

固定选路的波分复用全光网中的波长分配算法¹

徐世中 李乐民 王 晟

(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

摘 要 该文研究了动态业务下, 无波长变换的波分复用光传送网采用固定选路时的波长分配问题, 提出了一种中心式的波长分配算法 - 最小影响算法。该算法能精确地描述某个波长的分配对全网状态的影响, 因而能够更有效地使用网络资源。计算机仿真表明, 如果用阻塞概率来衡量, 该波长分配算法优于文献中已有的典型算法。

关键词 波分复用网, 波长分配算法, 固定选路, 动态业务

中图分类号 TN919.3

1 引 言

近年来, 能实现全光传输和交换的全光网已成为研究的热点问题之一。采用波长分配和路由选择的波分复用 (WDM, Wavelength Division Multiplexing) 光传送网被认为是下一代高速广域骨干网的最有竞争力的候选者。WDM 和光交换技术使网络具有更大的带宽和灵活性, 多个用户能够使用同一根光纤中的不同信道 (即波长) 同时传输数据, 而每个信道都可按当前电子处理数据的极限速率进行传输, 并且传输的数据格式和速率也可以不同。

WDM 光传送网由一组通过光纤互连的节点构成。在每个节点中都配置了可动态设置的光交换机。光交换机可将任一输入端口某个波长上的数据交换输出到指定输出端口的同一波长上。这里我们假定交换机不具备波长变换能力, 即任一波长上的数据不能变换到别的波长上。不引入波长变换能大大降低交换机的成本, 但所建光路从端到端都需采用同一波长 (波长连续约束)。这样会导致网络资源利用率的下降, 因为可能出现这样的情形: 沿某条通路的每条链路上都有一条空闲信道, 但由于它们不是同一波长, 导致无法建立光路, 光路请求将被拒绝, 这就是波长阻塞 (Wavelength blocking)。

路由选择及波长分配 (RAW, Routing and Assignment of Wavelength) 问题是 WDM 光传送网中的一个重要问题。它是指给定一组节点间的全光连接 (光路 / 连接建立) 请求后, 寻找从源节点到目的节点的路由, 并在这些路由上分配波长。在研究 RAW 问题的文献中, 通常将网络支持的业务分为两类: (1) 静态业务: 给定一组连接建立请求, 需要为这些请求寻找路由并在其路由上分配波长, 以使某些性能指标达到最优 (如全网吞吐量最大, 所需波长数或光纤数最少等等); (2) 动态业务: 光路请求随机达到和离开网络, 相应的性能指标通常是光路请求的阻塞率。

由于 RAW 问题是个 NP-C (非确定型的多项式算法 - 完全) 问题, 要在合理的运算时间内解决大型网络的 RAW 问题常常是不可能的, 所以文献中大多都将 RAW 问题强行拆分成选路子问题和波长分配子问题分别解决。固定选路 (Fixed routing) 是指为任意源、目的节点对指定唯一的路由。当光路请求到达时, 只在相应的固定路由上分配波长以建立光路。如果采用固定选路, RAW 问题就能简化为波长分配问题, 从而大大简化网络的控制和管理。本文提出了一种波长分配算法 - 最小影响算法, 用于在无波长变换、动态业务、固定选路的 WDM 网中的波长分配。第 2 节给出了波长分配问题的描述, 第 3 节详细描述了最小影响算

¹ 1999-05-09 收到, 1999-10-27 定稿

国家自然科学基金重大项目“WDM 全光网基础研究” (编号 69990540) 资助课题

法, 第 4 节通过计算机仿真比较了最小影响算法与已有的波长分配算法的性能, 第 5 节为结论。

2 波长分配问题

假定网络中已建立了一组光路(已分配了波长)。当新的光路建立请求到达时, 波长分配算法的任务就是要沿预定的路由为它分配波长, 同时要求在不对已有光路产生任何影响的条件下使阻塞概率最小。由于波长分配问题是一个 NP-C 问题, 所以需采用启发式算法。

设 p 代表一对源和目的节点间的固定通路, $L(p)$ 代表 p 所经过的所有链路的集合。考虑多光纤网, 即一条链路上有多根光纤。每根光纤都能支持 W 个波长, 每条链路上有 F 根光纤, 也就是说每条链路的每个波长能提供 F 个信道。令 $L_c(l, \lambda)$ 为链路 l 在波长 λ 上的剩余信道数。任意通路 p 在波长 λ 上的可用信道数 $P_c(p, \lambda) = \min_{l \in L(p)} L_c(l, \lambda)$ 。如果 $P_c(p, \lambda) > 0$, 则称 λ 为 p 上的可用波长。对于任意链路 $l \in L(p)$ 和可用波长 λ , 如果 $L_c(l, \lambda) = P_c(p, \lambda)$, 则链路 l 是 p 在 λ 上的瓶颈链路。通路 p 上的所有可用波长构成 p 的可用波长集 $A(p)$ 。令 p^* 代表新到达的光路请求对应的固定通路。如果 $A(p^*) = \phi$, 则拒绝该请求; 否则波长分配算法要在 $A(p^*)$ 中选择一个波长建立光路。还需说明的是, 一对源、目的节点间可存在多条并行的连接, 即沿同一通路允许存在多条光路。

文献中已提出了多种用于固定选路的 WDM 网中的波长分配算法。随机 (Random) 算法^[1] 简单地在可用波长集中随机挑选一个波长来建立光路。首次命中 (FF, First-Fit) 算法^[1] 则是将所有波长统一编号, 挑选编号最小的可用波长建立光路。随机和 FF 算法在选择波长时并不考虑网络的当前状态。分配波长时还可考虑网络的状态, 这样做有助于提高算法性能。最小负载 (LL, Least-Loaded) 算法^[2] 选择沿 p^* 可用信道数最多的波长, 最大总和 (MS, MaxSum) 算法^[2] 选择在 p^* 的所有链路上平均利用率最低的可用波长, 最大利用率 (MU, Most-Used) 算法^[3] 选择在全网中利用率最高的波长, 全局最大总和 (MΣ, MaxSum) 算法^[4] 选择波长时保证分配该波长后全网总的可用信道数最大。

3 “最小影响”算法

本节提出了一种全局波长分配算法 - 最小影响 (LE, Least Effect) 算法。该算法能更精确地描述新建光路对全网状态的影响, 据此进行的波长分配能更有效地促进网络资源的合理分配, 从而改善全网的阻塞概率性能。该算法的实现与网络的拓扑结构和业务分布无关, 换言之, 它适用于任意拓扑结构和业务分布的网络。

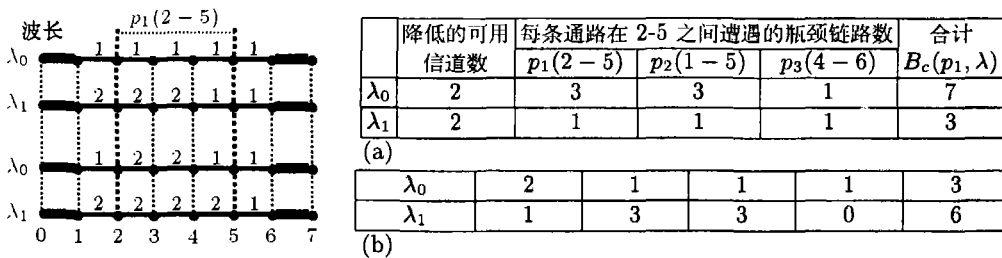


图 1 LE 算法波长分配的两个例子 (双光纤、双波长的网络)

如果将波长 λ^* 分配给 p^* 建立光路, 则网络中任意通路 p 在 λ^* 上的可用信道数至多会降低 1。虽然所有可能通路 p 在 λ^* 上降低的信道数的总和可以用来代表新光路的建立对全

网状态的影响 (M Σ 算法), 但据此进行的波长选择可能不是最优的。下面的例子说明即使选择波长 λ_0 和 λ_1 降低的可用信道数相同, 但它们对全网状态的影响是不同的。

图 1 给出了双光纤、双波长的网络中的一段, 线段上标识的是相应链路在相应波长上的剩余信道数。图 1(a) 和 1(b) 分别对应光路请求到达时两种不同的网络状态。假定到达的光路请求为 p_1 (节点 2 到 5)。图中标为阴影的链路的波长信道被与 p_1 无共享链路的其他连接占用, 因而为 p_1 分配波长将不会影响到这些连接。与 p_1 有共享链路的通路是 p_2 (从节点 1 到 5) 和 p_3 (从节点 4 到 6)。在图 1(a) 中, 分配波长 λ_0 和 λ_1 降低的可用信道数都是 2, M Σ 算法将选择波长 λ_0 ; 图 1(b) 中分配波长 λ_0 和 λ_1 降低的可用信道数分别为 2 和 1, M Σ 算法将选择波长 λ_1 。但是需要指出的是, 同样是可用信道数下降 1, 但对网络的影响是不同的。例如图 1(a) 中分配波长 λ_0 和 λ_1 都会导致通路 p_2 的可用信道数各自下降 1, 对于 λ_0 , 与 p_1 共享的链路中 l_{23} , l_{34} 和 l_{45} 都是 p_2 的瓶颈链路; 而对于 λ_1 , 仅有 l_{45} 是 p_2 的瓶颈链路。选用波长 λ_0 对 p_2 的影响明显大于选用 λ_1 的影响。

基于以上的认识, 本文提出了“最小影响”波长分配算法, 使得分配后对网络造成的影响最小。对通路 p^* 的每个可用波长 λ 定义瓶颈计数器 $BC(p^*, \lambda)$ 。与 p^* 有共享链路的所有通路 (包括 p^*) 的集合称为 p^* 的“邻域” $G(p^*)$, 即如果 $L(p) \cap L(p^*) \neq \emptyset$ 则 $p \in G(p^*)$ 。对于任意 $p \in G(p^*)$ 、任意链路 $l \in L(p) \cap L(p^*)$ 和可用波长 λ , 如果 $L_c(l, \lambda) = P_c(p, \lambda)$, 则将相应的 $BC(p^*, \lambda)$ 累加 1。最小影响波长分配算法将选择使 $BC(p^*, \lambda)$ 取得最小值的 λ^* 分配给 p^* 。相应的数学描述如下:

$$\min_{\lambda \in A(p^*)} BC(p^*, \lambda) = \sum_{p \in G(p^*)} \sum_{l \in L(p) \cap L(p^*)} D(L_c(l, \lambda), P_c(p, \lambda))$$

$$\text{其中指示函数 } D(L_c(l, \lambda), P_c(p, \lambda)) = \begin{cases} 1, & \text{如果 } L_c(l, \lambda) = P_c(p, \lambda) \\ 0, & \text{如果 } L_c(l, \lambda) \neq P_c(p, \lambda) \end{cases}$$

图 1(a) 还给出了分配不同波长时 p_1 , p_2 和 p_3 将在节点 2-5 间遭遇的瓶颈链路数, 以及合计后得到的 $BC(p_1, \lambda)$ 值。由于 $BC(p_1, \lambda_0) = 7 > BC(p_1, \lambda_1) = 3$, 最小影响算法将选择 λ_1 分配给 p_1 。对于图 1(b), 尽管分配波长 λ_0 将导致全网可用信道数减少 2, 而分配 λ_1 只减少 1, 但由于对应的 $BC(p_1, \lambda_1) = 6 > BC(p_1, \lambda_0) = 3$, 所以最小影响算法将选择 λ_0 分配给 p_1 。

下面导出了最小影响算法的时间复杂度。因为初始化操作可以离线完成, 所以不考虑它对时间复杂度的影响。假定用数组来记录每条链路上每个波长上的剩余信道数, 访问或更新其中任一数据需要 $O(1)$ 个单位时间。令 M 为全网通路总数 (源、目的节点对数)。通路的长度定义为所经过的链路数, 令 H 为通路长度的最大值。假定新到达光路请求为 p^* , 确定通路 p^* 的每条链路 l 在波长 λ 上的剩余信道数 $L_c(l, \lambda)$ 需时为 $O(H)$ 。其邻域 $G(p^*)$ 所含的通路数至多为 M , 而确定一条通路 p 在波长 λ 上的可用信道数 $P_c(p, \lambda)$ 所需进行的比较次数至多为 $O(H)$, 则确定 $G(p^*)$ 中所有通路的可用信道数需比较 $O(MH)$ 次。考虑到波长数为 W , 要得到所有的瓶颈计数器 $B_c(p^*, \lambda)$ 的值所需进行的比较和累加次数为 $O(WMH)$ 。需要指出的是, 对于 N 个节点的网络, 必有 $H < N$ 和 $M < N^2$ 。所以在最坏的情况下, LE 算法的时间复杂度为 $O(WN^3)$, 这与 M Σ 算法的复杂度相同。

4 计算机仿真结果

本节采用计算机仿真的方法比较了最小影响 LE 算法与已有的算法在两种网络拓扑下的阻塞概率。所有的仿真实验都是在 Pentium II 450 高档微机上利用 RAW-Simulator 仿真软件进行的。该软件由国家自然科学基金重大项目资助, 电子科技大学光纤通信国家重点实验室负责设计开发的。图 2 所示为用于仿真的两种网络拓扑, 第一种是 20 个节点单向环网, 第二种是 5×5 格型环网 (Mesh-Torus), 共 25 个节点, 50 条双向链路。用以比较的其他算法是 $M\Sigma$, MU, FF, LL 和随机算法。此外, 本文还给出了允许波长变换 (WC, Wavelength Conversion) 时的光路请求阻塞概率以供比较。

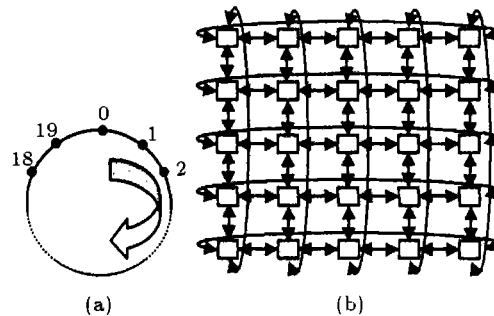


图 2 计算机仿真采用的网络拓扑
(a) 单向环网示意图 (b) 5×5 格型环网示意图

仿真时假定光路连接请求按参数为 β 的泊松过程到达网络, 即全网的总到达率为 β 。全网所有节点对间的业务强度都相同, 即支持的业务为均匀业务。允许一对节点之间同时存在多条光路。光路建立后的服务时间 (保持时间) 服从均值为 $1/\mu$ 的负指数分布。在仿真时, 将平均服务时间设定为一个单位时间。一旦光路建立请求被拒绝, 则立即被丢弃, 即无等待队列。为了确保网络运行进入平稳状态, 对每种网络的每个到达率, 都生成了 10^6 个光路建立请求。在进行统计之前, 先处理 1000 个光路请求使系统“预热”。

图 3(a) 和 3(b) 分别给出了单光纤网 ($F = 1$) 和多光纤网 ($F = 10$) 的情况下, 单向环网中不同算法在不同波长数 W 下的阻塞概率性能。对不同的波长数, 设定单个波长承受的负载都相同。当 $F = 1$ 时, 单个波长承受的负载为 1 个爱尔兰; $F = 10$ 时, 负载为 1.6 个爱尔兰。图 3(a) 表明对于单光纤单向环网, 本文提出的 LE 算法与 $M\Sigma$ 和 MU 算法的性能非常接近。这是因为单向环网的通路图 (Path graph/Conflict Graph) 的直径为 2, 当 $F = 1$ 时, LE 和 $M\Sigma$ 算法将以很高的概率选中全网利用率最高的波长 (MU)^[4]。由于每个波长至多有一个可用信道, 所以 FF 和 LL 算法是完全等价的。当 $F = 10$ 时, LE 算法优于已有的所有算法。随着光纤数 F 的增加, LE 的阻塞概率性能与已有算法的性能差距越来越大。并且不论是多光纤还是单光纤网, 随着波长数 W 的增加, 算法之间的性能差距也越来越大。分配波长时考虑网络状态的算法 (LL, MU, $M\Sigma$ 和 LE) 优于不考虑的算法 (随机和 FF)。一般情况下, 分配波长时利用的信息越多, 算法的性能越好。例如, 在所有情况下, 利用全局信息的 LE 和 $M\Sigma$ 算法都优于只利用局部信息的 LL 算法。但在多光纤环网中, LL 算法优于利用全局信息的 MU 算法。这说明, 能否充分有效地利用信息是算法性能的关键。

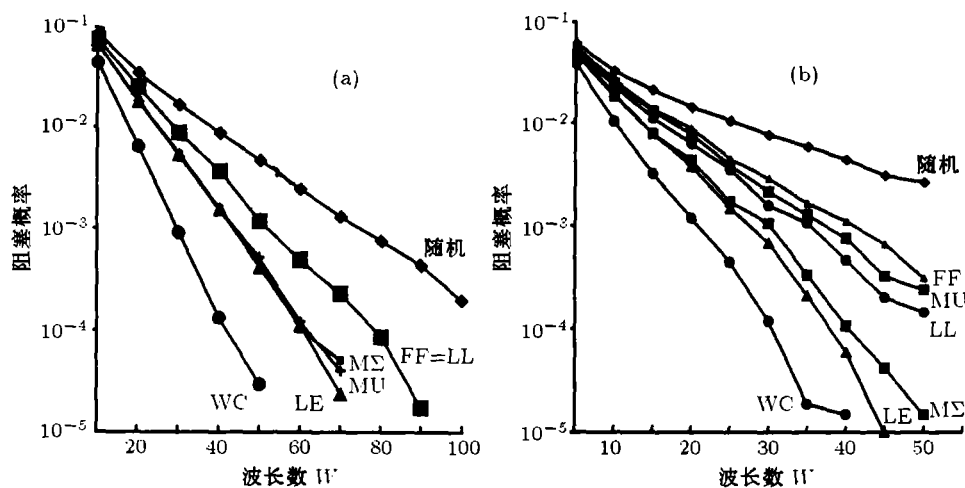


图3 单向环网中不同算法的阻塞概率
(a) 单光纤单向环网 (b) 多光纤单向环网 $F=10$

图4(a)和4(b)分别给出了单光纤网($F=1$)和多光纤网($F=5$)的情况下, 5×5 格型环网中不同算法在不同波长数 W 下的阻塞概率性能。当 $F=1$ 时,单个波长承受的负载为10个爱尔兰; $F=5$ 时,负载为16个爱尔兰。采用了文献[1]中的 $X-Y$ 最短路算法确定固定路由。图中显示,即使在单光纤网中,LE算法仍优于已有算法,但性能差异不大。并且 $F=5$ 的多光纤网中LE算法的性能与WC的性能也非常接近。这说明在多光纤格型环网中,即使以很大的代价在节点中引入波长变换,对阻塞概率性能的改善也是十分有限的。

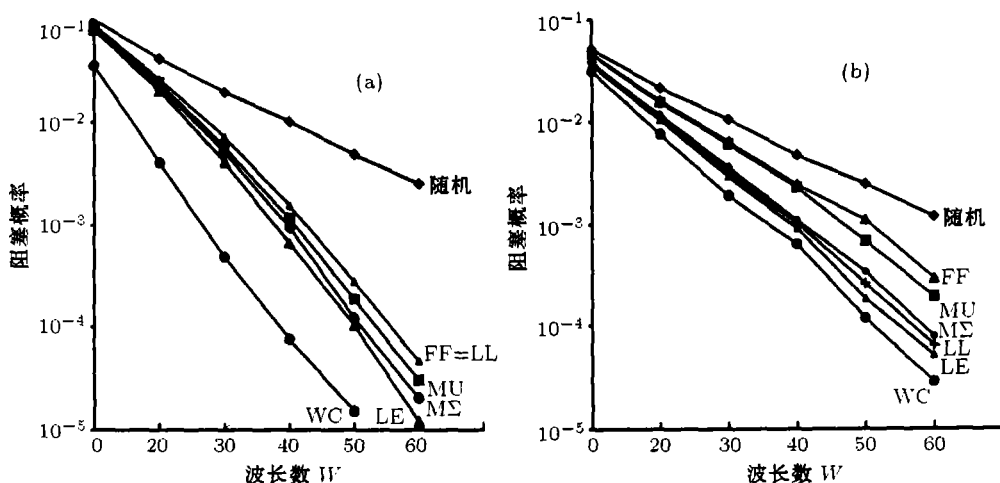


图4 格型环网中不同算法的阻塞概率
(a) 单光纤 5×5 格型环网 (b) 多光纤格型环网 $F=5$

比较图3和图4,可以看到在多光纤的条件下,引入波长变换对单向环网和格型环网的作用差距很大。这主要是因为单向环网的所有通路都局限在同一环路上,不同的光路共用同一链路的可能性远远高于格型网,发生波长阻塞的可能性也高得多。

5 结 论

本文提出了一种波长分配算法 - 最小影响算法, 用于无波长变换、动态业务、固定选路的波分复用光传送网。计算机仿真显示, 该算法优于已有的波长分配算法。利用全网的状态信息 (波长资源使用情况), 最小影响算法能够更精确地描述分配某个波长对全网状态的影响, 因而能够更有效地使用网络资源, 降低光路请求的阻塞概率。

参 考 文 献

- [1] M. Kovacevic, A. S. Acampora, On wavelength translation in all-optical networks, INFOCOM95, Boston, 1995, 413-422.
- [2] E. Karasan, E. Ayanoglu, Effects of wavelength routing and selection algorithms on wavelength conversion gain in WDM optical networks, IEEE/ACM Trans. on Networking, 1998, 6(2), 186-196.
- [3] A. Mokhtar, E. Azizoglu, Adaptive wavelength routing in all-optical networks, IEEE/ACM Trans. on Networking, 1998, 6(2), 197-206.
- [4] S. Subramaniam, R. Barry, Wavelength assignment in fixed-routing WDM networks, ICC97, Montreal Canada, 1997, 406-410.

WAVELENGTH ASSIGNMENT IN FIXED ROUTING WDM NETWORKS

Xu Shizhong Li Lemin Wang Sheng

(Nat. Key Lab of Opt. Fiber Transm. and Comm. Net., UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract In this paper, a heuristic algorithm—least effect (LE) algorithm is proposed for the dynamic centralized wavelength assignment problem in fixed-routing wavelength division multiplexing (WDM) networks without wavelength conversion. Compared with the previously proposed algorithms, LE algorithm can model the effect of wavelength assignment on the network more accurately. Simulation results show that LE algorithm performs better than those algorithms in the most cases.

Key words WDM networks, Wavelength assignment algorithm, Fixed routing, Dynamic traffic

徐世中: 男, 1972年生, 博士生, 主要研究方向是 WDM 光互连网路由和波长分配算法、体系结构和生存性, 以及 IP 与 WDM 光网结合。

李乐民: 男, 1932年生, 教授, 工程院院士, 博士生导师, 主要研究方向是数字信息传输与通信网, ATM 技术, WDM 光网络技术。

王 晟: 男, 1971年生, 博士, 讲师, 主要研究方向是 ATM 技术, WDM 光网络技术。