟待解决的一个关键问题. 光分组交换的竞争解决技术有波长转换 (Wavelength Conversion), 光纤延迟线 (Fiber Delay Line FDL) 和偏射路由 (Deflection Routing). 光分组交换中竞争解决技术的研究大多采用仿真实验的方法来进行^[1~3]. 文献[4]对反馈 FDL 结构的缓存粒度进行了研究, 研究表明通过适当增加小粒度光缓存的方法能降低系统的丢包率. 文献[5]对反馈 FDL 结构在突发和非突发下的性能进行了研究, 结果表明在突发业务下, 反馈 FDL 结构是一种较为理想的竞争解决结构. 文献[6]对简并和非简并的两种反馈 FDL 结构进行了研究, 研究表明在降低系统体积和成本上, 对于非突发业务, 非简并的方案较优; 对于突发业务, 简并的方案较优. 但需要指出的是仿真实验只能看到现象, 很难发现规律, 更难发现规律的原因. 只有通过准确的理论分析才能真正理解各种竞争解决技术的规律, 并利用规律指导光分组交换系统的设计. 由于理论分析的难度较大, 目前对光分组交换系统中竞争解决技术的理论分析很少, 有值得深入研究的必要. 本文将对一种光分组竞争解决方案——反馈 FDL 结构进行研究, 建立其数学模型和分析该结构的丢包率, 并通过实

例计算来发现该结构的规律和解释规律的原因.

1 系统模型

本文选取的研究对象是一种反馈 FDL 结构实现竞争解决的光分组交换结构^[7,8], 如图 1. 为了简化分析模型, 该系统没有波长转换器, 也不能实现偏射路由功能. 假设输入、输出的光纤的数目为 N , 反馈光纤的数目为 r , 每根光纤的复用波长数为 M . 由于没有波长转换器, 各个交换的波长平面相互独立, 因此该系统也可看成 M 个独立的单一波长的分组交换系统. 在交换矩阵的输入和输出端, 分别使用波分解复用和复用器, 以实现输入交换矩阵的是各单一的波长通道. FDL 也采用波分复用技术, 复用波长数为 M , 以减少 FDL 的数量. 光交换矩阵是无阻塞的, 且在以下的分析中不考虑光交换矩阵带来的信号劣化和端口间的串扰. 该系统为同步光分组交换系统. 分组的长度为定长 (设为时间 T), 分组在输入交换矩阵时已实现了各信道的同步. 每根光纤延迟线为延迟一个时隙 T 的长度.

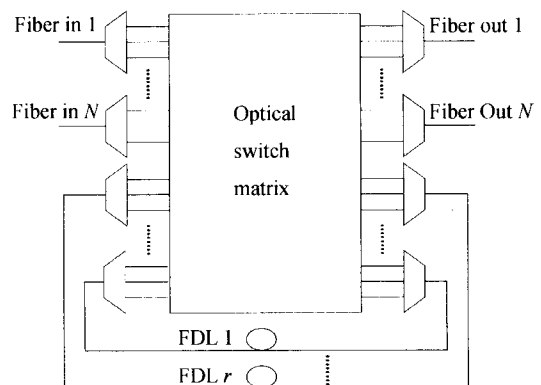


图 1 反馈 FDL 竞争解决光分组交换结构
Fig. 1 Optical packet switching architecture based on feedback FDL contention resolution

该系统的工作原理为:在某个时隙开始时刻,各波长通道的光分组同时输入到光交换矩阵,根据目的地址,选取输出端口(某光纤的某波长通道),若输出端口有多个分组,首先判断是否有 FDL 输入的分组,若有一个,则优先交换输出;若有多个 FDL 输出分组,则在这些 FDL 分组中等概率选取一个交换输出;若无 FDL 输入的分组,则等概率选取其中一个交换输出. 其余在该时隙未能实现交换输出的分组交换到 FDL 延迟一个周期,等待下一次交换. 若 FDL 均已被占用,则多余的分组将被丢弃,产生丢包. 由此可见在交换系统中,FDL 中输入交换的分组者优先级要高于从输入光纤输入的分组,这可以减少交换系统带来的分组时延. 但为了简化问题的分析,在 FDL 输入的分组中不再划分等级,即等待了多个时隙的分组和一个时隙的分组者优先级相同.

2 丢包率的理论分析

假设每根输入光纤上所有的波长通道具有相同的分组到达分布,每根 FDL 的所有波长通道也有相同的分组到达分布. 在输入光纤,每个波长,每个时隙有分组的概率为 a_0 , FDL 每个波长,每个时隙有分组的概率为 b_0 . 设任一波长上的分组要求交换到 N 根输出光纤的概率相等,因此输入光纤中分组被交换到某根光纤的概率为 $u_1 = a_0/N$, FDL 中分组被交换到某根输出光纤的概率为 $u_2 = b_0/N$.

由于在系统中每根输出光纤中的竞争造成的丢包率相同,每根输出光纤的每个波长上由竞争造成的丢包率也相同,并且由于没有波长转换,各波长相互独立,丢包率分布相同,每个波长上的丢包率就反映了整个交换系统的丢包率,因此对整个交换系统的丢包率进行研究,只需要对某根输出光纤上某个波长上的丢包率进行研究.

设任一时刻该第 k 光纤 λ_s 波长到达的分组数为 α_k ,其中由输入光纤达到的分组数为 X_1 ,由 FDL 输入的分组数为 X_2 ,则 $\alpha_k = X_1 + X_2$,且 X_1, X_2 服从二项式分布, $X_1 \sim B(N, u_1), X_2 \sim B(N, u_2)$,因此 α_k 的分布为

$$P_a(i) = P\{\alpha_k = i\} = \sum_{t=0}^{\min(r,i)} P\{X_1 = i-t | X_2 = t\} P\{X_2 = t\} = \sum_{t=0}^{\min(r,i)} P\{X_1 = i-t\} P\{X_2 = t\} \quad (1)$$

式中 $i = 0, 1, 2, \dots, N+r$.

其中由于 X_2 为该时隙之前分组竞争而延迟的分组数目,与该时隙输入光纤到达的分组数无关,因此 $P\{X_1 = i-t | X_2 = t\} = P\{X_1 = i-t\}$.

$$P\{X_2 = t\} = C_N^t u_2^t (1-u_2)^{N-t} \quad (2)$$

$$P\{X_1 = i-t\} = C_N^{i-t} u_1^{i-t} (1-u_1)^{N-(i-t)} \quad (3)$$

由式(1)、(2)和(3)可得

$$P_a(i) = \sum_{t=0}^{\min(r,i)} C_r^t C_N^{i-t} u_1^{i-t} u_2^t \cdot (1-u_1)^{N-(i-t)} (1-u_2)^{r-t} \quad (4)$$

由于只选择一个分组输出,则余下的分组数目为 β_k

$$\beta_k = \begin{cases} 0 & \alpha_k = 0, 1 \\ \alpha_k - 1 & \alpha_k > 1 \end{cases} \quad (5)$$

β_k 的分布为

$$P_b(i) = P\{\beta_k = i\} = \begin{cases} P_a(0) + P_a(1) & i = 0 \\ P_a(i+1) & i > 0 \end{cases} \quad (6)$$

系统中 λ_s 波长总的多余分组数 $\beta = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_N$, 需要使用的 FDL 的数目 U

$$U = \begin{cases} \beta & (\beta < r) \\ r & (\beta \geq r) \end{cases} \quad (7)$$

由于 $\beta_k (k=1, 2, \dots, N)$ 独立同分布,根据独立同分布随机变量和的分布为其分布函数的卷积,则 U 的分布为

$$P\{U = i\} = \begin{cases} \bigotimes_N P_b(i) & (i < r) \\ \sum_{i=r}^{N+r-1} \bigotimes_N P_b(i) & (i = r) \end{cases} \quad (8)$$

式中 \bigotimes_N 表示 $N-1$ 次卷积.

设在某根 FDL 上的 λ_s 波长上是否有分组的随机变量为 Y ,根据条件概率公式,分解成各种所需 FDL 数目的情况,则该 FDL 有一个分组的概率为

$$P\{Y=1\} = \sum_{i=1}^r P\{Y=1 | U=i\} P\{U=i\} \quad (9)$$

对于任一种 $U=i$ 的情况,需要从 r 个 FDL 中选出 i 个来缓存分组,则该 FDL 被选中的概率为

$$P\{Y=1 | U=i\} = i/r \quad (10)$$

当系统处于稳态后,FDL 每个波长,每个时隙有分组的概率为 b_0 ,与每个时隙输入到 FDL 一个分组的概率相同,因此

$$b_0 = P\{Y=1\} \quad (11)$$

由式(8)、(9)、(10)和(11)可得

$$b_0 = \sum_{i=1}^{r-1} \frac{i}{r} \bigotimes_N P_b(i) + \sum_{i=r}^{N+r-1} \bigotimes_N P_b(i) \quad (12)$$

由于 $P_b(i)$ 中含有 $P_a(i)$, $P_a(i)$ 中含有 u_2 ,即含有 b_0 ,因此在给定 a_0 时可以通过式(4)、(6)和(12)求解出稳态下的 b_0 . 由此可见 b_0 和 a_0 是相关的. 由于无法求出 b_0 的解析表达式,在下面的定量分析中用求数值解的办法来逼近 b_0 . 在求出了 b_0 之后,再关注第 k 光纤 λ_s 波长上的丢包率. 在一个时隙,第 k 光纤 λ_s 波长上丢包数 N_l 的数学期望可分解为各种不同到达分组总数情况下的丢包数的数学期

望,即

$$E[N_i] = \sum_{i=1}^{N+r} E[N_i | \alpha_k = i] P\{\alpha_k = i\} \quad (13)$$

在有多个分组要从第 k 光纤 λ 波长上输出时, 要为多余的分组选择 FDL, 由于 FDL 是共享的, 每根输出光纤选择 FDL 有先后次序. 设第 k 根光纤在选择次序中第 D_k 个进行选择. 为了 FDL 使用的公平性, 使每根光纤在选择次序中的每一个位置的概率均等, 即

$$P\{D_k = j\} = 1/N \quad (14)$$

将分组丢失的数学期望继续分解到各种第 D_k 次选择时的情况, 可以得到

$$E[N_i | \alpha_k = i] = \sum_{j=1}^N E[E_i | \alpha_k = i, D_k = j] \cdot P\{D_k = j\} \quad (15)$$

式中由于到达分组个数与选择次数无关, $P\{D_k = j | \alpha_k = i\} = P\{D_k = j\}$.

在 D_k 次进行选择时, 已用去的 FDL 数目为 U_k , 将分组丢失的数学期望再分解到各种 U_k 情况

$$E[N_i | \alpha_k = i, D_k = j] = \sum_{p=0}^r E[N_i | \alpha_k = i, D_k = j, U_k = p] P\{U_k = p | \alpha_k = i, D_k = j\} \quad (16)$$

由于 U_k 为前 $D_k - 1$ 次选择总共用去的 FDL 数目, $U_k = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_{j-1}$, U_k 的分布为

$$P\{U_k = p | \alpha_k = i, D_k = j\} = \bigotimes_{b=1}^{j-1} P_b(p) \quad (17)$$

式中 $p=0, 1, 2, \dots, r$.

在要求交换的分组数为 i , 已经用去 p 根 FDL 的情况下的丢包数的数学期望为

$$E[N_i | \alpha_k = i, D_k = j, U_k = p] = \max(i - 1 - (r - p), 0) \quad (18)$$

由式(4)、(13)~(18)可以得到

$$E[N_i] = \sum_{i=1}^{N+r} \left(\sum_{j=1}^N \frac{1}{N} \sum_{p=0}^r \max(i - 1 - (r - p), 0) \cdot \bigotimes_{b=1}^{j-1} P_b(p) \right) \left(\sum_{t=0}^r C_r^t C_N^{r-t} u_1^{r-t} \cdot u_2^t (1 - u_1)^{N-(r-t)} (1 - u_2)^{r-t} \right) \quad (19)$$

输入第 k 光纤 λ 波长上的分组总数 N_i 的数学期望为

$$E[N_i] = Nu_1 + ru_2 \quad (20)$$

分组丢失率 P_{loss} 为

$$P_{\text{loss}} = E[N_i] / E[N_i] \quad (21)$$

由式(19)、(20)和(21)就可求出由于分组竞争输出端口和 FDL 数量有限造成的该系统的分组丢失率.

3 计算结果与讨论

利用对丢包率的理论分析推导出的公式, 对该系统在输入、输出光纤数分别为 $N=16$ 和 32, 不同 FDL 数目 r 的情况下, 丢包率与每个波长负载 a_0 的

关系进行了数值计算, 得到了丢包率与每个波长负载 a_0 的关系曲线, 如图 2 和图 3.

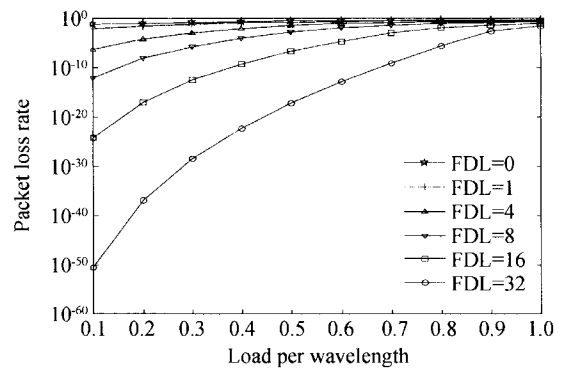


图 2 $N=16$ 时, 丢包率与波长负载关系曲线
Fig. 2 The packet loss rate vs the load per wavelength for $N=16$

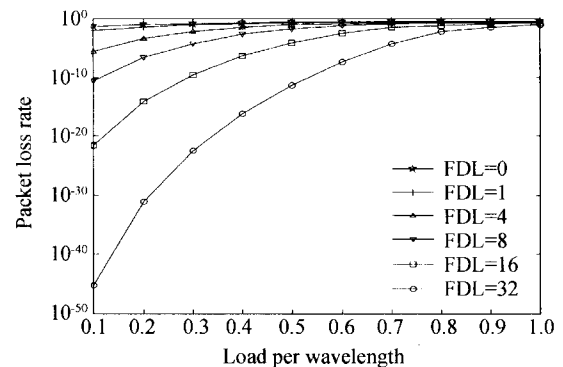


图 3 $N=32$ 时, 丢包率与波长负载关系曲线
Fig. 3 The packet loss rate vs the load per wavelength for $N=32$

在没有竞争解决方案, 即 FDL 数目为 0 时, 需要从同一个波长通道输出的分组数 X_1 属于二项式分布, 如式(3). 当 $X_1 > 1$ 时就要产生 $X_1 - 1$ 的分组被丢弃, 因此丢包率必然是比较大的. 由图 2 和图 3 可以看到即使是在低负载的情况下, 丢包率也接近 10^{-1} , 因此光分组交换系统一定要引入竞争解决机制.

由图 2 和图 3 知, FDL 的引入减小了分组丢失率, 特别是对低负载和中负载的丢包率的改善非常明显, 对高负载丢包率的改善则不明显. 其原因可以通过对 FDL 中所缓存的分组数目来分析. 图 4 是根据式(4)、(6)和(12)求解出稳态下的 b_0 与输入光纤中每波长上负载的关系曲线. 可以看到随着 FDL 数目的增加, 每根 FDL 中每波长上, 每个时隙缓存一个分组的概率减小, 因此减小了经过 FDL 反馈回去的分组和输入分组竞争输出端口的概率, 导致了随着 FDL 数目的增加, 系统丢包率减小. 由图 4 还可以看到 b_0 随每个波长负载 a_0 的变化是一种非线性的关系. 在低负载时, b_0 随 a_0 的增加而缓慢增加; 在高负载时, b_0 随 a_0 的增加而迅速增加, 甚至出现 $b_0 > a_0$ 的情况(如图 4 中 $N=32$, FDL=8 的曲

线). 因此在低负载时对系统丢包率的改善非常明显, 在高负载时对丢包率的改善则非常有限.

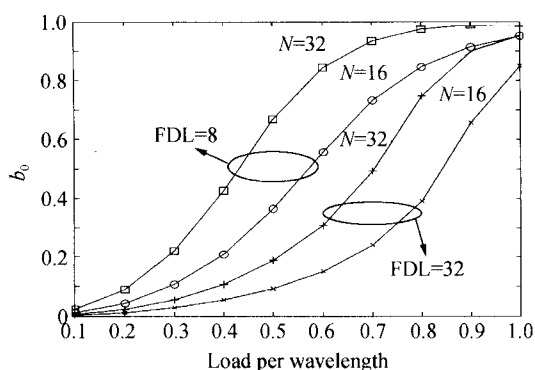


图 4 b_0 波长负载关系曲线

Fig. 4 b_0 vs the load per wavelength

比较图 2 和图 3 可以发现, 相同 FDL 数目时, 图 3 的丢包率比图 2 中的丢包率要高, 这也可以由图 4 来解释. 在相同 FDL 数目时, 输入光纤数目 N 大, 则 b_0 也大. 因此为了达到特定的丢包率性能, 随着输入、输出光纤数目的增加所需要的 FDL 的数目也应该增加.

由图 2 和图 3 还可以看到, 随着 FDL 数目的增加, 其丢包率是不断下降的, 而且其下降的幅度没有出现减小的趋势, 即随着 FDL 数目的增加其丢包率的减小不会趋于饱和. 而采用波长转换器进行竞争解决时, 随着波长转换器数目的增加其丢包率的改善会趋于为每个波长通道都分配一个波长转换器时的丢包率, 即丢包率的改善存在极限值^[9,10]. 因此将波长转换器和反馈 FDL 相结合将会突破波长转换器带来的丢包率极限, 而进一步降低系统的丢包率.

5 结论

对一种 FDL 分组具有更高优先级的反馈 FDL 结构竞争解决的光分组交换结构进行了理论分析, 得到了该系统的丢包率公式. 通过对 FDL 中缓存的分组情况的研究, 解释了反馈 FDL 结构在低负载时对丢包率的改善优于高负载的原因, 揭示了输入光纤数, FDL 数目对丢包率造成的影响的实质. 反馈 FDL 结构能够很好的突破波长转换器进行竞争解决时带来的丢包率极限.

参考文献

- 1 Yoo S J B, Xue Fei, Bansa Y, *et al.* High-performance optical-label switching packet routers and smart edge routers for the next-generation internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, **21**(7):1041~1051
- 2 Sun Yao, Mukherjee B, Yoo S J B, *et al.* A unified study of contention-resolution schemes in optical packet-switched networks. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2003, **21**(3):672~683
- 3 Xue Fei, Pan Zhong, Bansal Y, *et al.* End-to-end contention resolution schemes for an optical packet switching network with enhanced edge routers. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2003, **21**(11):1595~1604
- 4 Zhao Huandong, Chi Hao, Zeng Qingji, *et al.* A novel optical buffer configuration optimization scheme for slotted optical packet switching. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4):452~455
- 5 Wang Jianxin, Zeng Qingji, Zhang Zhizhong, *et al.* Performance analysis of fiber delay lines and tunable wavelength converters for contention resolution in optical packet switched networks. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9):1099~1103
- 6 Zhang Zhizhong, Luo Jiangtao, Zeng Qingji, *et al.* Wavelength converter and fiber delay-line sharing in WDM optical packet switches: Dimensioning and performance issues. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12):1465~1468
- 7 Callegati F, Careglio D, Cerroni W, *et al.* Assessment of packet loss for an optical feedback buffer node using slotted variable-length packets and heavy-tailed traffic. *ICTON*, 2002:51~56
- 8 Zhao Huandong, Chi Hao, Zeng Qingji, *et al.* A novel optical buffer configuration for unslotted-asynchronous optical packet switching. *IEEE ICCT'03*:555~558
- 9 Eramo V, Listani M. Packet loss in a bufferless optical WDM switch employing shared tunable wavelength converters. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2000, **18**(12):1818~1833
- 10 Eramo V, Listani M, Pacifici P. A comparison study on number of wavelength converters needed in synchronous and asynchronous all-optical switch architectures. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2003, **21**(2):340~355

Theoretical Analysis of Packet Loss Probability in Contention Resolution Based on Feedback Fiber Delay Lines

Zheng Mian, Qiu Kun, Ling Yun

Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UEST of China, Chengdu 610054

Received date: 2005-02-16

Abstract The mathematical model of optical packet switching architecture based on feedback FDL contention resolution is established and analyzed. The priority of the packets from FDLs is higher than those from input fibers in this model. The formulation of packet loss probability is deduced through neglecting the degradation of optical signal and the crosstalk in optical switch matrix. The packet loss probability is lower in low load than in high load. This is due to the nonlinear distribution of the probability of arriving packet from feedback FDL vs the load. With the increment of the load, the probability of arriving packet increases very slowly in low load and very fastly in high load. There exists no limit in packet loss probability by adding the number of FDL to improve the performance. The characteristic is different from the contention resolution based on wavelength conversion that exists a limit. It will be very useful to combine wavelength conversion and FDL to break through the limit.

Keywords Optical packet switching; Contention resolution; Fiber delay line; Packet loss rate



Zheng Mian was born in 1980. She received B. S. degree from School of Communication and Information Engineering, UEST of China, Sichuan, in 2002. Currently she is pursuing M. S. degree at Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Network, UEST of China, Sichuan. Her research focuses on contention resolution in optical packet switching.