

# WDM 全光网络中的路由及波长分配

张文涛 黄传河 吴小兵 丁松 吴际

(武汉大学计算机学院分布并行实验室,武汉 430072)

**摘要** 在全光网络中,光信号在全光域内传输,避免了光-电转换带来的延迟,因此,全光网支持高数据率传输并提供巨大的网络容量。WDM(波分多路复用)技术的采用使得高速光传输线路与低速终端处理设备之间能够相互兼容。论文探讨了 WDM 全光网中的路由及波长分配问题,对各种常用算法进行了详细的分析,并提出了对一种新型的用于 WDM 网络上的实时组播请求的分布式 RWA 算法进行改进的意见。

**关键词** WDM 全光网 路由及波长分配 固定路径最小拥塞 组播

文章编号 1002-8331-(2003)06-171-03 文献标识码 A 中图分类号 TN913

## Routing and Wavelength Allocation in WDM All-optical Networks

Zhang Wentao Huang Chuanhe Wu Xiaobing Ding Song Wu Ji

(Distributed and Parallel Systems Lab, Computer School, Wuhan University, Wuhan 430072)

**Abstract:** Because of all-optical networks deliver information in the optical domain, the delay of O/E transmission can be avoided. They can support high data rate and provide large network capacity. In this paper, the authors focus on the problem of Routing and Wavelength Allocation (RWA) in WDM all-optical networks. They explore all the most-used RWA algorithms. In particular, they present a new idea to optimize the d RWA algorithm.

**Keywords:** WDM all-optical networks, RWA (routing and wavelength assignment), FPLC (fixed path least congestion), Multicast

### 1 WDM 全光网络

随着社会信息化程度的不断提高,人们对网络带宽的要求越来越高。光纤以其巨大的带宽容量而成为通信介质的首选。理论上,单模光纤支持的数据率可达 50Tbps。然而,光纤的可用带宽容量并不能直接加以利用,因为:(1)传统的电子硬件根本无法处理如此高速的光信号,若想利用现有设备就必须进行光-电转换,光-电转换所带来的不可忽视的延迟会极大限制光纤带宽的利用;(2)否则,就必须使用全光设备,然而,要实现高速光传输器和接收器十分困难,并且花费也十分惊人。

WDM(wavelength division multiplexing)技术的出现很好地解决了上述矛盾。WDM 根据波长的不同将光纤的带宽分成多个不重叠的波长通道,任两个相邻的通道间留有一定的间隔频段以避免信号间的串扰。每个波长通道的传输速率与电子设备和光传输器/接收器的速率相匹配。在这种方式下,一根光纤就可以为多个并发传输提供多个波长通道,从而实现光纤的大容量传输。

在 WDM 全光网中,一个典型的 WDM 链路(link)包括光发射器、放大器、接收器以及光加/解多路复用器 OADM。利用 OADM 可以将多路光信号集合在一起加载到一条光传输线路中或在本地将相应波长的光信号从传输线路中分离出来,从而实现了将本地光网同主干传输网连接并统一起来。在 WDM 全光网中,常用的交换及路由设备主要有:星型耦合器(passive star),被动路由器(passive router)及波长路由器(wavelength-routing switch)等。星型耦合器是一个广播设备,从输入端口光纤上进来的光信号将被平分并输出到其他端口,因此,星型耦

合器常用来组建 WDM 局域网。被动路由器将输入的光信号按波长分解,特定波长的信号输出到事先确定的输出节点,它主要用来作为加/解多路复用设备。波长路由器是 WDM 全光网中的主要路由设备,它在电子设备的控制下按要求动态配置其路由矩阵(routing matrix),实现光信号的路由功能。

### 2 全光网中的路由及波长分配(RWA)问题

WDM 技术是面向连接的,一对通信节点在进行数据传输之前必须建立连接,即形成一条从源节点到目的节点的光路(lightpath),然后光信号便沿着光路在光域内传输而无须光-电转换。在没有使用波长转换器的 WDM 网络中,同一连接在光路的各段链路上都必须使用相同的波长,即所谓的波长连续性限制(wavelength continuous constraint)。在同一链路上不允许多个请求同时使用同一波长,否则将出现波长冲突。若使用波长转换器,则可动态地进行波长转换从而避免波长冲突的发生。在配有波长转换器的全光网中,连接建立的可能性将大大提高,但是以巨大的转换延迟为代价的。

无论是否使用波长转换器,源节点与目的节点在进行通信前必须建立光路。决定光路的问题可以分为两个相关的子问题:

- ①决定从源节点到目的节点的路由;
  - ②为光路上的每条链路分配一个波长。
- 即所谓的路由及波长分配(RWA)问题。

#### (1)静态 RWA

静态 RWA 是指在网络形状和网络容量给定的情况下,确

**作者简介:** 张文涛(1976-),男,硕士研究生,主要研究领域为分布并行计算,WDM 全光网络。黄传河(1963-),男,副教授,主要研究领域为分布并行计算,WDM 全光网络,Ad hoc 网络等。吴小兵(1979-),男,硕士研究生,主要研究领域为分布并行计算,Ad hoc 网络等。

定所有请求的光路。其目标是在所有请求得到满足的情况下,使得所用波长通道数目最少或在给定波长通道数目的情况下使得建立起来的光路数目最多。这类问题通常可以归结为整数线性规划问题,在此不再赘述。

## (2)动态 RWA

动态 RWA 是指根据请求动态地决定光路并为之分配波长。动态 RWA 较之静态 RWA 具有更大的灵活性,它必须能够适应网络形状和流量的改变。动态 RWA 问题又可细分为两类:

### A.路由固定,动态分配波长

#### a.随机波长分配

在给定路径上,为请求随机选择一个可用波长予以分配。

#### b.首先适配(first-fit)波长分配

在给定路径上,从可用波长中选择索引值最小的波长进行分配。该策略比随机分配效果要好。

#### c.最近最少使用(least-used)波长分配

在给定路径上,从可用波长中选择网络上最近最少使用的波长进行分配。该策略的主要动机是希望让所有波长通道得以平均使用。这个算法需要额外的存储空间来存储关于波长使用的信息,还需要额外的计算开销来选择哪个波长使用率最低。然而,该方法的性能甚至比随机波长分配还差,因此在实际中很少使用。

#### d.最近最常使用(most-used)波长分配

该策略与最近最少使用波长分配方法刚好相反,其性能较之更好,但仍需额外的存储空间和额外的计算开销。

#### e.最少光纤使用(least-product)波长分配

该策略仅适用于每条链路上有很多条光纤的全光网,其基本思想是使网络中正在使用的光纤数目尽可能地少,但其性能仅只一般。

#### f.最小负载(least-loaded)波长分配

该策略也是为多光纤全光网设计的。在给定路径上选择最大效用的链路,在选定的链路上选择可用通道数目最多的波长进行分配。该方法性能较之其他方法要好。

### B.动态路由且动态分配波长

#### B-1.固定可选择路由

在设计阶段,为每一对节点决定 N 条可供选择的路由;在运行阶段,当某一对节点之间出现连接请求时从备选路由中动态选择一条并同时分配波长。

#### B-2.适应性路由

根据当前网络状态动态决定节点对之间的路由,常用方法有:

##### a.适应性最小开销路径路由

根据实际需要定义链路开销,然后利用 dijkstra 最短路径算法得到路由。现存的绝大部分适应性路由算法都属于此类。

##### b.最小拥塞路由

该类算法使即将建立起来的光路经过的各条链路上的最大流量值取得最小,保持各条链路负载均衡。

## 3 常用的 RWA 算法分析

(1)最短路径路由算法(SP)和可选择最短路径路由算法(ASP)

最短路径路由算法是最常见也是最有效的路由算法之一,

如 Internet 上广泛使用的 OSPF 算法等。它们一般都以 dijkstra 最短路径算法为基础并加以适当改进而成。通常节点之间的距离都是把很多网络指标如链路开销等通过加权平均而得到的逻辑上的长度。每个节点根据网络拓扑结构图计算出自己到其他各节点的最短路径并将其信息记录在路由表中,当请求到来时,根据路由表中的信息决定输出路由。

在 WDM 全光网络中,由于存在波长连续性限制,最短路径上的各条链路上并非总存在相同的可用波长(假设不存在波长转换器),因此人们提出了可选择最短路径(ASP)路由算法。ASP 算法以 SP 算法为基础,其不同之处在于它在源节点不仅只保存一条最短路径,同时还保存 N 条较短路径,若请求在一条路径上发生阻塞时,可依次选用其他路径。该算法具有更大的灵活性,其性能较 SP 算法要好。

## (2)固定路径最小拥塞算法(FPLC)

FPLC 算法的基本思想是事先网络上各节点对任意其它节点都保存 N 条固定路径,当连接请求到来时,根据当前网络状态,从固定路径中选择当时可用波长数目最多的那条路径作为当前路由。该算法以 ASP 路由算法为基础,在波长分配时考虑到波长占用情况以避免拥塞的发生。

可以建立数学模型来对 FPLC 路由算法进行分析。记  $S(y_l|x_{pf})$  为当前一个链路上有  $x_{pf}$  个波长可用时当前链路上有  $y_l$  个波长可用的概率;记  $U(z_c|y_f,x_{pf})$  为当前一个链路上有  $x_{pf}$  个波长可用且本链路上有  $y_f$  个波长可用时在这两段链路上同时存在的连接请求为  $z_c$  个的概率;记  $R(n_j|x_{pp},y_f,z_c)$  为当光路上第一跳(hop)上的可用波长数目为  $x_{pp}$ ,第二跳上的可用波长数目为  $y_f$  且同时经过这两跳的请求数目为  $z_c$  个时在这两跳上可用波长数目为  $n_j$  的概率;记  $T_p^{(l)}(n_l,y_l)$  为在  $l$  跳的光路  $p$  上可用波长数目为  $n$  且第  $l$  跳上的可用波长数目为  $y$  的概率。于是,根据链路负载相关性模型可得:

$$T_p^{(l)}(n_l,y_l) = \sum_{x_{pf}=0}^F \sum_{x_{pp}=0}^F \sum_{z_c=0}^{\min(F-x_{pf},F-y_f)} R(n_j|x_{pp},y_f,z_c) \cdot U(z_c|y_f,x_{pf}) \cdot S(y_l|x_{pf}) \cdot T_p^{(l-1)}(x_{ff},x_{pf})$$

(其中  $F$  为波长总数)

记光路  $p$  的长度为  $l(p)$ ,则  $p$  上有  $w_f$  个波长可用的概率  $Q_p(w_f)$  为:

$$Q_p(w_f) = \sum_{y_f=0}^F T_p^{(l(p))}(w_f,y_f)$$

在对实际 WDM 全光网设计路由算法时,由于使用一个中心节点掌握全局信息并控制整个网络是十分困难的,因此通常采用分布式算法。对任一节点对(源节点-目的节点),可以事先静态地(即不考虑网络当前状态)计算出一组路由(如  $N$  条相对最短路径)并将路由信息保存在源节点中。当连接请求到来时,源节点并行地(即在各条路径上同时)沿着所选路径一步一步地向目的节点发探针包(needle packets)以询问各条链路上波长的使用情况。探针包沿路记下各条链路上的可用波长,到目的节点处,根据探针包中所记录的空闲波长情况,选择空闲波长数目最多的那条路径为此次请求建立连接。源节点处保存的多条备选路由可尽量使其边界不相连,这样做不仅可以实现真正并行地进行路径询问,同时还可以起到容错的作用,即当其中一条路径损坏时,可以直接启用第二条。

基于 FPLC 算法的变种有很多,我们可以根据实际情况的不同对其进行改进以适应不同的网络运行。

#### 4 一种用于实时组播请求的分布式 RWA 算法 dRWA

组播(multicast)是指在网络中一个源节点同时向多个目的节点发送消息。Multicast 与 Anycast 的区别在于 Multicast 中所有目的节点都要得到源节点发出的消息,而 Anycast 中的目的节点组中只要有一个节点得到消息即可。实时组播连接要求从源节点到所有目的节点的通信时间都不得超过给定的延迟限制。实时组播请求在现代计算机网络中应用十分广泛,如:视频会议、多媒体教学系统以及视频点播等。为实时组播请求选择路由就是要找到一棵以源节点为根且包含所有目的节点的树,从源节点沿着该树到目的节点的延迟不应超过给定的时间限制,同时还应使该路由树的所有边的开销之和最小,即通常所说的最小生成树(Minimal Spanning Tree)。构建这样一棵最小生成树是一个 NP 难问题,因此必须另寻它法,创造更加简易的算法以得到可行的近似最小生成树。

算法 dRWA<sup>[5]</sup>的基本思想是将延迟(delay)和开销(cost)两个限制条件分开来考虑。该算法包含两个过程:GenCtree 和 GenDtree。首先,过程 GenCtree 根据 Prim 的最小生成树算法构建一棵最小开销树。该过程从源节点开始,以开销作为度量标准,每次从目的节点中选择离 Ctree 树最近的节点(也即是开销最小的节点),如果它满足给定的延迟限制就将其链接到 Ctree 树中。若所有目的节点都能链接到 Ctree 树中则算法结束;否则对还没有链接到 Ctree 中的节点,利用过程 GenDtree 来构建一棵最小延迟树。这次评价的标准为延迟,方法与构建最小开销树类似。最后,将 Ctree 和 Dtree 进行合并。若合并后的树中出现了回路,则剪去 Ctree 中的某些链路以消去回路,这样做是为了以牺牲开销为代价而保证满足延迟限制的要求。

该算法中用到的主要数据结构有:(1)路由表(routing table)。网络中的每个节点都保存两张路由表 CRoutab 和 DRoutab,分别用于开销路由和延迟路由。表中的每一项 CRoutab[d] 或 DRoutab[d]分别包含一组从该节点到节点 d 的可能的输出链路和相应的最小开销或最小延迟。该表可以根据距离向量路由(distance vector routing)算法进行构建和维护。(2)目的节点到树的距离。在构建树的过程中,作者使用三元组 <treenode,dest,dist> 来跟踪记录每个目的节点到当前已建成的树之间的最短距离。每个目的节点对应一个三元组,其意义为到目的节点 dest 的最近树节点为 treenode,其间的距离为 dist。(3)可用波长的链路数目。每个节点都要记录与之相接的链路上的可用波长。对波长  $\lambda$ ,NL( $\lambda$ )表示给定节点处波长  $\lambda$  可用的链路数目。利用这些数据结构构建 Ctree 和 Dtree 的过程,有兴趣的读者可参考[5]。

算法 dRWA 虽然很巧妙,但仍属于贪心算法范围。其性能看起来会很好,但性能无法得到保证。由于遗传算法(Generic Algorithm)是求解 NP 难问题的常用方法,它虽不能保证得到最优解,却通常可以得到令人满意的较优解,因为这样可以控制问题的解朝着一个越来越好的方向发展。为此,作者设想使用遗传算法的思想对 dRWA 算法构建的最小生成树进行优化。可以使用特定的编码方式对组播树的形式进行编码,以延迟和开销两个限制条件作为评价标准构建适应度函数(fitness function)。首先利用贪心算法得到初始组播树,然后对其进行一系列变换操作,变换操作包括杂交(crossover)、变异(muta-

tion)等,再利用适应度函数对变换结果进行评价,不断淘汰劣性个体、选择良性个体,则可以不断优化得到的结果,最终得到令人满意的较优解。

下面给出一个在实践中可行的参考方案,有兴趣的读者可依此进行模拟实验:

(1)编码方案。原则上编码方案只要满足任一码字唯一对应一棵组播树且所有码字与所有组播树一一对应即可。为了方便起见,通常采用二进制编码。如可以考虑将网络中所有节点依次标记为 0,1,...,N,用二元组( $i,j$ )表示一个链路。这样任一棵组播树就可依据深度优先或广度优先策略将之表示为一个二元组序列,然后将每个二元组( $i,j$ )写成  $i*N+j$ ,于是组播树就变成了一个整数序列,最后把整数序列变成相应的二进制序列形式,则编码完成。

(2)对每一棵二进制形式的组播树都要利用适应度函数对之进行有效性检查和优良性评价。检查和评价的标准是延迟和开销。就是要看其延迟是否满足延迟限制,且其开销有没有尽可能地小。

(3)杂交操作。随机选择 2 个有效的二进制形式的组播树,任意决定其断裂处,用前者的前一部分与后者的后一部分或后者的后一部分与前者的一部分相结合,进行杂交。对杂交得到的新个体进行有效性检查,若它对应的组播树无效(不能满足要求或根本不是一棵树),则删除那些不能到达任意节点和导致循环的链路,并尽量包含进所有目的节点,然后再对之进行检查并重复上面的操作。

(4)变异操作。变异操作类似于杂交,但其操作对象为单个组播树。

(5)选择。选择的原则是根据评价的结果优胜劣汰。

有兴趣的读者可以依此原理设计出详细的模拟方案,在此不再赘述。

#### 5 结束语

论文介绍了 WDM 全光网络的一些基本概念,概述了用于 WDM 网中的路由及波长分配(RWA)算法,并对各种常用 RWA 算法进行了介绍,特别对 FPLC 算法进行了详细的讨论和分析。论文还对用于 WDM 网络的一种分布式实时组播算法 dRWA 进行了分析,并提出了用遗传算法对其进行改进的思想。(收稿日期:2002 年 3 月)

#### 参考文献

- 1.Biswanath Mukherjee.WDM Optical Networks:Progress and Challenges [J].IEEE Journal on selected areas in communication
- 2.B Mukherjee,Hui Zang.Survey of State-of-The-Art
- 3.Gaoxi Xiao,Yiu-Wing Leung.Allocation of Wavelength Converters in All-Optical Networks[J].IEEE Journal on selected areas in communication
- 4.Ling Li,Arun K Sonani.Dynamic Wavelength Routing Using Congestion and Neighborhood Information[J].IEEE/ACM Transaction on Networking
- 5.Chuanhe Huang,Xinmeng Chen,Xiaohua Jia.A Distributed Routing and Wavelength Allocation Algorithm for Real-time Multicast in WDM Networks