

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0313-03

# 基于等价网络的 WDM 光网络多播路由 与波长分配算法

齐小刚, 刘三阳

(西安电子科技大学 应用数学系, 陕西 西安 710071)

**摘要** 针对节点功能不同光网络中的路由与波长分配问题,建立了一种具有节点功能区分的波分复用器(WDM)多波长光网络模型,根据节点功能将其分为A,B两类,并提出了波长等价弧、等价网络,以及等价多播树等概念。在此基础上基于节点功能区分的WDM光网络的特点和相应的路由和波长分配策略,提出了一种如何在此类WDM光网络中实现多播连接的快速有效的算法,分析了算法计算复杂度,指出了算法的优缺点。

**关键词** 光纤通信技术; WDM光网络; 等价网络; 等价多播树; 路由与波长分配; 多播路由算法

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

## A Multicast Routing and Wavelength Assignment Algorithm Based on Equivalent Networks in WDM Optical Networks

QI Xiao-gang, LIU San-yang

(Department of Applied Mathematics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract** WDM network model with distinguishing feature of nodes' functions is described for the problem of routing and wavelength assignment, and the concepts of equivalent wavelength arc, equivalent wavelength networks and equivalent multicast tree are presented. Based on this model and relevant routing and assignment of wavelength (RAW) strategy, a multicast routing and wavelength assignment algorithm is put forward, which is a fast and effective algorithm. Finally, the algorithm's complexity, and point out the superiorities and drawbacks of the algorithm is analyzed.

**Key words** fiber communication technique; WDM optical networks; equivalent networks; equivalent multicast tree; routing and wavelength assignment; multicast routing algorithm

### 1 引言

多播通信(multicast, MC)是指点到多点的通信形式,它使多个信道同时接收一个信源发送的相同信息。多播路由由优化旨在通过共享通信资源,实现通信资源的优化配置,即寻找连接一个源节点到一组目的节点的最小扩展树,这在数学上归结为Steiner树问题,它属于NP-complete问题<sup>[1,2]</sup>。

WDM多波长光网络中的多播问题的研究,不仅需要寻找一棵从源节点到所有目的节点的最小扩展树,而且要对树上的各条路径进行波长分配。因此,WDM多波长光网络中的多播路由选择与波长分配问题属于NP-complete问题<sup>[3]</sup>。通常将这个问题分为两步来完成,第一步计算路由,第二步进行波

长分配。文献[4]中提出的算法是解决如何构建一棵具有最少波长的从源节点到所有目的节点的路由树问题,并将这类问题称为波长覆盖问题(wavelength cover problem)。

目前,对于WDM多波长光网络中节点功能无区分的多播路由选择与波长分配问题研究较多,如文献[3~6],但这些算法没有考虑网状光网络中节点功能不同的情况,因此这些算法均不能很好地解决此类WDM多波长光网络中的多播路由和波长分配问题。为此,本文在提出波长等价弧、等价网络、等价多播树等概念的基础上,建立了一种具有节点功能区分的WDM光网络模型,给出了一种解决此类光网络中多播路由和波长分配问题的快速有效算法。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.69972036);教育部跨世纪优秀人才基金和校青年科研工作站基金资助项目。

作者简介: 齐小刚(1973-),男,西安电子科技大学博士研究生,主要从事WDM光网络中的路由与性能优化的研究。

Email: qixiaogang@tom.com

### 2 问题描述

#### 2.1 网络模型

在对网络模型描述之前,先引入以下定义。

定义 1 A 类节点( $V_A$ )是指具有路由和波长转换功能的节点。

定义 2 B 类节点( $V_B$ )是指具有路由功能,但不能进行波长转换的节点。

定义 3 网络完备系数( $\alpha$ )是指 A 类节点在所有网络节点中所占的百分比( $0 \leq \alpha \leq 1.00$ )。

定义 4 A 距离( $D_A$ )是指网络中 A 类节点两两之间最短路径的最大值。

定义 5 等价网络是指与图  $G=(V,A)$  的等价图  $G'=(V',A')$  其中  $V'=V_A \cup \{v_s\} \cup V_d, A'$  为连接  $V'$  内部两节点之间的波长等价弧的集合,  $v_s$  为源节点,  $V_d$  为目的端节点的集合。在点到点的通信问题中  $|V_d|=1$ , 在多播问题中  $|V_d|>1$ ;

定义 6 波长等价弧的定义为: 假设图  $G=(V,A)$  中存在两个不同的节点  $v_m, v_n$ , 且  $v_m, v_n \in V'$ , 如果  $v_m, v_n$  间存在由一系列的 B 类节点连接的路径  $P_{mn}$ , 按照  $C(P_{mn})$  最小的策略进行路由选择和波长分配, 其中

$$C(P_{mn}) = \sum_{a_i \in P_{mn}} [w(a_i), \lambda(a_i)] + \sum_{v_i \in P_{mn}} s(v_i) \quad (1)$$

式中  $\lambda(a_i) \in \Lambda, \Lambda$  表示在边  $a_i$  上的可用波长集,  $[w(a_i), \lambda(a_i)]$  项表示路径  $P_{mn}$  上选择弧  $a_i$  和波长  $\lambda(a_i)$  的代价,  $s(v_i)$  为节点  $v_i$  上进行波长转换的代价, 在这里  $s(v_i)$  定义如下

$$s(v_i) = \begin{cases} 0, & \text{如果在节点 } v_i \text{ 处不发生波长转换;} \\ M, & \text{如果在节点 } v_i \text{ 处发生波长转换。} \end{cases}$$

在这里假设进行波长转换的代价均为  $M, C(P_{mn})$  最小表示从  $v_m$  到  $v_n$  的路径  $P_{mn}$  的代价最小, 即  $P_{mn}$  为基于目标函数  $C(P_{mn})$  的最优路径。路径  $P_{mn}$  可以用代价为  $C(P_{mn})$  虚拟弧进行等价替换, 称这条虚拟弧为这条路径上的波长等价弧, 如图 1 中虚线所示。

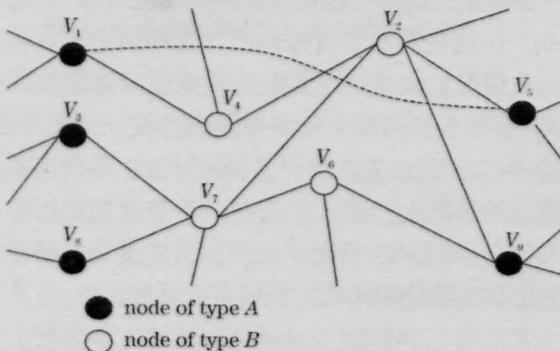


图 1 基于节点功能的 WDM 光网络

Fig.1 WDM optical network based on nodes' function

定义 7 I 类路由表是包含该节点到任一其他 A 类节点路径的路由信息和波长信息的路由表, 功能是按需建立与其他 A 类节点间的路径, 并保存该路径上路由选择信息和波长等价弧信息, 直至该连接上的服务结束。

定义 8 II 类路由表是包含该节点与距离该节点小于 A 距离的所有的网络节点(包括所有 A 类节点和 B 类节点) 路径的路由和波长信息的路由表, 该表的功能是根据网络连接状况和相应的波长选路策略建立该节点与其他网络节点间的波长等价弧, 保存建立的连接信息, 只有当某一波长等价弧上的节点状态发生改变时, 才对相应的波长等价弧信息进行动态的刷新和保存。

定义 9 等价多播树: 假设在  $G=(V,A)$  中存在从节点  $v_s$  到目标节点集  $V_d$  的一棵多播树  $T_{sd}$ , 用波长等价弧替换  $V'$  内节点间的路径可以得到树  $T'_{sd}, T'_{sd}$  称为树  $T_{sd}$  的等价多播树。

通过上面的定义, 可以建立此类网络模型如下:

$G=(V,A)$ , 其中  $V$  代表  $G$  中所有点的集合,  $A$  代表  $G$  中有向边或弧的集合, 在图 1 中的无向边可以用两条方向相反的弧代替, 对于每一条弧  $a=(v_i, v_j)$ , 相应的权  $w(a)=w_{ij}$ , 一般情况下  $w_{ij} \neq w_{ji}$ ;

$V=V_A+V_B$ , 其中,  $V_A, V_B$  分别代表 A 类节点, B 类节点的集合;

在图 1 中的两类节点有以下性质:

1) 每个节点存在 I 类路由表和 II 类路由表各一张。对于任意  $v \in V_A \cup \{v_s\} \cup V_d$  的节点,  $v$  中的两张路由表都设置为有效; 对任意  $v \in V_A \cup \{v_s\} \cup V_d$  的节点,  $v$  中的 I 类路由表设置为无效, II 类路由表设置为有效。

2) A 类节点, B 类节点可以相互进行动态转换; 如果 A 类节点不具有波长转换功能, 但具有路由功能时, 通过动态修改其标志将其转换为 B 类节点; 如果 B 类节点恢复波长转换功能时, 也可以通过动态修改其标志并将其转换为 A 类节点; 此外, 在进行节点类型转换时, 修改相应的路由表设置。

3) 当网络  $G=(V,A)$  中某一节点功能失效时, 则与此节点相关联的弧也失效。

4) 网络  $G'=(V',A')$  的路由计算规模可以由网络节点数和网络完备系数( $\alpha$ )来决定。

5) 通过 A 距离( $D_A$ )设置 II 类路由表的路由范围, A 距离( $D_A$ )可以通过根据网络设计方案获得, 也可以进行统计估值获得。

#### 2.2 多播路由与波长分配

根据 2.1 中建立的网络模型, 在多波长光网络  $G=(V,A)$  假设存在  $v_s$  到  $V_d$  的多播树, 路由与波长分配的目标是寻找一棵具有可行的波长分配并且使目标函数  $C(T_{sd})$  最小的多播树  $T_{sd}$ , 其中目标函数  $C(T_{sd})$  表示为

$$C(T_{sd}) = \sum_{a_i \in T_{sd}} [w(a_i), \lambda(a_i)] + \sum_{v_i \in T_{sd}} s(v_i) \quad (2)$$

式中  $[w(a_i), \lambda(a_i)]$  项表示在多播树  $T_{sd}$  上选择弧  $a_i$  和波长  $\lambda(a_i)$  的代价,  $C(T_{sd})$  最小表示从  $v_s$  到  $V_d$  的多播树  $T_{sd}$  的代价最小, 即  $T_{sd}$  为基于目标函数  $C(T_{sd})$  的最优多播树。

### 3 MCRWA 算法

MCRWA 算法主要针对节点功能不同的光通信网络, 提出如何在这种网络中实现多播连接问题的一种有效求解算法。

MCRWA 算法描述如下:

Step 0: 初始化: 将原网络  $G=(V,A)$  转换为等价网络  $G'=(V',A')$ ;

Step 1: 令  $j=1$ , 从节点  $v_s$  开始,  $v_s$  将看作  $T'_1$ , 即  $T'_j=T'_1, V_j=V_d$ ;

Step 2: 令  $k=1, D_k=V_j$ ;

Step 3: 如果  $D_k=\Phi$ , 转 Step 6; 否则选定  $D_k$  中的某个节点, 记为  $u_0$ , 令  $U_k=\{u_0\}, l(u_0)=0, s(u_0)$ , 对于其他的  $v \in D_k$  的节点, 令  $l(v)=\infty, S_{pre-point}(v)=v, s(v)$  的取值根据定义 6 进行动态设置;

Step 4: 对于每个  $v \in U_k$ , 搜索指向  $u \in U_k$  的波长等价弧  $a(v,u)$ , 用  $\min\{l(v), l(u)+s(u)+w(v,u)\}$  替代  $l(v)$ , 令  $S_{pre-point}(v)=u$ , 计算  $\min_{v \in V_j} \{l(v)\}$ , 记这个最小值的节点为  $u_+$ , 值记为  $l(u_+)$ , 置  $U_{k+1}=U_k \cup \{u_+\}$ ;

Step 5: 如果  $u_+ \in V(T'_j), D_{k+1}=D_k - \{u_0\}$ , 且令  $l(u_0)=l(u_+)+s(u_+)$ , 将  $u_+$  到  $u_0$  的路径记为  $P(u_0)$ ,  $k=k+1$ , 转入 Step 3; 否则, 转入 Step 4;

Step 6: 计算  $\min_{v \in V_j} \{l(v)\}$ , 将该端点记为  $v_{selected}$ , 令  $P_j=P(v_{selected}), V(T'_{j+1})=V(T'_j) \cup \{v|v \in P_j\}, A(T'_{j+1})=A(T'_j) \cup \{a|a \in P_j\}, V_{j+1}=V_j - \{v|v \in P_j\}, j=j+1$ ;

Step 7: 检验  $V_j$  是否为  $\Phi$ , 如果为  $\Phi$ , 则  $T'_{sd}:=T'_j$  转入 Step 8; 否则, 转入 Step 2;

Step 8: 将  $T'_{sd}$  中的波长等价弧根据局部信息转换为原网络  $G=(V,A)$  中相应的路径, 则可以得到从节点  $v_s$  到目标节点集  $V_d$  的一棵多播树  $T_{sd}$ ;

Step 9: 算法结束。

### 4 算法分析

MCRWA 算法从本质上讲是一种分布式算法, 算法在求解等价多播树时, 计算复杂度约为  $O(m^2n)$ , 其中  $n$  为等价网络  $G'$  中节点的总数,  $m$  为等价网络  $G'$  中多播组中节点的总数。

MCRWA 算法具有很大的优点:

1) MCRWA 算法中同时进行路由选择和波长分配, 因此求解速度较快;

2) MCRWA 算法不仅适用于求解节点功能完整的 WDM 光网络多播路由和波长分配问题, 也适用于求解节点功能区分的 WDM 光网络多播路由和波长分配问题;

3) MCRWA 算法的求解速度与等价网络的规模有关, 而与原网络的规模无关, 可以通过合理的网络规划与设计降低网络完备系数 ( $\alpha$ ) 获取更大的系统性价比和更高的问题求解速度。

此外, MCRWA 算法具有一定的不足:

1) 应用 MCRWA 算法时, 每个节点需要占用较大的存储空间;

2) MCRWA 算法在初始化时和算法结束前需要进行两次网络的转换, 需要考虑两次转换的代价。

### 5 结束语

MCRWA 算法对于 WDM 光网络中多播路由与波长分配问题也是普遍适用的。由于考虑到系统改造的成本, 只需要对某些关键节点的改造可以提升系统的整体性能, 而大多数多播路由与波长分配算法通常不能适应这种改造的要求, MCRWA 算法可以满足这一要求。

### 参考文献

- Gibert, POLLAK H O. Steiner minimal tree [J]. *SIAM J. Appl. Math.*, 16, 1968
- GAREY M R, JOHNSON D S. Computers and Intractability: A Guide to Theory of NP-completeness [M]. San Francisco CA: Freeman, 1979
- I. Chlamtac, A. Farago, T. Zhang. Lightpath (wavelength) routing in large WDM networks [J]. *IEEE JSAC*, 1996, 14(5): 909-913
- HWANG F K, RICHARDS D S. Steiner tree problem [J]. *Networks*, 1992, 22(1): 55-89
- Deying Li et al.. Minimizing number of wavelength in multicasting routing trees in WDM networks [J]. *Networks*, 2000, 35(4): 260-265
- Pawel Winter. Steiner problem in networks: A Survey [J]. *IEEE Network*, 1987, 3(2): 129-167