

IP/DWDM 光 Internet 中的一种公平智能 QoS 组播路由机制^{*})王兴伟¹ 刘 聪¹ 崔建业¹ 黄 敏² ·(东北大学计算中心 沈阳 110004)¹ (东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)²

摘 要 QoS (Quality of Service) 与组播是 IP/DWDM 光 Internet 中应该具备的基本能力。本文研究了 IP/DWDM 光 Internet 中的公平智能 QoS 组播路由机制。在所提出的机制中, QoS 需求的区间表示形式体现了对柔性异构 QoS 的支持; 根据微观经济学理论, 建立基于 Kelly/PSP 模型的定价策略, 体现组间公平性; 使用下游链路均分方法在组成员之间分摊费用, 体现组内公平性; 基于点火耦合神经网络, 建立智能 QoS 组播路由算法。以上各方面有机结合, 构成 IP/DWDM 光 Internet 中的公平智能 QoS 组播路由机制。仿真结果表明, 该机制是可行和有效的。

关键词 IP/DWDM 光 Internet, QoS 组播, 路由, 公平性, 神经网络, 微观经济学

A Fair and Intelligent QoS Multicast Routing Mechanism in IP/DWDM Optical Internet

WANG Xing-Wei¹ LIU Cong¹ CUI Jian-Ye¹ HUANG Min²(Computing Center, Northeastern University, Shenyang 110004)¹(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004)²

Abstract QoS (Quality of Service) and multicast are essential capabilities in IP/DWDM optical Internet. In this paper, a fair and intelligent QoS multicast routing mechanism in IP/DWDM optical Internet is discussed. In the proposed mechanism, QoS requirement is denoted by an range to support the flexible and heterogeneous QoS; according to the microeconomics theory and method, a Kelly/PSP-model-based pricing strategy is presented to support the inter-group fairness; the ELSD (Equal Link Split Downstream) method is adopted to apportion the cost among group members, thus the intra-group fairness is provided; based on FCNN (Firing Coupled Neural Network), an intelligent QoS multicast routing algorithm is introduced. Combining the above, a fair and intelligent QoS multicast routing mechanism is established. Simulation results have shown that the proposed mechanism is both effective and efficient.

Keywords IP/DWDM optical Internet, QoS multicast, Routing, Fairness, Neural network, Microeconomics

1 引言

随着 Internet 运营的渐趋商业化, 付费上网已是大势所趋。对于组播应用, 费用的计算与分摊如何体现组间与组内公平性^[1]更是迫切需要解决的问题, 按照“谁受益谁付费”的原则, 实现“以质论价”和“优质优价”。由于网络状态信息的不精确性与动态性以及用户 QoS 需求的难以准确刻画, 因此需要支持柔性 QoS, 而组中不同成员可能有不同的 QoS 需求, 客观上又要求支持异构 QoS。

IP/DWDM 光 Internet 是下一代互联网 NGI (Next Generation Internet) 主干的核心组网技术之一, 而 QoS (Quality of Service) 与组播是其必备的能力^[2]。本文研究其 QoS 组播路由问题。在所提出的机制中, 采用区间形式的 QoS 需求描述, 支持柔性异构 QoS; 采用基于价格的 Kelly 模型^[3]与基于博弈论的 PSP 模型^[4]相结合的微观经济学定价策略, 不仅可以体现组间公平性, 而且有助于使波长资源分配达到 Pareto 最优^[3]与 Nash 均衡^[4]; 采用下游链路均分方法^[5]分摊费用可以体现组内公平性; 基于点火耦合神经网络 FCNN (Firing Coupled Neural Network)^[6], 提供求解多约束柔性异构 QoS 组播路由问题的智能算法, 体现 QoS 需求的满足; 以上各方面有机结合, 构成 IP/DWDM 光 Internet 中的公平智能 QoS 组播路由机制。仿真研究表明, 该机制不仅是可行的而且是有效的。

2 公平智能 QoS 组播路由机制

2.1 网络模型

IP/DWDM 光 Internet 可以表示为连通图 $G(V, E)$ 。其中, V 是节点(波长路由器或者光交叉连接器)的集合, E 是边(光纤)的集合。设每个节点 $v_i \in V$ 都具备组播能力, 配置有分光器, 能够将输入光信号劈分成任意路数的输出光信号。任意一个节点 v_i 都包含三个参数: dn_i, jt_i, ln_i , 分别表示 v_i 的延迟、延迟抖动和分组丢失率, $i=1, 2, \dots, |V|$ 。任意一条边 $e_{ij} \in E$ 都包含四个参数: $ct_{ij}, \omega_{ij}, de_{ij}, le_{ij}$, 分别表示该条边的费用、支持的最大波长数、延迟和比特出错率, $j=1, 2, \dots, |V|$ 。边的可用波长集为 $\Lambda(e_{ij}), \Lambda(e_{ij}) \subseteq \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{\omega_{ij}}\}$ 。

2.2 数学模型

用 $R=(s, D, Dlb, Dub, Elb, Eub, Wv)$ 表示 QoS 组播路由请求。其中, $s \in V$ 表示组播源节点; $D \subseteq \{V - \{s\}\}$ 表示组播目的节点集合; Dlb 和 Dub 分别表示组播延迟的下限与上限; Elb 和 Eub 分别表示组播出错率的下限与上限; Wv 表示需求的波长数。

在组播树 $T(s, D)$ 上, 对 $\forall d \in D$ 而言, 有如下关系成立:

$$\bullet \text{Delay}(P_T(s, d)) = \sum_{v_i \in P_T(s, d)} dn_i + \sum_{e_{ij} \in P_T(s, d)} de_{ij} \quad (1)$$

$$\bullet \text{Jitter}(P_T(s, d)) = \sum_{v_i \in P_T(s, d)} jt_i \quad (2)$$

$$\bullet \text{Error}(P_T(s, d)) = 1 - \prod_{v_i \in P_T(s, d)} (1 - ln_i) \prod_{e_{ij} \in P_T(s, d)} (1 - le_{ij}) \quad (3)$$

$$\bullet \Lambda(P_T(s, d)) = \bigcap_{e_{ij} \in P_T(s, d)} \Lambda(e_{ij}) \quad (4)$$

$$\bullet \Lambda(T(s, D)) = \bigcap_{d \in D} \Lambda(P_T(s, d)) \quad (5)$$

$$\bullet \text{Cost}(T(s, D)) = \sum_{e_{ij} \in T(s, D)} ct_{ij} \quad (6)$$

^{*}) 国家自然科学基金项目(60473089, 60003006, 70101006); 辽宁省自然科学基金项目(20032018, 20032019); 教育部现代远程教育工程项目。王兴伟 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为下一代互联网、IP/DWDM 光 Internet 及移动 Internet。

其中, $P_T(s, d)$ 为组播树 $T(s, D)$ 上从源节点 s 到目的节点 d 的路径。

QoS 组播路由算法需满足如下约束条件:

- 1) 延迟约束: $Dlb \leq Delay(P_T(s, d)) \leq Dub$;
- 2) 延迟抖动约束: $0 \leq Jitter(P_T(s, d)) \leq Dub - Dlb$;
- 3) 出错率约束: $Elb \leq Error(P_T(s, d)) \leq Eub$;
- 4) 波长约束: $W_v \leq |\Delta(T(s, D))|$ 。

算法的目标是在满足 QoS 需求条件下使组播树的费用最小, 数学描述如下:

$$\text{Minimize } Cost(T(s, D)) \text{ s.t. 约束 1)、2)、3) 和 4) } \quad (7)$$

需要说明的是, 式(4)和式(5)服从波长连续性约束。对于节点具备波长转换能力的情况, 定义如下波长转换函数 WCF, 它可以根据节点波长转换能力实现边上可用波长集变换。这样既可以打破波长连续性约束, 又可以使式(4)和式(5)依然可用:

$$\Lambda(e_{ij}) = WCF(\Lambda(e_{ij})) \quad (8)$$

2.3 基于 Kelly/PSP 模型的定价策略

基于 Kelly/PSP 模型^[3,4,7], 设计了 IP/DWDM 光 Internet 中的波长定价策略。在该策略下, 每条边采用如下波长单价公式:

$$Wp_{ij} = k_1 \left(\frac{1}{wn_{ij}} \right)^{\frac{a_{ij}}{(1-Or_{ij})^{b_{ij}+1}}} + k_2 wa_{ij} \quad (9)$$

其中, Wa_{ij} 为边上当前可用波长数; Or_{ij} 为边上波长资源占用率, 根据式(10)确定; k_1 和 k_2 是加权系数, 根据实际情况设定; a_{ij} 和 b_{ij} 为边上的波长定价经验参数, 可以根据式(14)和式(15)求得。采用式(9)对波长定价, 既考虑了边上波长资源占用率, 又考虑了边上当前可用波长数, 因此更合理一些。

$$Or_{ij} = \frac{wn_{ij} - Wa_{ij}}{wn_{ij}} \quad (10)$$

R 在边 e_{ij} 上的费用 ct_{ij} 的计算公式如下:

$$ct_{ij} = Wv \times Wp_{ij} \quad (11)$$

参考文[7], 把波长单价分为三个区: 低价区、平价区与高价区。把经验统计中有 90% 以上和 20% 以下潜在用户使用的情况分别定为高价和低价区, 其余为平价区。当边只有潜在用户的 20% 使用而波长资源占用率很低(设为 η_0)时, 设置偏低价为 π_0 ; 在有潜在用户的 90% 使用而波长资源占用率很高(设为 η_1)时, 设置偏高价为 π_1 ; 把 $[\pi_0, \pi_1]$ 作为波长单价定价的合理取值范围而 $[\eta_0, \eta_1]$ 作为波长资源占用率的合理取值范围, 则根据式(9)有:

$$\pi_0 = k_1 \left(\frac{1}{wn_{ij}} \right)^{\frac{a_{ij}}{(1-\eta_0)^{b_{ij}+1}}} + k_2 wn_{ij} (1-\eta_0) \quad (12)$$

$$\pi_1 = k_1 \left(\frac{1}{wn_{ij}} \right)^{\frac{a_{ij}}{(1-\eta_1)^{b_{ij}+1}}} + k_2 wn_{ij} (1-\eta_1) \quad (13)$$

根据式(12)和式(13)可确定参数 a_{ij} 和 b_{ij} 的值如下:

$$a_{ij} = \frac{\pi_0 - k_2 wn_{ij} (1-\eta_0) + \ln[\pi_0 - k_2 wn_{ij} (1-\eta_0)] - \ln[\pi_1 - k_2 wn_{ij} (1-\eta_1)]}{\ln(1-\eta_1) - \ln(1-\eta_0) - 1} \quad (14)$$

$$b_{ij} = \frac{\ln[\pi_0 - k_2 wn_{ij} (1-\eta_0)] - \ln[\pi_1 - k_2 wn_{ij} (1-\eta_1)]}{\ln(1-\eta_1) - \ln(1-\eta_0)} - 1 \quad (15)$$

定价策略描述如下: 当边上的波长资源位于低价区时, 边上波长单价使用 π_0 保持不变, 以降低计算开销; 当边上的波长资源位于平价区时, 使用式(9)即时确定波长单价; 当边上的波长资源位于高价区时, 竞拍波长, 竞拍底价为 π_1 , 出价最高者获得波长使用权, 若无参拍者, 则流拍。

根据微观经济学理论, 采用基于价格的 Kelly 模型思想有利于实现波长资源分配的 Pareto 最优^[3], 而采用基于博弈论的 PSP 模型思想有利于达到在网络提供方收益与用户 QoS 需求满足之间的 Nash 均衡^[4], 因此两者的结合, 不仅可

以体现组间公平性, 而且有助于寻找网络提供方与用户之间的“双赢”平衡点。

2.4 组播费用的分配

为了进一步实现组内公平性, 还需要在组成员之间公平分摊费用。常见方法主要有: 树内均分 ETS (Equal Tree Split)、下游链路均分 ELSD (Equal Link Split Downstream) 和下跳均分 ENHS (Equal Next-Hop Split)^[5]。ETS 是将组播费用均分给所有接收者; ELSD 是所有共享某条链路的接收者共同承担该条链路的费用, 其他接收者不分摊此费用; ENHS 是将每个下游出口直接链路作为一个接收者, 与本地接收者均分上游链路费用。按照“谁受益谁付费”原则, 本文采用 ELSD 来体现组内公平性, 描述如下:

$S(v_i)$ 是节点 v_i 和其下游所有组播目的节点的集合, $IC(v_i)$ 是节点 v_i 上游分摊下来的费用, $OC(e_{ij})$ 是分摊给下游出口链路 e_{ij} 的费用, 则有如下计算公式:

$$OC(e_{ij}) = IC(v_i) \times \frac{|S(v_j)|}{|S(v_i)|} \quad (16)$$

$$IC(v_i) = ct_{ij} + OC(e_{ij}) \quad (17)$$

节点 v_i 承担的本地费用为 $\frac{IC(v_i)}{|S(v_i)|}$ 。

2.5 智能 QoS 组播路由算法

FCNN^[6] 的神经元如图 1 所示, 每一个节点对应于一个神经元; 节点与节点之间的边对应于神经元与神经元之间的点火耦合。为了实现在 FCNN 上自动波沿最短路方向的传播, 神经元之间具备如下耦合特性^[6]:

1) 若仅有神经元 i 与神经元 j 相连, 连接权为 w_{ij} , 且神经元 i 在 t_i 时刻先点火, 则神经元 j 将延迟到时刻 $t_i + w_{ij}$ 点火, 对应式(18);

2) 若有 m 个神经元 i_1, i_2, \dots, i_m 与神经元 j 有边相连, 连接权分别为 $w_{i_1, j}, w_{i_2, j}, \dots, w_{i_m, j}$, 且神经元 i_1, i_2, \dots, i_m 中至少有一个比神经元 j 先点火, 则只有最先到达神经元 j 的自动波继续传播, 对应式(19);

3) 每个神经元在寻优过程中仅点火一次, 对应式(20)。

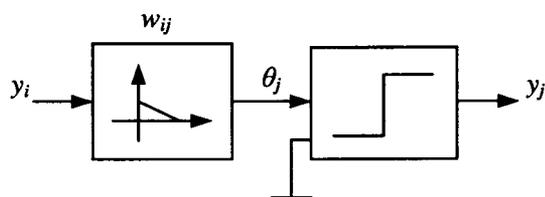


图 1 点火耦合神经元

基于 FCNN 的智能 QoS 组播路由算法描述如下:

STEP1 初始化: 对 $\forall v_i, v_j \in V_{neu}$, 设 $\theta_i(0) = 0, y_i(0) = 0$; V_{neu} 表示与 V 对应的神经元集合 * /

STEP2 让 start 神经元点火, 即设 $\theta_{start}(1) = -\epsilon, y_{start}(1) = 1$, 并保持其他神经元状态不变, ϵ 为一正数;

STEP3 对 $\forall v_i \in V_{neu}$, 若神经元 i 已经点火, 即 $y_i(k) \neq y_i(k-1)$, 分别按式(1)、式(2)、式(3)和式(4)计算路径 $start \rightarrow i$ 的延迟、延迟抖动、出错率与可用波长集; 若有约束条件不满足, 则对神经元 i 做回退操作, 执行 STEP7, 否则执行 STEP4;

STEP4 对 $\forall v_j \in V_{neu}$, 若神经元和神经元 j 之间的连接权 $w_{ij} \neq 0$, 则分别按式(1)、式(2)、式(3)和式(4)计算路径 $start \rightarrow i \rightarrow j$ 的延迟、延迟抖动、出错率与可用波长集; 如果所有约束条件都满足, 则计算式(18), 否则 $\theta_j(k) = 0$; C_0 和 Δt 是 FCNN 中的参数, 根据实验确定其值 * /

$$\theta_{ij}(k) = \begin{cases} C_0 - \frac{C_0}{w_{ij}} \Delta t & \text{若 } y_i(k) \neq y_i(k-1) \\ \theta_{ij}(k-1) - \frac{C_0}{w_{ij}} \Delta t & \text{若 } y_i(k) = y_i(k-1) = 1 \\ 0 & \text{若 } y_i(k) = y_i(k-1) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

STEP5 按式(19)计算 $\theta_{ij}(k)$, 按式(20)计算 $y_i(k)$;

$$\theta_{ij}(k) = \text{Min}\{\theta_{ij}(k) | w_{ij} \neq 0\} \quad (19)$$

$$y_i(k) = \begin{cases} 1 & \text{若 } y_i(k-1) = 1 \\ \text{step}(-\theta_{ij}(k)) & \text{若 } y_i(k-1) = 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{step}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (21)$$

STEP6 按式(22)计算 b_{ij} , 记录路径;

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{若 } \theta_{ij}(k) = \theta_{ij}(k) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

STEP7 重复 STEP3~STEP6, 直至 V_D 中所有神经元全部点火或自动波回退到 $start$ 神经元; /* V_D 为与 D 对应的神经元集合 */

STEP8 如果自动波回退到 $start$ 神经元, 则路由失败; 如果 V_D 中所有神经元全部点火, 则按式(5)计算组播树可用波长集, 根据路径记录矩阵 $B = [b_{ij}]_{|V| \times |V|}$, 对 V_D 中所有神经元进行路径回溯, 预分配波长, 按式(11)计算边费用, 按式(6)计算组播树费用, 得到满足约束条件下费用最小 QoS 组播路由树, 路由成功。算法结束。

2.6 公平智能 QoS 组播路由机制工作流程

在使用 2.5 节中所述算法得到预分配波长组播路由树之后, 如果不需要竞拍波长或者竞拍成功, 则实际分配波长, 然后按 ELSD 方法在组成员之间分摊费用。工作流程如图 2 所示。

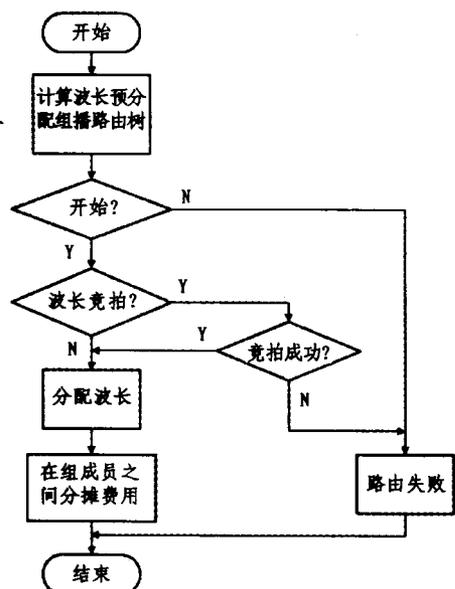


图 2 公平智能 QoS 组播路由机制工作流程

2.7 仿真实现

使用 VC++ 在 Windows 平台上仿真实现了上述路由机制, 仿真界面如图 3 所示。针对一些实际的与虚拟的网络拓扑(包括 CERNET 和网孔拓扑等)^[8]对算法性能进行了仿真研究, 图 4、图 5 和图 6 是其中的三个拓扑用例。仿真结果表明, 该机制是可行和有效的^[8]。

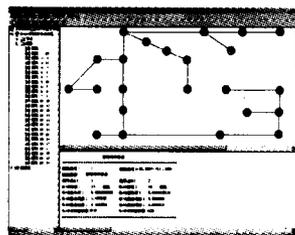


图 3 仿真界面

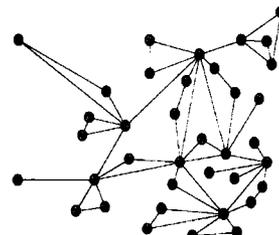


图 4 拓扑用例 1

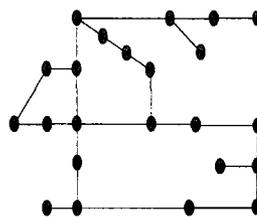


图 5 拓扑用例 2

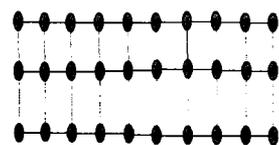


图 6 拓扑用例 3

结束语 本文研究了 IP/DWDM 光 Internet 中的公平智能 QoS 组播路由机制。基于微观经济学理论, 建立了基于 Kelly/PSP 模型的定价策略; 基于 FCNN, 建立柔性异构 QoS 组播树; 根据波长单价, 得到组播费用, 并且使用 ELSD 方法在组成员之间分摊。该机制不仅体现组间与组内公平性的要求, 而且支持柔性异构 QoS 需求, 还可促进波长分配达到 Pareto 最优且在网络提供方与用户之间取得 Nash 均衡^[3,4], 实现“双赢”。因此, 该机制可以较好地满足网络运营商业化的需要, 从路由角度支持公平柔性异构 QoS 组播的实现。

参考文献

- Smith M, Winter P. Path-distance heuristics for the Steiner problem in undirected networks. *Algorithmica*, 1992, 7(2): 309~327
- Green P. Progress in optical networking. *IEEE Communication Magazine*, 2001, 39(1): 54~61
- Kelly F P, Maulloo A, Tan D. Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness and stability. *Operational Research Society*, 1998, 49(3): 237~252
- Aurel A L, Nemo S. Market pricing of differentiated Internet services. *IEEE/IFIP IWQoS'99*, 1999. 597~612
- Herzog S, Shenker S, Estrin D. Sharing the "cost" of multicast trees: an axiomatic analysis. *ACM SIGCOMM'95*, 1995. 576~591
- 张军英, 王德峰, 石美红. 基于点火耦合神经网络的多约束 QoS 路由算法. *通信学报*, 2002, 23(7): 40~46
- 傅晓明, 张尧学, 马洪军, 赵艳标. 一种基于市场模型的网络带宽分配方法. *电子学报*, 1999, 27(9): 127~130
- 崔建业. IP/DWDM 光因特网中基于神经网络和微观经济学的公平 QoS 组播路由选择算法的研究和仿真实现. [东北大学论文]. 沈阳, 2004