

文章编号: 1001-3806(2005)02-0153-03

定长光突发下的 FDL 缓存和调度

张劲松, 曹明翠*, 罗风光, 罗志祥

(华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了改善光突发交换的阻塞性能, 分析了定长光突发交换在 FDL 光缓存的排队和调度, 提出了基于中间共享 FDL 光缓存结构的长队列优先 (LQP) 调度方案, 该方案使交换端口充分共享 FDL 缓存单元, 调度时间短, 在模拟仿真中得到较好的阻塞性能结果。

关键词: 光突发交换; 光纤延时线; 共享缓存排队; 长队列优先调度; 阻塞性能

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

FDL buffer queuing and scheduling on OBS with fixed scheme

ZHANG Jin-song, CAO Ming-cui, LUO Feng-guang, LUO Zhi-xiang

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract In order to improve the blocking performance of OBS, FDL buffer queuing and scheduling on OBS with fixed length scheme is discussed and based on the intermediate shared FDL buffer architecture the longest queue priority schedule scheme is put forward. Simulation shows that the FDL buffer can be shared by all output ports with a better blocking performance and utilization.

Key words optical burst switching (OBS); fiber delay line (FDL); shared FDL buffer queue; longest queue priority schedule; blocking performance

引 言

由于受技术条件的制约, 目前解决光突发交换冲突的全光缓存器是由一组不同长度的光纤延时线 (FDL) 实现的。FDL 按其功能应用可分为 FDL 相位校准、FDL 缓存排队和混合式 FDL 缓存等 3 种。FDL 相位校准主要是为了补偿光突发到达时刻和交换时刻的时间间隔, 减少时间带宽碎片的产生, 提高带宽利用率, 其延时粒度较小。FDL 缓存排队是为在交换时刻减少到同一目的端口的光突发之间的冲突, 延时粒度是一个突发的时间长度。在非时隙模式下的异步变长光突发交换方案中, 为了综合解决以上两类问题而采用混合式的 FDL 缓存^[1], 但由于相位校准和缓存排队所需的基本延时粒度相差较大, 综合解决好两类问题并不容易, 另外, 光突变的变长特性还会降低 FDL 的共享效率。因此, 需要分别加以解决。作者不试图解决突发的相位调准问题, 而是考虑在带宽效率和相位误差同时能容忍的情况下, 定长光突发的 FDL 缓存交

换问题。

1 FDL 缓存排队结构

在文献 [1] ~ [3] 中, 作者讨论的是异步可变长度突发交换方式, 但延时粒度却是以一固定时延为基本单位来仿真和分析的, 因此有理由相信, 变长方案下的 FDL 管理更复杂, 性能更差。笔者提出的可变时长光

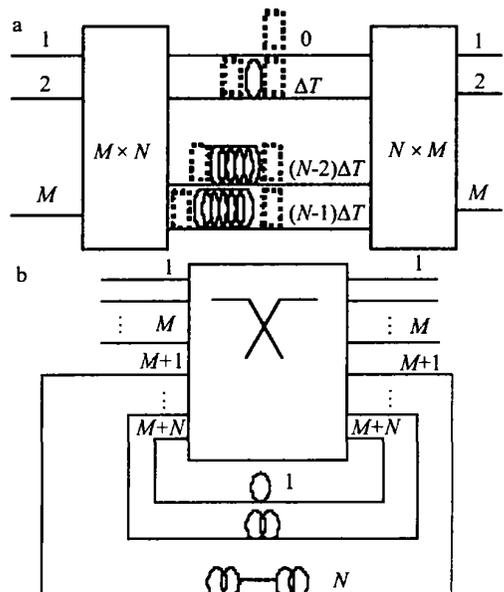


Fig 1 Fabric of FDL buffer queuing
a—worst-stage switching FDL b—circle switching FDL

基金项目: 国家八六三计划 3TNET 专项资助项目 (2002AA103064)

作者简介: 张劲松 (1970), 男, 博士研究生, 主要研究方向为全光互联和光交换。

* 通讯联系人。E-mail: mccaoc@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2003-12-24 收到修改稿日期: 2004-03-22

交换方案 (VTPOS) 中^[4], 突发数据是以一个基本时长为单位变化的, 其排队方案包含了定长的 FDL 缓存排队的情况。常见的定长 OBS 方案的 FDL 缓存排队结构^[2]分为两种, 两级交换式 FDL 结构和循环式 FDL 结构, 如图 1 所示。图 1a 中, FDL 缓存部分由 N 段延迟线组成, 每段延迟线提供不同的延迟时间, 但每段延迟线提供的延迟时间是固定的, 延迟范围从 0 到最大缓存时间 $B = (N - 1) \Delta T$ 范围内变化, ΔT 为单个延迟单元 (图中表示为 1 个圈) 的延迟时间, N 为 FDLs 的数。图 1b 为循环式交换结构, 缓存也由 N 个线性变化的延迟线组成, 交换单元的特定连接。

2 共享 FDL 缓存结构的最长队列优先调度

虽然从 VTPOS 协议^[4]的设计角度上看, 交换节点不一定要使用光缓存, 然而, 如果在交换节点配备一定的光缓存, 可以显著地降低业务的阻塞率, 提高交换结构的吞吐率, 使系统的性能得到提高^[5 6]。

YOO 等人虽然也提出了基于共享式 SBBM 的概念^[7], 但仅仅做出没有专用的 DBBM 缓存能力强的结论, 并在多端口共享方面以及缓存能力调度方面也没有进行进一步的研究。

和电信号不同, 不存在静止的光子信号, 光突发在 FDL 光缓存有时间飞逝性, 光缓存只能提供时间域上的有限缓存。即使没有新的光突发信号的到来, 随着时间的推移, 光子信号也会逐渐移出光缓存单元, 因此, 过去时刻的空闲缓存能力不能被现在和将来的光突发共享。这种特性给光缓存的管理调度带来极大的不便。另外, 集成度不高和光缓存费用大的问题要求对 FDL 缓存结构进行优化设计。

笔者在分析图 1a 的两级交换式 FDL 结构中发现, 任意时刻的 FDL 缓存结构内可以存在 $(N + 1) \times N / 2$ 个交换时长 ΔT 。当 $N = M$ 时, 当 ΔT 为一个基本突发时长时, 平均每路输出缓存深度为: $\frac{N(N+1)}{2M} = \frac{(N+1)}{2}$ 。当 $N = 7$ 时, 如图 2 所示, 从上自下缓存延时分别为 $k\Delta T (k = 0, 1, \dots, N - 1)$, 突发数为 k 。而 $R_i (1 - N \leq i \leq 0)$ 为突发进入缓存器时刻, $i < 0$ 表示过去时刻, $i = 0$ 为当前时刻, $T_j (0 \leq j \leq N - 1)$ 为突发出缓存器时刻, $j = 0$ 时为当前时刻, $j > 0$ 表示未来时刻。用 (R_i, T_j) 表示一个突发在 FDL 缓存结构中的位置。突发存在 FDL 结构的限制条件为 $j \leq N + i - 1$ 。同时进入 FDL 缓存队列的突发, 为了保证输出队列不出现端口阻塞, 则要求在 FDL 中, 任意时刻到同一输出端口, 不存在两个以上具有相同 T_j 的突发。

为了使 FDL 能提供最大的吞吐量并具有良好的时间特性。笔者提出了长缓存优先匹配的共享式 FDL

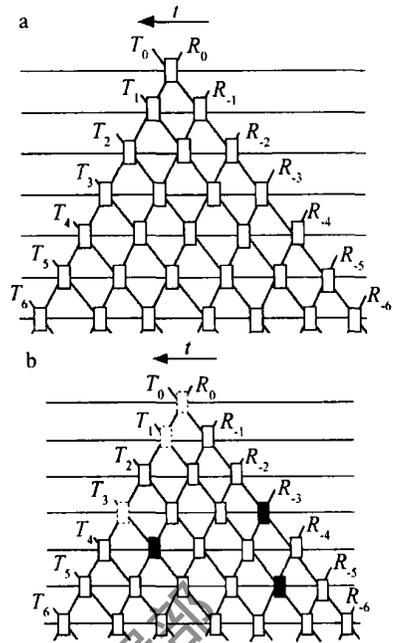


Fig 2 Bursts in the shared FDL buffer

a—no burst in the empty buffer b—new bursts in the entrance

缓存调度。其基本思想是: 按照统计到特定输出端口的 FDL 中缓存的突发和新进入的突发数目的多少, 优先调度长队列的突发进入缓存, 以减少由于不合理调度造成缓存冲突。在每次调度前, 需要按 T_i 方向, 将 FDL 中缓存的到同一输出端口的光突发投影到 R_0 时刻上, 以便预留出第 1 级交换输出端口 (如图 2b 所示)。

其基本算法思想如下: (1) 初始化 M 个输出端口队列 $\{portl(R_i, T_j)\} \quad 1 \leq i \leq M$; (2) 统计当前时刻到达 M 个输出端口突发数 S_i , 分别计算各端口队列的突发数 $num(\{portl(T_j)\})$, 当前接收时隙的 FDL 缓存初始化 $\{rec(R_0, T_n)\} = \Phi$; (3) 优先分配输出端口最长队列的第 1 个到达突发的输出时刻 T_m , 其中, $T_m \in (\{portl(T_j)\})$, T_m 不属于接收队列中的 $0 \leq m \leq N - 1$; (4) 若分配不成功, 则抛弃此端口余下突发, 转向步骤 (7); (5) 若分配成功, 记录此 T_m 到接收队列中 $\{rec(R_0, T_m)\}$, 转向同一输出端口的下一突发的分配, 下一突发分配的输出时刻 $T_n \in \{portl(T_j)\} \cup \{rec(T_m)\}$; (6) 若分配成功, 回到步骤 (5), 直到同一输出端口的突发数分配完, 否则转向步骤 (4); (7) 添加新增队列 $\{rec(R_0, T_m)\}$ 到 $\{portl(R_i, T_j)\}$ 中, 并转向下一长度下的输出端口的突发分配, 重复上述 (3) ~ (7) 步骤, 直到所有端口的突发都分配完毕; (8) 按照队列 $\{rec(R_0, T_m)\}$ 得到控制矩阵, 完成交换突发接收到缓存结构中; (9) 剔除 M 个输出端口队列 $\{portl(R_i, T_j)\}$ 输出时刻为 T_0 的所有元素, 改变队列元素下标 $j = j - 1, i = i - 1$, 等待 ΔT , 转向步骤 (2)。

在以上算法中, 任意输出端口排队最长队长为 N ,

最短队长为 1 队列缓存共享效率趋近为 0。本算法的优点是：时间复杂度低、缓存利用率高、排队延时小、吞吐量高。缺点是可能会出现突发失序。考虑到避免突发失序和支持长突发均会降低缓存利用率，应根据实际情况加以权衡。为了避免情况复杂，选用了两级交换式 FDL 结构下的最长缓存优先匹配算法作了简单的描述。实际上，循环式 FDL 结构也能采用类似的调度方法。

3 实验模拟和性能仿真

作者在 MATLAB 软件平台下实现了本文中提出的调度算法。仿真实验分别在交换规模为 7×7 及 15×15 $M=N$ 的两级全无阻塞的突发交换结构下，模拟了中间共享式的 FDL 缓存调度方法下的交换性能。为了便于分析和比较，光突发业务采用和文献 [1]，文献 [2] 中相同的简单业务流，光突发的到达间隔和服务时间均服从离散时间下的负指数分布。实验得到如图 3 所示的阻塞性能结果。图中显示，当缓存端口数从 $M=7$ 增加到 $M=15$ 时，在一般负荷条件下 ($\rho=0.5$)，阻塞率下降了 4 个数量等级，达到 10^{-8} 的实用化程度水平，因此端口数 M 直接影响了共享能力的大小，但随着负荷强度的提高其性能差异减小，FDL 的共享程度降低，分析表明，由于排队队列长度较短，在大负荷下，造成 FDL 共享队列的溢出和共享冲突是其阻塞率提高的主要原因。

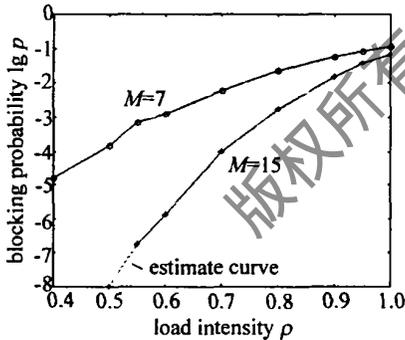


Fig 3 The blocking performance of shared FDL buffer scheduling

为了评价中间共享式的 FDL 缓存调度性能，统计了导致业务阻塞的 3 类原因：第 1 类是队列溢出，也就是到同一输出端口的突发在 FDL 缓存结构中，超过允许长度 (M) 造成突发的丢失；第 2 类是共享冲突，由于缓存容量的限制导致共享结构的冲突；第 3 类调度性阻塞，是由于调度算法的缺陷导致的共享能力的下降造成突发的丢失，其中前两类原因和 FDL 的结构相关和调度算法无关。如图 4 所示，仿真了 $M=7$ 和 $M=15$ 下，负荷 ρ 从 0.5 到 1 变化时的这 3 类阻塞的比率。结果表明：在负荷较低时，第 1 类原因 (队列溢出) 是突发阻塞的主要原因，其中在 $M=15$ 下， $\rho \leq 0.65$ 时，

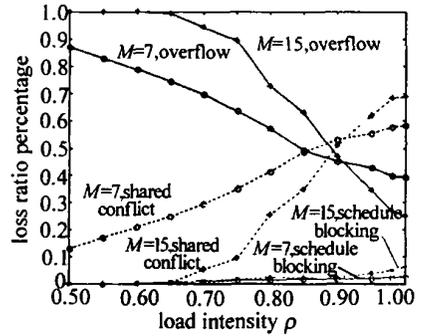


Fig 4 Blocking ratios in FDL buffer scheduling

队列溢出占整个阻塞率的 99% 以上；在 $M=7$ 下， $\rho \leq 0.5$ 时，队列溢出占整个阻塞率的 87% 以上。随着负荷强度的加大，第 2 类原因 (共享冲突) 逐渐增加，并在 $\rho=1$ 时达到最大，在 $M=15$ 下，共享冲突占 69%，队列溢出为 25%；在 $M=7$ 下，共享冲突占 58%，队列溢出为 39%。第 3 类原因始终都不是造成突发阻塞的主要原因，其最大值发生在 $\rho=1$ 时， $M=15$ 下的 6%，和 $M=7$ 下的不到 3%。因此，最长队列优先调度在实现高速的调度的同时，有效的减少了调度阻塞。

在对 FDL 缓存效率的模拟中，得到如图 5 所示结果。在较小业务负荷下 ($\rho \leq 0.5$)，随着实验模拟时间的加长，几乎趋近于 0 队列的平均长度为 $\rho(M+1)/2$ 。但业务负荷的增大到一定程度时，导致阻塞率的增加较快，而引起缓存效率的下降。

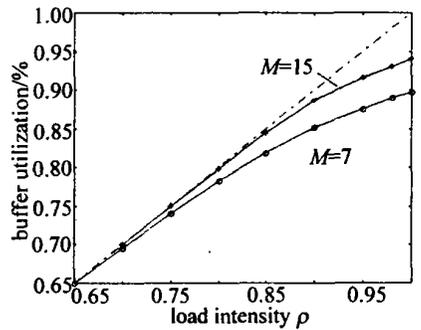


Fig 5 Buffer utilization in FDL buffer with LQP

4 结论

基于中间共享 FDL 光缓存结构的长队列优先 (LQP) 调度，调度时间快，使多个交换端口充分共享 FDL 缓存单元，从而降低了光突发交换网络的阻塞率，最长队列长度和缓存时间仅为 $M \times \Delta T$ 。在模拟仿真中，得到较好的阻塞性能结果，提高了定长方案下的光突发交换的交换性能。

参 考 文 献

[1] 池 灏, 赵焕东, 曾庆济 *et al*. 光突发交换的交换控制策略和光缓存配置 [J]. 光子学报, 2003 32(2): 129~132
 [2] 宋 欢, 李乐民, 王 晟. OBS 交换结构中 FDLs 和 TWC 的研究 [J]. 电子科技大学学报, 2003 32(3): 276~279.

$$E_c = E_f V_f + V_m E_m + \frac{4(\mu_f - \mu_m)^2 V_f V_m \eta_f + \eta_f \eta_m G_m}{(V_f \eta_f + V_m \eta_m) G_m + \eta_f \eta_m} \quad (19)$$

式中, $\eta_f = \frac{E_f}{2(1 - \mu_f - 2\mu_f^2)}$, $\eta_m = \frac{E_m}{2(1 - \mu_m - 2\mu_m^2)}$, $G_m = \frac{E_m}{2(1 + \mu_m)}$, μ_f , μ_m , E_f , E_m 分别为光纤光栅和弹性体的泊松比和弹性模量, V_f , V_m 分别表示光纤光栅和弹形体在复合体中所占的体积份额。

对多数复合材料, (19) 式右端最后一项较小, 可忽略, 由此得: $E_c = E_f V_f + E_m V_m$ (20)

可见, 如图 1 所示的复合材料, 其弹性模量取决于光纤布喇格光栅和弹性基体的弹性模量以及两种材料的体积份额。

该模型的轴向应力、中心波长相对偏移量之间的关系为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1 - p_e}{E_c} \sigma \quad (21)$$

表明复合圆柱体中的光纤布喇格光栅应力响应灵敏度系数为 $(1 - p_e) / E_c$, 是裸光纤光栅的 E_f / E_c 倍。

对于作为传感的光纤布喇格光栅来讲, 提高应力灵敏度的方法就是设法降低复合材料的弹性模量, 其途径有二, 一是尽可能降低弹性基体的弹性模量, 二是增大基底材料的份额。

3 结 论

对于光纤布喇格光栅来讲, 其外径为 0.125mm, 将它嵌入到弹性模量较小的弹性体中, 当弹性体的外径为 10mm 时, 则光纤布喇格光栅和光纤的体积与弹性基体的体积之比为 0.156%, 复合体的弹性模量主要取决于弹性体的弹性模量, 从理论上讲, 选择弹性模量小的弹性体, 可以使该复合柱体的弹性模量 E_c 比光纤的弹性模量小 3 到 4 个数量级; 当弹性体外径为 1mm 时, 复合材料的弹性模量 E_c 是光纤弹性模量的 1.59%, 可使复合材料的弹性模量降低一到两个数量级。弹性模量降低一个量级, 则同样大小应力作用下

所产生的应变将增大一个量级, 应变的增大将引起中心波长相对偏移量增加一倍, 这样就可实现光纤布喇格光栅应力响应的增敏。

若将光纤布喇格光栅封装在弹性模量较小的弹性体材料中, 就可以实现应力增敏的光纤布喇格光栅传感器。若封装直径为 5mm, 当以弹性模量为 3.2GPa 的环氧树脂作基底时, 封装后柱体的弹性模量变为 3.24GPa, 应力灵敏度系数变为 $2.42 \times 10^{-10} / \text{Pa}$, 比裸光纤光栅的提高了 21 倍; 当选用模量为 1.2GPa 的聚四氟乙烯作为基底时, 封装后其弹性模量变为 1.243GPa, 应力灵敏度系数变为 $6.3 \times 10^{-10} / \text{Pa}$, 比裸光纤光栅的提高了 56 倍。若能找到性能更为优异的弹性材料, 应力灵敏度就会得到更大的提高, 从而实现性能优异的应力传感器, 进而实现性能优异的压强和压力传感器。

本文中的结果对于设计光纤布喇格光栅应力传感器以及压强、压力传感器都具有较大的理论指导意义。

参 考 文 献

- [1] MAASKANT R, ALAVIE T, MEASURES R M *et al* Fiber optic Bragg grating sensors for bridge monitoring [J]. *Cement and Concrete Composites* 1997, 19(1): 21~33.
- [2] ECKE W, LATKA L, WILLSCH R *et al* Optical fiber Bragg grating strain sensor network for X-38 spacecraft health monitoring [J]. *Proc SPIE*, 2000, 4185: 888~891.
- [3] SPRIN V V, SHLYAGIN M G, MRIDONOV S V *et al* Fiber Bragg grating for petroleum hydrocarbon leak detection [J]. *Optics and Lasers in Engineering* 2000, 32: 497~503.
- [4] XU M G, REEKIE L, CHOW Y T *et al* Optical in-fiber grating high pressure sensor [J]. *Electron Lett* 1993, 29(4): 398~399.
- [5] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J *et al* Fiber grating sensors [J]. *IEEE J Lightwave Technol* 1997, 15(8): 1442~1463.
- [6] LU Y Q, GUO Zh Y, ZHANG Y *et al* Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer coated fiber Bragg grating [J]. *Electron Lett* 2000, 36(6): 564~566.
- [7] XU M G, CEIGER H, DAKN J P *et al* Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass bubble housing [J]. *Electron Lett* 1996, 32(4): 128~129.
- [8] 廖延彪. 光纤光学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 197~201.
- [9] 吴家龙. 弹性力学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1993. 175~184.

(上接第 155 页)

- [3] CALLEGATIE. Optical buffers for variable length packets [J]. *IEEE Commun Lett* 2000, 4(9): 292~294.
- [4] ZHANG J S, CAO M C, LUO F G *et al* Variable time-period optical switching: a novel OBS implementation [J]. *Chinese Opt Lett* 2003, 1(9): 513~516.
- [5] YOON M, QIAO C, DUKIT S. The effect of limited fiber delay lines on QoS performance of optical burst switched WDM networks [A]. *IEEE*

International Conf on Comm [C]. New Orleans Conference Record IEEE, 2000, 2: 974~979.

- [6] HARA IH, WADA N, KUBOTA F *et al* Content resolution using multistage fiber delay line buffer in a photonic packet switch [A]. *IEEE International Conf on Comm* [C]. New York Conference Record IEEE, 2002, 5: 2843~2847.
- [7] YOON M, JEONG M, QIAO C. A high speed protocol for bursty traffic in optical networks [J]. *SPIE*, 1997, 3230: 79~90.