

基于 MPLS 流量工程的路径最优排序算法

林娜^{1,2}, 吕万方¹

(1. 沈阳航空工业学院计算机学院, 沈阳 110136; 2. 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘要:针对多协议标记交换(MPLS)网络流量工程的路由选择问题,在分析已有算法的基础上,提出一种路径最优排序算法。该算法使用一种学习机,根据随机网络环境提供的信息自动学习,计算出最佳路由优先顺序,按此顺序确定最佳转发路径。仿真结果表明该算法路由拒绝率低、计算速度快,并且能够有效地保证网络服务质量,是一种高效快捷的路由选择算法。

关键词:多协议标签交换;流量工程;服务质量;学习机;关键链路

Paths Optimal Ordering Algorithm Based on MPLS Traffic Engineering

LIN Na^{1,2}, LV Wan-fang¹

(1. School of Computer, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110136;

2. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004)

【Abstract】Based on the analysis of algorithms have been proposed, this paper proposes the Paths Optimal Ordering Algorithm(POOA) for routing issue of Multi-Protocol Label Switch(MPLS) Traffic Engineering(TE). The algorithm uses a learning machine. It can automatically learn from information proposed by a random environment, calculate the best routing priorities, and determine the best path forward by this. The simulation results indicate that routing reject ratio of the routing algorithm is smaller than that of other algorithms, its calculation speed is faster than that of other algorithms, and it can guarantee Quality of Service(QoS), so it is an efficient and quick routing algorithm.

【Key words】Multi-Protocol Label Switch(MPLS); Traffic Engineering(TE); Quality of Service(QoS); learning machine; critical link

1 概述

多协议标签交换(Multi-Protocol Label Switch, MPLS)流量工程的目标是优化网络资源和保证网络服务质量(QoS)。MPLS 是下一代网络用于骨干网的一种先进的转发机制,它为流量工程(Traffic Engineering, TE)的实施提供了便利。MPLS 技术引入标记交换概念,每个节点收到数据包后不再需要对包头中的地址进行分析和确定路由,而是通过预先建立的标记交换表进行选路和标记交换。在标记交换表形成之前,MPLS 先通过策略或选路算法,在边缘路由器确定每条业务流通过网络的标记交换路径(Label Switching Path, LSP),即业务流经过网络的节点和次序列表。这些显式 LSP 的建立,不仅可以对 IP 实时性业务提供服务质量(Quality of Service, QoS)支持,并且能够通过 LSP 的合理部署,优化网络资源,提高网络的性能^[1]。所以,显式路径 LSP 的选路问题成为流量工程的热点问题。

建立具有带宽保证的显式路径问题已经有很多研究成果。下面分析有代表性的几种算法。约束最短路径优先(CSPF)算法计算通过网络的最短路径,将特定的约束参数(如带宽需求、最大跳转数、管理策略需求等)也考虑在内,首先在当前网络拓扑结构中删除不满足约束条件的节点和链路,然后根据 MHA 算法计算最短路径。但是,CSPF 算法只能保证单个业务的服务质量,未能从全网的范围内考虑网络流量分配和性能优化。最宽最短路径(WSP)算法^[2]是选择跳数最少的最短可行路径,如果存在多条,则选择可用带宽最多的一条。它利用了链路状态信息和一些辅助的容量信息,但它只关心单

条链路的当前可用带宽和对路由业务的带宽需求,既不关心也不知道它对其他进出节点对的影响以及影响程度有多大。因而网络容易产生瓶颈效应。

最小干扰路由(MIRA)算法^[3]是与以上算法相比更好的算法,它的关键思想是在源和目的节点对之间选择一条对未来业务产生最小干扰的路径。关键链路是指网络中某些特定的链路,当在该链路上建立 LSP 预留带宽时,会导致某个或多个入口/出口节点对间的最大流减少。该算法的目标是选择包含尽可能少的关键链路的路径。但这种算法在建立每条路由时,都要采用最大流算法计算所有节点对之间的最大流,以此确定哪些链路是关键链路,这样就大大增加了算法的计算复杂度。另外 MIRA 没有考虑路由跳数以及链路的影响,因而即使网络有充足的剩余带宽来为 LSP 请求选择一条路由,MIRA 也可能拒绝。

本文提出了一种路径最优排序算法(Paths Optimal Ordering Algorithm, POOA),能够很好地克服以上各种算法中存在的缺点。该算法通过计算最佳路由优先顺序来确定最佳转发路径。

2 路径最优排序算法

以上算法总是尝试在某一时刻为刚到来的业务流寻找最

基金项目:国家“863”计划基金资助项目(863-701-2-4, 863-708-5-4);

辽宁省教育厅科学研究计划基金资助项目

作者简介:林娜(1977-),女,副教授、博士后,主研方向:下一代网络,软交换技术;吕万方,硕士研究生

收稿日期:2009-03-27 **E-mail:**lvwanfang@yahoo.com.cn

合适的转发路径，本文提出的路径最优排序算法并不仅仅努力寻找最佳路径，而是按照一定的原则对所有可行路径进行排序，优先选择排在前面的路径。

2.1 学习机

该算法使用了一种学习机(Learning Machine, LM)^[4]，它可以根据随机网络环境提供的信息自动学习，为任意入/出节点对之间的每一条可行路径赋予一个值来决定该路径的优先性，优先性越高被选择的概率就越大。LM 按照某种原则进行路径选择，同时增加这条路径的选择概率，更新排序。

设某个入/出节点对之间存在 r 条路径 $A=\{a_1, a_2, \dots, a_r\}$ ， $S=\{s_1, s_2, \dots, s_r\}$ 为对应 r 条路径的奖赏值，初始时奖赏值皆为 0，如图 1 所示。LM 首先根据环境提供的信息按照一定的反馈原则选择路径，被选中的路径进行数据流传输的同时其奖赏值也相应加 1，然后按照奖赏值对路径进行排序，在任意时刻 t ，LM 的输出是 r 条路径的排列 $\Pi(t)$ ，当 $t \rightarrow \infty$ 时， $\Pi(t)$ 将收敛为 Π^* ， Π^* 即为 LM 通过自动学习所掌握的最佳顺序，系统管理器将会按照 Π^* 依次进行路径选择。详细的过程可参见文献[4]。

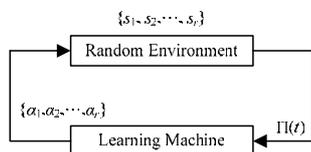


图 1 LM 与随机环境交互图

2.2 关键链路

该算法在收敛过程中主要基于关键链路^[3]的概念，它试图尽量避开那些负载较重的关键链路，从而减少未来路由请求被拒绝的可能。关键链路的确定主要基于最大流和最小割概念，最小割是指那些一旦移除就会切断某个或某些入/出节点对之间的连接的链路，任意一个流网络的最大流量等于该网络的最小割的容量。新建 LSP 应该尽量避免经过关键链路。

2.3 反馈机制

如前所述，需要一种环境反馈机制来推断路径的最佳顺序，在这里可以通过处理一些关键信息来获得。根据多年来众多专家对 QoS 路由和 TE 路由的研究，认为路径所含关键链路的数量和路径最大剩余带宽是比较重要的 2 个信息。关键链路的确定有助于减少那些容易发生堵塞的路径的负载，在 POOA 算法中，非关键路径比关键路径优先。剩余带宽代表了该路径上可以提供给数据流的最大带宽，它可以帮助估计每个入/出节点对之间的不同路径的带宽利用情况。

在此利用这 2 个信息量合成一个环境反馈函数 $\beta(i)$ ，公式如下：

$$\beta(i) = \frac{R(i)}{C(i)}$$

其中， $C(i)$ 表示路径所含关键链路的数量； $R(i)$ 表示路径最大剩余带宽。

这样组合的目的是要最小化路径所含关键链路的数量，同时保证相当的剩余带宽。

2.4 路径最优排序算法的描述

本算法分为离线和在线 2 个阶段，离线阶段的程序只在网络拓扑或者链路发生变化时执行，离线阶段的计算是一种预计算，它为在线阶段的程序作了铺垫，首先利用 K-最短路径(K-shortest path algorithm)^[5]算法在每一个入/出节点对之间选出 k 条最短路径作为备选路径，真实的网络环境中节点

和路径的数量是非常庞大的，这 k 条最短路径代表了值得考虑的路径，因为选择的路径过长同样会造成资源的浪费。在此设置一个链路带宽利用率门限 ρ_{Thresh} 作为反馈函数的一个辅助，带宽利用率高于此值的链路视为负载过重链路，有这样链路的路径将不被选择。离线阶段的程序有效地减少了在线计算的复杂度。

在线阶段为 k 条最短路径设置相应的奖赏值 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ ，初始为 0。然后利用反馈函数进行收敛计算，直到路径的顺序稳定，收敛以后即按顺序路由，如果网络拓扑或者链路发生变化则重新进行收敛计算。

POOA 的步骤如下：

输入 已知网络图 $G(N, E, B)$ 。其中， N 代表节点； E 代表链路； B 表示链路的容量。入/出节点对集合 P 。随机到来的有一定带宽要求的业务流请求。

输出 为每一个业务流请求建立一条满足带宽要求的可行路径。

Step1 离线阶段

(1) 在每一个入/出节点对之间选出 k 条最短路径作为备选路径。

(2) 设置一个链路带宽利用率门限 ρ_{Thresh}

Step2 在线阶段

学习过程：

(3) 为 k 条最短路径设置相应的奖赏值 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ ，初始 $\forall s_i, s_i=0$ 。

(4) 设置变量 n 用来记录路径排序的变化状态，初始 $n=0$ 。

(5) 针对随机到来的业务流请求，在其请求的入/出节点对之间为每一条备选路径计算反馈函数 $\beta(i)$ 的值。

(6) 选出 β 值最高的路径。

(7) 如果该路径的每一个链路的带宽利用率都低于 ρ_{Thresh} ，则沿该路径进行路由。

(8) 否则选出 β 值靠后的路径。

(9) 如果路径被选中，则沿该路径进行数据传输，并且 $s_i \leftarrow s_i + 1$ ，否则重复步骤(7)和步骤(8)。

(10) 如果每一条备选路径都没有选上，则拒绝该请求。

(11) 按 s_i 值递减的顺序对路径进行排序。如果顺序不变则 $n \leftarrow n + 1$ ，否则 $n=0$ 。

(12) 重复步骤(5)~步骤(11)，直到 $n=k$ 。

学习过程完成以后：

(13) 按照步骤(11)排好的顺序选择路径进行路由，如果带宽利用率都高于 ρ_{Thresh} ，按顺序选择下一条路径。

(14) 如果每一条备选路径都没有选上，则拒绝该请求。

3 仿真实验和分析

NS2^[6]在教育、研究方面有着广泛的应用，已经成为网络教学和科研中必不可少的网络模拟工具。在 NS2 网络环境中已经集成了 MPLS 流量工程的功能，这为本文算法的实现提供了有利条件。

为了研究文中提出的路由算法 POOA 的性能，仿真中使用的网络拓扑如图 2 所示，是无向图，即每条链路都是双向的，且容量分布不均。节点 1~节点 10 均为 MPLS 路由器，即标签转发路由器 LSR，其中节点 1、节点 2、节点 3 作为 LSP 请求节点，即 MPLS 域的入口路由器，节点 9 和节点 10 作为出口路由器。除了模拟本文提出的算法以外还将模拟 CSPF 和 MIRA，并将 3 种算法的实验结果进行比较以证明本文提出的算法是否有所改进。

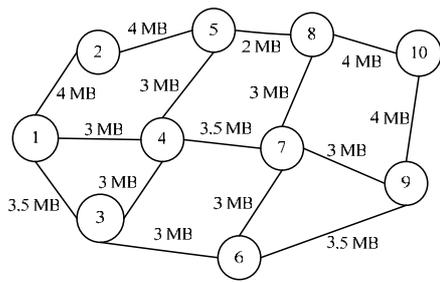


图2 仿真网络拓扑图

在3个入口节点分别建立多个LSP请求，数据源类型为UDP代理，数据包大小为200 Byte，发送速率为400 KB/s，每个LSP请求的带宽为400 KB，得到几种算法在建立LSP时的LSP请求拒绝数如图3所示，所有进出节点对被接受请求的总的带宽见图4。

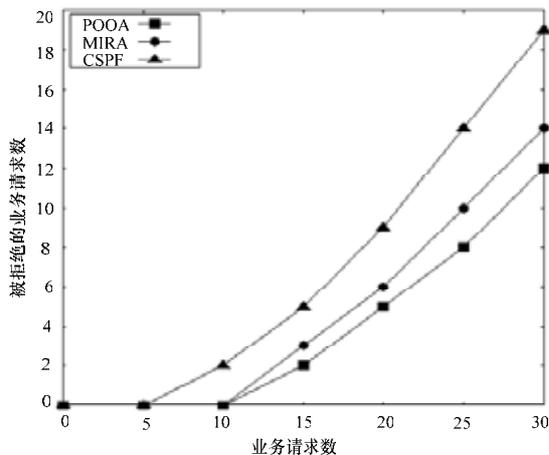


图3 请求拒绝数

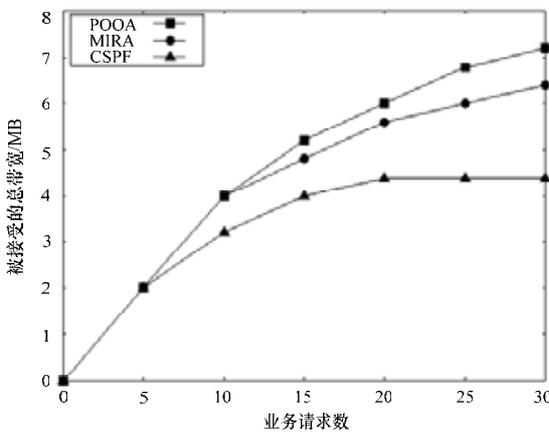


图4 总的被接受请求的带宽

从图中可以看出 CSPF 的性能比其他算法的性能都差，在10个请求之后 MIRA 和 POOA 都出现了拒绝请求的行为，但 POOA 的请求拒绝曲线始终处于最低端。而在图4中 POOA 的进出节点对之间总的被接受请求的带宽曲线一直处于最上方，这说明 POOA 算法综合考虑了入/出节点对、路由路径以及链路的影响，性能更好，使得更多的路由负载均衡地通过

网络，提高了网络资源的利用率。

表1为每种算法在不同的业务请求数目下计算每条路径时所用的平均计算时间，从表中可以看出 CSPF 的计算速度最快，因为它的计算方法比较简单，而 MIRA 的计算速度远小于其他算法，这是由于 MIRA 算法每计算一条路径都要采用最大流算法计算所有节点对之间的最大流，以此确定哪些链路是关键链路，这样就大大增加了算法的计算复杂度，这是 MIRA 最大的缺陷，从表中也可以看出随着请求数的增加计算时间也会急剧增加。

表1 每种算法计算路由的平均计算时间 s

请求数	POOA	MIRA	CSPF
5	0.065	3.159	0.002
10	0.061	3.447	0.002
15	0.065	3.553	0.002
20	0.065	3.553	0.002
25	0.061	4.572	0.003
30	0.061	4.897	0.003

而本文提出的路径最优排序算法在继承了 MIRA 算法为当前请求选择 LSP 时考虑将来可能存在的请求对链路的需求这一思想的同时，利用离线计算分担了部分算法，减少了在线的计算量。通过在线计算最佳路由由优先顺序进而按顺序进行转发，有效地减少了复杂计算的次数，因此计算时间比 MIRA 有所改进。

4 结束语

本文针对 MPLS 流量工程网络中的路径选择问题提出了一种有带宽保证的路径最优排序算法，具体描述了算法的设计思路及相关概念。该算法在选择路径时不仅考虑了关键链路的重要性，而且兼顾了链路剩余带宽的影响，并且在设计时引入了一种自动学习的机制，使得算法对随机网络环境具有了很好的适应性，从而有效地减少了复杂计算。

参考文献

- [1] Xiao Xipeng, Hannan A, Bailey B, et al. Traffic Engineering with MPLS in the Internet[J]. IEEE Network, 2000, 14(2): 28-33.
- [2] Guerin R, Orda A, Williams D. QoS Routing Mechanisms and OSPF Extensions[C]//Proc. of the 2nd IEEE Global Internet Mini-conference. Phoenix, AZ, USA: [s. n.], 1997: 1903-1908.
- [3] Kodialam M, Lakshman T V. Minimum Interference Routing with Applications to MPLS Traffic Engineering[C]//Proc. of the 19th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. Tel Aviv, Israel: [s. n.], 2000: 884-893.
- [4] Vasilakos A V, Papadimitriou G. A New Approach to the Design of Reinforcement Scheme for Learning Automata: Stochastic Estimator Learning Algorithms[J]. Neurocomputing, 1995, 7(3): 275-297.
- [5] Eppstein D. Finding the k Shortest Paths[J]. SIAM Journal of Computing, 1998, 28(2): 652-673.
- [6] 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. NS与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.

编辑 任吉慧