

波分复用网络中无接收碰撞的访问控制协议¹

李一武 李乐民*

(清华大学电子工程系通信教研组 北京 100084)

*(电子科技大学光纤通信传输与网络技术国家重点实验室 成都 610054)

摘要 本文针对可调发送机 / 可调接收机 (TT/TR) 的单跳波分复用网络提出多种无接收碰撞的访问控制协议, 包括简单的无接收碰撞的数据传送策略 TS 和按最早发送时间进行优化的两种数据传送策略 ETS、METS。计算机模拟结果说明优化的数据传送方案可以获得十分优良的网络性能, 是 WDM 网络中行之有效的访问控制协议, 尤其是 METS 协议能在可调光器件的调谐时间较长时依然保持非常突出的性能。对于采用任意调谐时间的可调光器件的 WDM 网络, METS 具有相当重要的实用价值。

关键词 波分复用, 接收碰撞, 可调光器件, 访问控制协议

中图分类号 TN913.2

1 引言

波分复用 (WDM, Wavelength Division Multiplexing) 技术为充分利用光纤巨大的通信带宽提供了有效途径。它将单模光纤的可用带宽划分成许多独立的波长, 每个波长作为一个逻辑通道。网络中若干个用户可以同时在不同的逻辑通道上传送信息。WDM 可以广泛地应用于局域网、城域网和广域网中, 是下一代光纤通信网络的理想选择^[1]。

WDM 网络有 TT/TR、可调发送机 / 固定接收机 (TT/FR)、固定发送机 / 可调接收机 (FT/TR)、固定发送机 / 固定接收机 (FT/FR) 等四种基本类型^[2]。虽然 TT/FR 和 FT/TR 是两种最受欢迎的网络结构^[2-9], 但是它们存在严重的缺陷, 这就是: 网络中每个数据的传送都必须使用某个特定的波长, 使得网络性能受到一定的限制。采用 TT/TR 结构可以克服这个缺点。在 TT/TR 结构的 WDM 网络中, 每个数据传送都可以使用任意一个波长, 这样, 用户可以有更多的机会将信息尽早地发送出去。

在 WDM 网络中, 如果多个用户企图同时使用相同的波长发送数据、或者多个用户企图同时使用不同的波长向同一用户发送数据 (假设每个用户只有一个数据接收机), 那么数据发送时将造成接收碰撞。接收碰撞严重地降低了网络吞吐量, 此外碰撞的分组还要重发, 又增加了网络时延。因此, 减小和避免接收碰撞成为 WDM 网络中访问控制协议的重要目标之一^[2,3,5,10]。

在 TT/TR 结构中仅仅避免接收碰撞是远远不够的。因为 TT/TR 结构为优化选择发送波长提供了有利条件, 充分利用这个条件可以进一步减小网络时延, 增加网络吞吐量, 优化网络性能。例如在一个 3 个数据波长 ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) 的局域网中安排新的数据发送, 当前三波长分别第 4, 2, 0 时隙开始空闲。设新信息的目的地正调谐在 λ_2 上接收数据。如果忽略接

¹ 1997-04-17 收到, 1998-02-15 定稿
国家博士学科点专项科研基金资助

收机的调谐时间, 则接收机将在 2 时隙后准备好。这时如果随机选择发送波长, 则很可能选择波长 λ_1 , 这样信息至少要在第 4 时隙才能发送; 如果按最早发送信息的原则, 则可以选择 λ_2 或 λ_3 , 信息在第 2 时隙发送。

虽然可调光器件技术发展比较快, 但是至少在近期比较长的一段时间内可调光器件的调谐时间在分组交换式 WDM 网络中不应忽略不计^[6,7,11]。以比较实用的声-光式可调光器件为例, 它的调谐时间大约为若干微秒^[2]。假设在 1Gb/s 的 WDM 网络中单位分组长度固定为 1000bit, 即每个时隙长为 $1\mu\text{s}$, 那么光器件每次调谐都要花费好几个时隙。

本文针对 TT/TR 结构的 WDM 网络提出了几种无接收碰撞的访问控制协议。首先提出了一种能消除接收碰撞的简单的数据传送策略 TS(Traditional Scheduling), 其中发送波长由用户随机选择。接着对发送波长按最小发送时延进行优化选择, 提出了最早发送时间的数据传送策略 ETS(Earliest Transmission Scheduling)。接下来又在 ETS 中尽量减小可调光器件调谐时间造成的影响, 提出了 METS(Modified ETS) 方案。计算机模拟结果充分说明了优化波长选择可以显著地改善网络性能, 尤其是 METS 方案, 不仅可以取得更加优越的网络性能, 而且随着可调光器件的调谐时间的增加, 其性能优势越发突出。因此优化的数据传送方案是 WDM 网络中十分有效的访问控制协议, 其中 METS 还对采用任意调谐时间的可调光器件的 WDM 网络具有相当重要的实用价值。

2 网络结构和基本收发过程

本文研究 N 个用户、 W 个数据波长和 1 个控制波长的无源星形 WDM 局域网。网络中每个用户配一个全频带快速可调的数据波长收发机和固定频率的控制波长收发机。网络结构框图如图 1。可调光器件的调谐时间均为 t_i 。 t_i 是数据波长接收机和发送机中最长的调谐时间。每个用户都有一个处理器和一个网络状态表。网络状态表存储各波长和各接收机的状态, 包括:

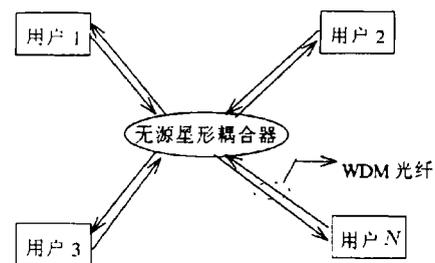


图 1 网络的物理拓扑结构

(1) 波长就绪时间表 (CAT, Channel Available Time): 它存储了各个波长开始空闲的时隙。CAT 有 W 个元素, 其中第 i 号元素 $t_i = j$ 表明波长 i 从第 j 时隙起空闲。特别地, 如果 j 等于 0, 表明波长 i 从当前时隙起空闲。或排序的波长就绪时间表 (SCAT, Sorted Channel Available Time): 这是将各个波长开始空闲的时隙经升序排列后得到的。SCAT 有 W 个元素, 其第 i 号元素 $\{w_i, t_i\} = \{j, k\}$ 表明当前第 i 个开始空闲的波长是 j , 它的空闲起始时隙为 k 。特别地, 如果 k 等于 0, 表明波长 j 从当前时刻起空闲。

在数据传送策略的执行中, CAT 和 SCAT 两个表只需要一个, 具体选择见下文。

(2) 接收机就绪表 (RAT, Receiver Available Time): 这个表存储了每个接收机开始空闲的时隙。RAT 有 N 个元素, 其中第 i 号元素 $r_i = j$ 表明用户 i 的接收机从第 j 时隙起空闲。特别地, 如果 j 等于 0, 表明用户 i 从当前时刻起空闲。

(3) 接收机位置表 (RPT, Receiver's Position Table): 这个表存储了每个接收机当前所调谐的波长在 SCAT 表中的位置。RPT 有 N 个元素, 其中第 i 号元素 $p_i = j$ 表明用户 i 的接收机当前所调谐的波长是 SCAT 表中第 j 项的波长。

控制波长对 N 个用户时分复用。源用户发送信息之前, 先用他的控制时隙发送申请, 申请包括信息的目的地和信息分组数目。每个信息包含若干个长度为 1 时隙的分组。申请中不包含信息使用的波长。信息使用的波长由下面的数据传送策略决定。申请经过 τ 时隙后由无源星形耦合器返回用户, 然后顺次进入处理器。每个处理器同步地执行数据传送策略, 因此每个用户对每个申请都得到相同的发送安排 (指发送的时间和波长)。每个处理器每时隙执行 i (i 是当前时隙网络中提出的申请数目) 次数据传送策略, 每次确定一个申请所使用的波长和发送时间, 并修改网络状态表。下文设当前处理的申请发向用户 d , 信息长度为 m 个分组。

3 简单的数据传送策略 (TS)

TS 是一种简单的能避免接收碰撞的数据传送方法。其中用户可以任意选择发送波长。TS 的执行需要 RAT 和 CAT, 实现过程如下:

(1) 确定发送波长 c 。取一个 $1 \sim W$ 间均匀分布的随机数, 它就是所选定的波长 c 。

(2) 确定收发时隙。设 $R \times T$ 表示申请的第一个分组到达目的地的时隙, 则: $R \times T = \max(\max(t_c, t_t) + \tau, r_d + t_t)$ 。其中: $r_d + t_t$ 表示 d 接收机已经调谐好在波长 c 上的时隙; $\max(t_c, t_t)$ 表示发送机准备好发送信息的时隙; 可见, 信息开始发送的时隙为: $T \times T = R \times T - \tau$ 。

(3) 修改网络信息表。 $t_c = T \times T + m$; $r_d = R \times T + m$ 。

上面第二步保证了数据到达目的地时接收机已经空闲, 并且调谐在所选定的发送波长上, 因此数据发送无接收碰撞。

4 最早发送时间的数据传送策略 (ETS)

在 TS 中如果对发送波长进行优化选择, 就可以使信息更早地发送出去。本文按时延最短的原则提出了优化方案, 称为最早发送时间的数据传送策略 ETS。ETS 需要 RAT 和 SCAT, 实现过程如下:

(1) 确定发送波长 c 。SCAT 中 w_1 是当前所有波长中能最早空闲的波长, 因此 $c = w_1$ 。

(2) 确定收发时间。类似 TS 方案, $R \times T = \max(\max(t_c, t_t) + \tau, r_d + t_t)$; $T \times T = R \times T - \tau$ 。

(3) 修改网络信息表。 $t_c = T \times T + m$; $r_d = R \times T + m$ 。

(4) 调整 SCAT。SCAT 的调整目标是使表依然按波长开始空闲时间的升序排列。因为表中只有第一项做了改动, 因此只需把这一项调整到适当位置。

5 改进的最早发送时间数据传送策略 (METS)

注意到 ETS 中接收机准备好接收当前数据的时间为 $r_d + t_t$, 它表明接收机接收完上一个信息后必须再花 t_t 时间调谐到所选定的发送波长 (设为 λ_i) 上。其实, 如果接收机正好使用 λ_i 接收上一个信息, 那么它可以不必经过调谐就能接收当前信息。据此我们得到改进型的 ETS, 称为 METS。METS 的执行需要 RAT、RPT 和 SCAT, 其实现过程如下:

(1) 计算以接收机 d 当前的调谐波长作为发送波长时, 接收机准备好接收的时隙 $R \times T_0$ 。设 $j = p_d$, 即接收机 d 最后一次调谐的波长为 SCAT 中的第 j 项。则 $R \times T_0 = \max(\max(t_j, t_t) + \tau, r_d)$ 。经过化简, 可以得到: $R \times T_0 = \max(t_j, t_t) + \tau$ 。

(2) 计算以 w_1 作发送波长时, 接收机准备好接收的时隙 $R \times T_1$ 。 $R \times T_1 = \max(\max(t_1, t_t) + \tau, r_d + t_t)$ 。

(3) 确定发送波长和收发时间。设选定的波长是 SCAT 中的第 s 项。若 $R \times T_0 \leq R \times T_1$, 则 $s = j$, $R \times T = R \times T_0$; 否则取 $s = 1$, $R \times T = R \times T_1$ 。信息的第一个分组开始发送的时隙为: $T \times T = R \times T - \tau$ 。

(4) 修改网络信息表。 $t_s = T \times T + m$;

(5) 调整 SCAT。因为 SCAT 中只有第 s 项做了改动, 因此只需把这一项调整到适当位置。不妨设 s 项经过调整后变成了第 k 项。

(6) 修改 RPT。对于 RPT 的第 d 项, 有 $p_d = s$; 如果原来 RPT 的值为 s , 则新的 RPT 值变成 k ; 如果原来 RPT 的值大于 s 但不大于 k , 则将原有的 RPT 值减小 1; 其他情况下 RPT 值保持不变。

6 性能模拟和分析

本文对以上三种数据传送策略 TS, ETS, METS 进行了计算机模拟, 我们假设:

- (1) 每个信息的长度是均匀分布于 $[1, L]$ 之间的随机数;
- (2) 从用户为某个信息发送申请开始, 到该信息全部发送完毕之前的 τ 时隙为止, 用户不能为新的信息发出申请, 这段时隙称为申请禁止期。在其他时段, 用户可以发送申请;
- (3) 每个信息的目的地均匀地分布于 $1 \sim N$ 之间;

在数据传送策略的执行中, 各个波长会产生一些中间时隙段, 他们的前后时隙都安排了信息传送。由于数据传送策略每次都从波长的最终空闲起始处开始安排信息传送, 因此这些中间时隙不可能为以后的信息所利用, 我们称之为盲区。盲区所占的比率称为盲区率。盲区的存在限制了通道利用率, 妨碍了信息更早地安排发送。盲区率的大小在一定程度上反映了数据传送的效率。

可以证明, 在相同的网络参数条件下, METS 比 ETS 的盲区率小。假设 METS 与 ETS 从相同的网络状态开始安排发向接收机 d 的数据传送, 并且网络参数相同。接收机 d 最后一次调谐的波长为 w_j (即 SCAT 中第 j 项)。如果 METS 没有选中 w_j 为发送波长, 那么它和 ETS 有相同的盲区。否则由数据传送策略知下式成立:

$$\max(\max(t_1, t_t) + \tau, r_d + t_t) > \max(\max(t_j, t_t) + \tau, r_d), \quad (1)$$

上式中 $t_j \geq t_i$ 且 $t_j \geq t_d$, 因此 (1) 可以化简成:

$$r_d + t_t \geq \max(t_j, t_i) + \tau. \quad (2)$$

根据盲区的定义, 可得 ETS 和 METS 的盲区分别为: $B_{ETS} = r_d + t_t - \tau - t_1$, $B_{METS} = \max(t_j, t_i) - t_j$, 因此 $B_{ETS} = (r_d + t_t) - \tau - t_1 > (\max(t_j, t_i) + \tau) - \tau - t_1 = \max(t_j, t_i) - t_1 \geq \max(t_j, t_i) - t_j = B_{METS}$, 即 $B_{ETS} > B_{METS}$. 可见在一般情况下 METS 算法的盲区总是能小于或等于 ETS 的盲区, 因此, METS 比 ETS 的盲区率小.

图 2 是三种数据传送策略在参数 $N = 30 \sim 50$, $\tau = 2$, $t_t = 10$, $L = 20$, $W = 10 \sim 25$ 时的盲区率比较, 从中可以看出:

(1) TS 方案的盲区率居高不下. 在图 2 所示参数下 TS 的盲区率都超过了 45%. 可见 TS 的数据传送效率不高. 这主要是因为 TS 仅仅是随机地选择发送波长, 而没有对发送波长进行优化选择.

(2) ETS 的盲区率随波长数目的减少而减少. 这是因为当波长数目比较少时, 在每个波长上等待发送的分组较多, ETS 通过选择能最早发送信息的波长, 缓解了波长的紧张状况, 因此盲区率比较小.

(3) 在其他参数不变时, 增加用户会使 TS 的盲区率增大, 而 METS 和 ETS 的盲区率却会下降. 如图中在 $W = 15$ 处, 当 N 从 30 增加到 50 时, TS 的盲区率从 0.49531 上升到了 0.53788; 在同等条件下, ETS 的盲区率则从 0.49260 下降到了 0.36943; METS 的盲区率从 0.15718 下降到了 0.04281. 这表明随着用户数的增加, 优化的数据传送策略的发送效率能够提高, 而简单方案的数据发送效率则会降低. 可见, 优化的数据传送策略比简单的方案更适用于大量用户的网络.

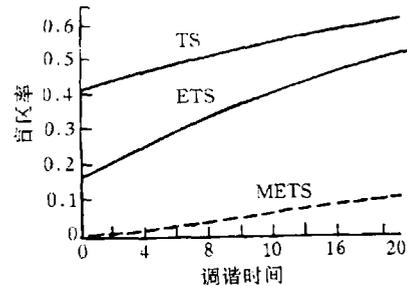
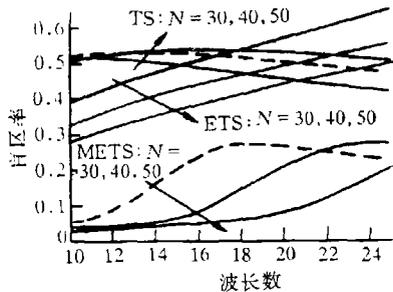


图 2 三种算法的盲区率随网络波长数的变化曲线 图 3 三种算法的盲区率随调谐时间的变化曲线

图 3 是三种数据传送策略在参数 $N = 40$, $\tau = 2$, $t_t = 0 \sim 20$, $L = 20$, $W = 12$ 时的盲区率随可调光器件的调谐时间的变化曲线, 它说明 METS 受调谐时间的影响比较小, 而 ETS 和 TS 的发送效率随调谐时间的增长以较快的速率降低. 因此, METS 更适用于任意调谐时间的网络.

我们再从单波长吞吐量 (简称吞吐量) 和平均信息时延 (简称时延) 两个方面比较三种算法的性能差别. 单波长的吞吐量是指单个波长每个时隙平均发送的分组数. 平均信息的时延是指一个信息从用户为之发送申请开始到该信息的最后一个分组接收完毕为止所需的时隙数, 其中处理器的处理时间忽略不记.

图 4 和图 5 是三种算法在网络参数为 $N = 30 \sim 50$, $L = 20$, $\tau = 2$, $t_t = 10$, $W = 10 \sim 25$ 下的性能比较曲线, 从中我们清楚地看到: 在相同参数下, ETS、METS 都比 TS 明显地提高了吞吐量, 同时又极大地降低了网络时延。例如当 $N = 40$, $W = 15$ 时, TS 的时延高达 83.776, 吞吐量只有 0.36161; 采用 ETS 后时延下降到 51.542, 降低了 38.78%, 吞吐量上升到 0.59410, 提高了 64.29%。采用 METS 后效果更佳, 在相同条件下, 时延只有 33.888, 比 TS 降低了 60.74%, 吞吐量上升到 0.94466, 比 TS 提高了 161.24%。

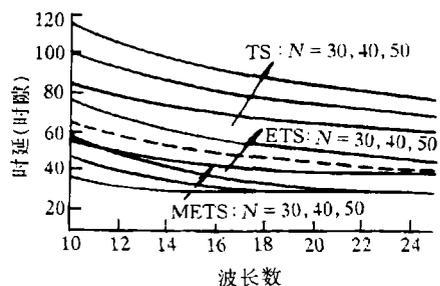


图 4 三种算法的时延随波长数改变的曲线

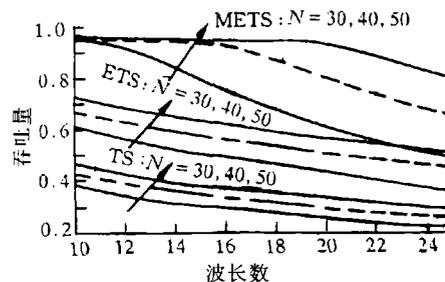


图 5 三种算法的吞吐量随波长数改变的曲线

这是因为 TS 随机地选择发送波长, 它经常选中较晚开始空闲的波长。在等待所选定的波长空闲时, 网络中其他波长可能已经空闲。而 ETS 和 METS 总是选择使信息时延最短的波长发送, 减小了平均等待队长, 加快了信息的传送速率, 不仅缩短了信息时延, 而且增加了吞吐量, 其中 METS 还考虑了可调器件的调谐时间对数据传送的影响, 因此取得了更加理想的效果。

图 6 和图 7 是三种算法在网络参数为 $N = 40$, $L = 20$, $\tau = 2$, $W = 12$ 时的性能随调谐时间的变化曲线, 它们说明随着调谐时间的增长, METS 的优越性更加显著。图中当调谐时间从 0 上升到 20 时, TS 的时延从 73.156 上升到了 115.990, 上升了 58.55%; ETS 的时延从 44.875 上升到了 75.013, 上升了 67.16%; METS 的时延从 37.991 上升到了 42.202, 只上升了 9.98%。

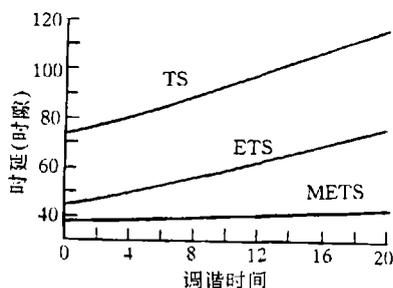


图 6 三种算法的时延随调谐时间的变化曲线

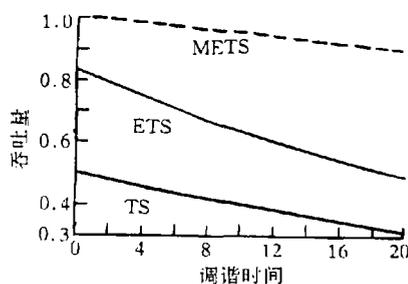


图 7 三种算法的吞吐量随调谐时间的变化曲线

7 结 论

本文针对 TT/TR 类型的 WDM 网络提出了几种避免接收碰撞的数据传送方法, 包括

TS, ETS 和 METS。计算机模拟结果表明, TS 在各种参数下的发送效率都较低; ETS 可以在较少的发送波长下获得较高的发送效率; 而 METS 总能取得优于 ETS 的发送效率。随网络用户数的增加, ETS 和 METS 的发送效率不断提高, 而 TS 的发送效率却不断降低, 因此 ETS 和 METS 更适用于大量用户的网络。

采用优化的数据传送策略能有效地提高网络吞吐量, 同时又极大地降低网络时延。在相同的网络参数条件下, ETS 的吞吐量大约比 TS 提高 60%, 同时时延大约下降 40%。可见, 优化的波长选择方案是 WDM 网络中行之有效的数据传送策略。

METS 的性能更加优越, 其吞吐量可以比同参数的 TS 提高 160%, 同时时延大约下降 60%。随着调谐时间的增长, TS 和 ETS 的性能都下降得比较快, 但 METS 的性能却变化得比较小, 所以 METS 对于采用任意调谐时间的可调光器件的 WDM 网络, 具有更加重要的实用价值。

值得一提的是, 如果采用 TT/FR 或 FT/TR 网络结构, 就无法进行波长选择的优化。当网络的业务量均匀分布时, 只能获得相当于采用 TS 的效果。本文大量的实验数据说明进行波长选择的优化可使网络性能得到巨大的改进。所以, 采用 TT/TR 结构不失为获得高性能的 WDM 网络的理想选择。

参 考 文 献

- [1] Paul E. Green, Jr. Optical networking update. *IEEE J. of Selected Areas in Communications*, 1996, 14(5): 764-778.
- [2] Biswanath Mukherjee. WDM-based local lightwave networks part I: single-hop systems. *IEEE Network*, 1992, 6(1): 12-27.
- [3] Chlamtac I, Fumagalli A. Performance of Reservation based (Quadro) WDM star networks. *IEEE INFOCOM—The Conference on Computer Communications*, Florence, Italy: 1992, 2115-2123.
- [4] Bogineni K, Sivalingam K M, Dowd P W. Low-complexity multiple access protocols for wavelength-division multiplexed photonic networks. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 1993, 11(5): 590-604.
- [5] Sudhakar G N M, Kavehrad M, Georganas N D. Access protocols for passive optical star networks. *Computer Networks and ISDN Systems*, 1994, 26(6-8): 913-930.
- [6] Tridandapani S, Meditch J S, Somani A K. The MaTPi Protocol: Masking Tuning Times Through Pipelining in WDM Optical Networks. *INFOCOM*, Toronto, Canada: 1994, 1528-1535.
- [7] Levine D A, Akyidiz I F. PROTON: A media access control protocol for optical networks with star topology. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1995, 3(2): 158-168.
- [8] Papadimitriou G I, Maritsas D G. Learning automata-based receiver conflict avoidance algorithms for WDM broadcast-and-select star networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1996, 4(3): 407-411.
- [9] Papadimitriou G I, Maritsas D G. WDM star networks: hybrid random access and reservation protocols with high throughput and low delay. *Computer Networks and ISDN Systems*, 1996, 28(6): 773-787.
- [10] Borella M S, Mukherjee B. Efficient scheduling of nonuniform packet traffic in a WDM/TDM local lightwave network with arbitrary transceiver tuning latencies. *INFOCOM*, Boston, MA: 1995, 129-137.
- [11] Akyidiz I F, Levine D A. A collision-free MAC protocol for optical star LANs. *Computer Networks and ISDN Systems*, 1996, 28(3): 371-390.

THE RECEIVING-COLLISION-FREE MEDIA ACCESS PROTOCOLS FOR WDM NETWORKS

Li Yiwu Li Lemin*

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

**(Nat. Key Lab. of Optic Fiber Transm. and Comm. Networks, UESTC, Chengdu 610054)*

Abstract This paper presents several protocols without receiving collisions for WDM networks with tunable transmitter/tunable receiver architecture. These protocols include the simple non-receiver-collision protocol (called TS), the optimized scheduling (called ETS) and the modified ETS (called METS). Computer simulation indicates that these algorithms achieve extremely good performance. They are the efficient media access protocols for WDM networks. Moreover, the METS algorithm shows more outstanding performance with the increasing of the tuning time of optical device. It is with great practical value for the WDM network with arbitrary transceiver tuning latencies.

Key words WDM, Receiving collision, Tunable optical device, Media access protocol

李一武: 女, 1970 年出生, 博士后, 主要从事波分复用网络和光纤接入网的研究.

李乐民: 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 研究方向为通信与电子系统.