

基于MPLS和DiffServ的域内网络资源配置方法

邹园萍 糜正琨

(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

摘要: 服务质量(QoS)和流量工程(TE)是在当今网络中提供实时应用业务的两种重要技术。多协议标记交换(MPLS)在IP网QoS提供和TE功能实现中起了关键作用。该文首先介绍了基于MPLS的网络配置基本方法,然后提出了一种在基于MPLS和DiffServ相结合的网络中基于约束的域内静态网络资源配置方法,给出了相关的数学模型,并进行了相应的仿真,仿真结果表明该方法能在网络开销增加较少的情况下,有效地均衡网络负荷。

关键词: 区分服务; 多协议标记交换; 标记交换路径; 流量工程; 线性规划; 网络资源配置

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0214-04

Intra-domain Network Resource Allocation Method Based on MPLS and DiffServ

Zou Yuan-ping Mi Zheng-kun

(Communication and Information Engineering College,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Quality of Service (QoS) and Traffic Engineering (TE) capabilities are two important techniques in today's networks for supporting real-time applications. Multi Protocol Label Switching (MPLS) plays an important part in IP networks for providing QoS and TE features. A general method to configure network based on MPLS is firstly introduced, then, a method to allocate network resource based on constraints at the DiffServ domain in IP network is proposed. The mathematical model and simulation of the method is given too. The simulation results show that the proposed method can balance the network load while the increase of the network cost is little.

Key words: Differentiated Service (DiffServ); Multi Protocol Label Switching (MPLS); Label Switching Path (LSP); Traffic Engineering (TE); Linear Programming (LP); Network resource allocation

1 引言

IP网 的空前发展以及实时应用的快速普及向网络界提出了新的挑战。然而,IP协议并没有被设计成能提供有保证的服务质量(QoS)。因此,吞吐率、时延和丢包率的恶化现象时有发生。此时,通过优化运营中网络的性能以最小化网络的拥塞就变得更为重要^[1]。流量工程(TE)为业务提供商提供了一种网络性能优化和带宽提供方法。Internet流量工程的主要目标是在优化网络资源利用率和流量性能的同时,使网络的运行更加有效和可靠^[2]。流量工程对网络性能的优化主要是通过容量管理和流量管理来实现。容量管理包括网络容量规划、选路控制和资源管理,而网络资源又包括带宽、缓冲区容量和其他一些可计算的资源。本文主要讨论实现流量工程的容量管理的有关方面,主要是对带宽资源的有效分配。带宽是当前网络的一项重要资源,在DiffServ网中必须采取有效措施提高网络资源分配效率,保证不同服务类别的业务公平地访问网络资源。

IETF提出的区分服务体系结构(DiffServ)能够在IP骨干网上提供基于汇聚流的不同QoS的服务,并具有良好的可扩展性^[3],多协议标记交换(MPLS)则支持显式路由、负荷均衡和快速重新路由等功能^[4],业界普遍认为,把两者结合起来,是实现流量工程的最佳技术。

Tequila项目组一直致力于流量工程的研究工作^[5]。本文在深入研究Tequila项目成果及Tunis提出的基于MPLS的用于单业务IP网中的流分配算法^[6]的基础上,提出了基于MPLS和约束的DiffServ域内一种有效的资源预留方法。

2 基于MPLS的网络配置方法

本文仅考虑单播模式,而不考虑组播。基于MPLS的网络配置充分利用了MPLS建立显式LSP的能力,并为每条LSP预留资源。

流量矩阵的每个条目就是一个流量中继^[7]。流量中继是一组具有某一特定特征的数据流的汇聚,它们具有相同的入口/出口节点和性能要求。采用流量中继的概念可提高网络的可扩展性^[2,8]。使用OA(Ordered Aggregate)带宽、最大允许时延和最大允许丢包率可表征一个流量中继上的流量类

别(或QoS类别)^[3], 其中OA是一组行为聚合, 它们对属于同一个微流的数据包是否允许重新排序, 具有相同的要求。流量中继是一种管道模型, 与入口/出口节点一一对应。

本文考虑对两节点间的业务流通过平行的多条LSP进行负荷分担^[3]。为每条LSP预留的带宽是与PHBs的可用带宽相关联的, 因此一个PHB的可用带宽必须大于或等于该类PHB业务流量的所有LSPs的带宽之和。各类PHB的可用带宽是由调度机制控制的。上述方法能为各PHB类提供LSPs所需的准确的总带宽, 但却不能保证LSPs当中的每条都能从总带宽中得到自己的那部分。因此需使用相关策略来确保从指定LSPs注入网络的流量负荷不大于分配给它们的带宽。

3 数学建模

网络可表示为 $G=(V, E)$, V 表示网络节点集合, E 表示连接相邻节点的链路集合。设网络中节点数目为 N , 链路条数为 L 。对每条链路 $(m, n) \in E$, 系统应配置如下参数: 链路带宽容量 $b_{(m, n)}$, 链路 (m, n) 上传送单位流量的费用 $w_{(m, n)}$, 物理队列集 K (与此链路所支持的 PHB 对应), 节点 i 到 j 的所有路径 $P_{(i, j)}$, 其中 $i, j \in V$ 。对于链路上 $(m, n) \in E$ 的每类 PHB $k \in K$, 定义最大传输时延 $D_{(m, n)}^k$ 和最大丢包率 $L_{(m, n)}^k$ 。

$[d_{(i, j)}^k]$ 表示 PHB k 类业务流量需求矩阵, 其中 $d_{(i, j)}^k$ 表示由节点 i 进入网络并从节点 j 退出网络的 PHB k 类业务流量 (可以是汇聚流的速率)。 $x_{p, (i, j)}^k$ 表示 LSP $p, (p \in P, P$ 为网络中所有路径的集合) 上传送的节点对 (i, j) 之间的 PHB k 类业务流量。 $P_{(i, j)}^k \in P_{(i, j)}$, 表示节点对 (i, j) 之间满足 PHB k 类业务端到端的 QoS 时延和丢包率要求的路径。

$X_{(m, n)}$ 表示将所有 PHB 类业务流量需求 $d_{(i, j)}^k$ 配置到网络各条路径上之后, 在链路 (m, n) 上产生的流量负荷。 $P^{(m, n)}$ 为所有的使用了链路 (m, n) 的路径的集合。

$$X_{(m, n)} = \sum_{(i, j)} \sum_k \sum_{p \in P^{(m, n)}} x_{p, (i, j)}^k \quad (1)$$

在每条链路上, 应满足可行性约束:

$$0 \leq X_{(m, n)} \leq b_{(m, n)} \quad (2)$$

对源节点为 i , 目的节点为 j 的 PHB K 类业务需求 $d_{(i, j)}^k$ 应满足式(3)。

$$\sum_{p \in P_{(i, j)}^k} x_{p, (i, j)}^k \geq d_{(i, j)}^k \quad (3)$$

寻找符合约束的路由问题是一个 NP 完全问题, 不过可适当地作些简化, 并将这些约束分别转变为跳数约束。这可通过假设链路上的每类 PHB 有一个最坏的时延和丢包率限制。把每类 PHB 的每段链路上的时延和丢包率的累加作为端到端的总的时延和丢包率。从而把 QoS 的端到端的时延和丢包率约束转化成了跳数约束, 并取其中跳数约束更严格的一个作为最终的跳数约束。通过以上简化, 在跳数约束下的最小费用路径算法就变成了多项式复杂度^[10, 11]。

$$\sum_{(m, n) \in p} y_{p, (m, n)}^k \leq \min\{H_L^k, H_D^k\} \quad (4)$$

H_D^k 为 PHB k 类业务的端到端的 QoS 时延要求折合成的跳数约束。 H_L^k 为 PHB k 类业务端到端的 QoS 的丢包率要求折合成的跳数约束。

定义变量:

$$y_{p, (m, n)}^k = \begin{cases} 1, & \text{如果 PHB } k \text{ 类业务的 LSP } p \\ & \text{经过链路 } (m, n) \in E \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

流量工程设计目标主要有两个: 其一是避免部分网络资源负荷过重, 而其它资源相对空闲; 其二是在满足业务需求的情况下, 网络资源消耗最小。

第 1 个设计目标可用公式表示为:

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } z \\ & \text{s.t. } b_{(m, n)} - X_{(m, n)} \geq z b_{(m, n)} \text{ For all } (m, n) \text{ with } b_{(m, n)} > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中的 z , 表示利用率最高的那条链路上的剩余带宽与链路容量之比。即

$$z = \min \left[\frac{b_{(m, n)} - X_{(m, n)}}{b_{(m, n)}} \right] \quad (7)$$

第 2 个设计目标可表示为式(8), 同时遵守式(1)–式(4)的约束。

$$\text{Minimize } \sum_{(m, n)} w_{(m, n)} X_{(m, n)} \quad (8)$$

在设计网络容量配置算法时需同时考虑以上的两个目标。为简化分析, 我们考虑用线性加权的方法将两个分量目标综合进行考虑^[12], 并将式(1)代入式(8)可得。

$$\text{Minimize } \left[-\varepsilon z + (1 - \varepsilon) \sum_k \sum_{(i, j)} \sum_{p \in P_{(i, j)}^k} (K_{p, (i, j)}^k x_{p, (i, j)}^k) \right] \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \text{s.t. } \sum_k \sum_{(i, j)} \sum_{p \in P^{(m, n)}} x_{p, (i, j)}^k + b_{(m, n)} z \leq b_{(m, n)}, \\ & \text{For all link } (m, n) \in E \end{aligned} \quad (9a)$$

$$\sum_{p \in P_{(i, j)}^k} x_{p, (i, j)}^k \geq d_{(i, j)}^k, \quad \text{For all } d_{(i, j)}^k \in [d_{(i, j)}^k] \quad (9b)$$

$$\sum_{(m, n) \in p} y_{p, (m, n)}^k \leq \min\{H_L^k, H_D^k\}, \quad \text{For all PHB } k \quad (9c)$$

$$x_{p, (i, j)}^k \geq 0, \quad z \geq 0 \quad (9d)$$

式(9)中 $K_{p, (i, j)}^k$ 表示由源节点 i 到目的节点 j 的 LSP p 上的费用。

$$K_{p,(i,j)}^k = \sum_{(m,n):p \in P^{(m,n)}} w_{(m,n)}^k \quad (10)$$

在本优化问题中, 输入为网络拓扑和流量需求矩阵, 输出变量 $x_{p,(i,j)}^k$ 为由源节点 i 到目的节点 j 的 PHB k 类业务相对应的各条 LSP 上对应的业务流量, 若输出变量的某个分量为 0, 则表示相应的 LSP p 不存在。 ε 为权重因子, 运营商可根据对各分量目标的不同偏好来调整 ε 的取值。当运营商更偏好第 1 个目标时, $0.5 < \varepsilon \leq 1$, 偏好该目标的程度越严重, 其值越接近 1; 反之, 若运营商更偏好第 2 个目标, $0 \leq \varepsilon < 0.5$, 偏好该目标的程度越严重, 其值越接近 0。上面的优化问题中目标函数为线性的, 约束中除 QoS 跳数约束式(9c)为非线性约束, 其余约束均为线性约束, 故该问题仍为非线性规划问题。为了将所讨论的问题变为线性规划, 可对非线性约束式(9c)进行适当处理。具体过程是在算法执行前对优化问题解的可行域进行适当的预处理, 在节点 i 到 j 的路径 $P_{(i,j)}$ 中, 将不符合 PHB k 类业务流 QoS 跳数约束的路径舍去, 符合 QoS 跳数约束的路径保留作为节点 i 到 j 的 PHB k 类业务流的 LSP。这样, 原问题就简化成了线性规划问题。

该算法中变量个数为符合 QoS 跳数要求的各类 PHB 的 LSP 总和加 1, 不等式约束个数为 $L + N(N-1) \times |K|$ 。

4 仿真

仿真在 Matlab 环境下进行。仿真所用网络拓扑包含有 5 个节点 A, B, C, D, E , 每个节点既是源节点又是目的节点, 7 条双向链路 $AB, BC, AD, DE, EC, BE, BD$ 。如图 1 所示, 线上标注的数字为链路容量和链路传送单位流的费用。为了消除不同目标值量纲不同的问题, 考虑按式(11)计算链路的归一化费用 $w'_{(m,n)}$ 。

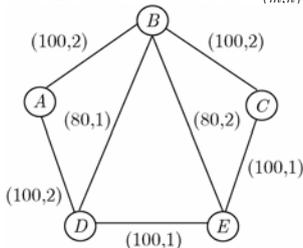


图 1 网络拓扑

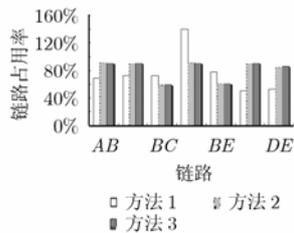


图 2 3 种不同方法链路占用率

$$w'_{(m,n)} = w_{(m,n)} * \frac{\text{mean}(z)}{\text{mean}\left(\sum_k \sum_{(i,j)} \sum_{p \in P_{(i,j)}^k} (K_{p,(i,j)}^k x_{p,(i,j)}^k)\right)} \quad (11)$$

式(11)中的 $\text{mean}(z)$ 和 $\text{mean}\left(\sum_k \sum_{(i,j)} \sum_{p \in P_{(i,j)}^k} (K_{p,(i,j)}^k x_{p,(i,j)}^k)\right)$ 分别表示 z 的均值的估算值和网络费用的均值的估算值。

假设网络中只有两类业务, 对应为 PHB EF 和 PHB AF, 并假设 EF 业务的 QoS 跳数约束为 2, AF 业务 QoS 跳数约束为 3, 由于 PHB EF 主要为实时应用, 该类业务对时延要求比较高, PHB AF 主要为数据应用, 该业务对时延要求可适当放宽, 但对丢包率有一定要求, 因此这种假设是可行的。并且假定 EF 业务占用的链路资源不大于链路资源的 10%; 同时约定 EF, AF 业务每个源节点到目的节点的 LSP 最多分别为 3 条和 4 条(若网络中还有其他类业务, 也可对 AF 业务占用的链路资源进行约束)^[4]。假设运营商更关注第 1 个设计目标, 仿真时 ε 取 0.6, 运营商可根据对网络负荷均衡性和网络费用两目标的不同偏好来调整 ε 的取值。对 EF 共设定了 42 条 LSP, AF 业务除了可用 EF 业务的 42 条 LSP 外, 还另增加了 30 条 LSP, 共设定了 72 条 LSP, 如表 1 和表 2 所示。

仿真分 5 组进行, 各组的流量需求各不相同。每组均按 3 种不同方法来预留资源, 第 1 种是按最短路径算法; 第 2 种是分别为各类 PHB 业务预留资源, 即先为 PHB 优先级高的 EF 业务预留资源, 然后在剩余的资源中为 AF 业务预留链路资源^[13]; 最后一种方案是同时为 PHB 优先级不同的各类业务预留链路资源。图 2 所示为第 4 组试验中 3 种方法所得的链路占用率情况。图 3 所示为每组试验 3 种不同方法所得链路占用率的标准偏差以及网络总的链路开销的比较。链路占用率的标准偏差是反映网络负荷均衡的性能参数^[1], 其值越大, 表明网络中各链路的占用率偏离平均链路占用率的程度越大, 因而网络中链路的负荷均衡性就差; 若其值较小, 表明网络中各链路的占用率偏离平均链路占用率的程度小, 因而网络中链路的负荷均衡性较好。

表 1 EF 和 AF 业务共同的路径

需求节点对	路径	需求节点对	路径	需求节点对	路径
(A,C)	A-B-C	(C,A)	C-B-A	(B,E)	B-E
(A,E)	A-D-E	(E,A)	E-D-A		B-C-E
	A-B-E		E-B-A	B-D-E	
(B,D)	B-D	(D,B)	D-B	(E,B)	E-B
	B-A-D		D-E-B		E-C-B
	B-E-D		D-A-B		E-D-B
(C,D)	C-B-D	(D,C)	D-B-C	(B,C)	B-C
	C-E-D		D-E-C		B-E-C
(A,B)	A-B	(B,A)	B-A	(C,B)	C-B
	A-D-B		B-D-A		C-E-B
(C,E)	C-E	(E,C)	E-C	(D,E)	D-E
	C-B-E		E-B-C		D-B-E
(A,D)	A-D	(D-A)	D-A	(E,D)	E-D
	A-B-D		D-B-A		E-B-D

表 2 为 AF 业务增加的路径

需求节点对	路 径	需求节点对	路 径	需求节点对	路 径
(A,C)	A-B-E-C	(C,A)	C-E-B-A	(A,E)	A-B-C-E
	A-D-E-C		C-E-D-A		A-D-B-E
	A-D-B-C		C-B-D-A	(B,C)	B-D-E-C
(E,A)	E-C-B-A	(C,D)	C-B-A-D	(D,C)	D-A-B-C
	E-B-D-A		C-E-B-D		D-E-B-C
(B,D)	B-C-E-D	(D,E)	D-A-B-E	(E,D)	E-C-B-D
(D,B)	D-E-C-B		D-B-C-E		E-B-A-D
(B,E)	B-A-D-E	(A,D)	A-B-E-D	(A,B)	A-D-E-B
(E,B)	E-D-A-B	(D,A)	D-E-B-A	(B,A)	B-E-D-A
(C,E)	C-B-D-E	(E,C)	E-D-B-C	(C,B)	C-E-D-B

图中方法 1 为最短路径算法, 方法 2 为分别考虑 PHB 优先级不同的业务, 方法 3 为同时考虑 PHB 优先级不同的各种业务。图 3(a)中, 方法 1 的链路占用率的标准偏差在 0.2 到 0.31 之间变化, 方法 2 和 3 的比较接近, 在 0.06 到 0.19 之间。图 3(b)中, 方法 1 的开销最小在 566 到 868 之间, 方法 2 和方法 3 的比较接近, 大致在 610 到 920 之间。从图 3 可知, 负荷均衡和网络开销是相矛盾的, 最短路径算法开销最小但负荷均衡性却是最差的。本文提出的方法, 在不同的网络负荷且网络开销增加不大的情况下, 均能有效改善链路的占用率标准偏差。网络运营商可通过适当调整 ϵ 大小, 来分别获得不同的网络负荷均衡性能和网络开销。图 4(a), 4(b) 比较了 ϵ 分别取值为 0.6 和 0.4 时, 链路占用率的标准偏差和网络开销。

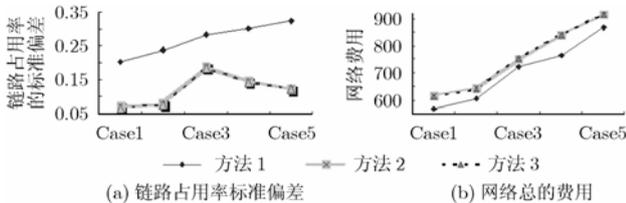


图 3

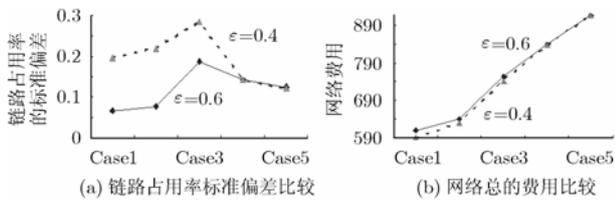


图 4

5 结束语

本文介绍了基于 MPLS 的网络配置方法, 提出了一种基于 MPLS 和 Diffserv 的域内网络资源的配置方法。它采用离线式的计算, 是一种静态的配置方法, 适用于多种业务的网络环境。仿真结果表明该方法能在网络开销增加较少的情况下, 有效地均衡网络负荷, 从而改善网络的性能。

参 考 文 献

[1] Lu Weidong and Mandal M. Optimal LSP capacity and flow

assigning using traffic engineering in MPLS networks. Global telecommunication conference, 29 Nov. 3 Dec., 2004, Vol (2): 1128-1134

[2] Awduche D, Malcolm J, and Agogbua J, *et al.* Requirements for traffic engineering over MPLS. RFC-2072, Sep. 1999.

[3] Blake. S, Black D, and Carlson M, *et al.* An architecture for differentiated services. RFC 2475, Dec. 1998.

[4] Rosen E, Viswanathan A, and Callon A. Multi protocol label switching architecture. RFC 3031, Jan. 2001.

[5] Tequila Consortium, Project presentation, Jul. 2000, <http://www.ist-tequila.org/>.

[6] Ott T, Bogovic T, and Carpenter T, *et al.* Algorithms for flow allocation for multi protocol label switching. Telcordia document. Aug. 2000.

[7] Li T and Rekhter Y. A provider architecture for differentiated services and traffic engineering (PASTE). RFC-2430, Oct. 1998.

[8] Tequila Consortium. D1.1 Functional architecture definition and top level design. Sep. 2000

[9] Grossmanz D. New terminology and clarifications for Diffserv. RFC 3260, Apr. 2002.

[10] Trimintzios P, Pavlou G, and Griffin D, *et al.* Engineering the multi-service Internet: MPLS and IP-based technique. 2001. www.ist-tequila.org/publications.

[11] Tequila Consortium. D3.4 Final system evaluation -Part B. Oct. 2002. www.ist-tequila.org/publications.

[12] Mitra D, and Ramakrishnan K G. A case study of multi service, multi priority traffic engineering design for data networks. Global telecommunication conference, 1999. Vol (1B): 1077-1083.

[13] 解可新, 韩健. 最优化方法. 天津: 天津大学出版社, 2004: 208-252.

邹园萍: 女, 1975 年生, 博士生, 研究方向为 IP 通信网的 QoS 流量工程。
 糜正琨: 男, 1946 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽带 IP 交换和通信网技术。