

文章编号:1001-9081(2006)04-0942-03

多协议标签交换网络中最小干扰路由算法的研究

许富龙¹,徐洁¹,刘英锋²

(1. 电子科技大学 计算机科学与工程学院,四川 成都 610054;

2. 煤炭科学研究总院 西安分院,陕西 西安 710054)

(fulongxu@126.com)

摘 要:在最小干扰路由(MIR)算法基础上,提出一种改进的 MIR 算法。该算法结合了基于多商品流理论的流量描述路由(PBR)算法将节点对带宽预测作为路由信息的优点,以及 MIR 算法的核心思想,给出了节点对的权值计算公式,并说明了如何在现有 MIR 算法中利用节点对的权值。改进后的算法能更好地适应实际网络路由需要,提高网络资源利用率和吞吐量。

关键词:流量工程;多协议标签交换;最小干扰路由;最大网络流;进出口节点对

中图分类号:TP393 **文献标识码:**A

Minimum interference routing algorithm for multi-protocol label switching network

XU Fu-long¹, XU Jie¹, LIU Ying-feng²

(1. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China;

2. Xi'an Branch of China Coal Research Institute, Xi'an Shaanxi 710054, China)

Abstract: An improved Minimum Interference Routing(MIR) algorithm was proposed. It adopted the idea of Profile-Based Routing(PBR) algorithm which used the flow-prediction of ingress-egress nodes as routing information. Based on this idea, ingress-egress nodes' weight formula was provided, and how to use the formula in minimum interference routing algorithm was discussed. The improved algorithm can not only meet the practical routing needs better but also heighten the resources usage and throughput of network.

Key words: traffic engineering; Multi-protocol Label Switching(MPLS); minimum interference routing; maximum network flow; ingress-egress node

0 引言

传统的路由协议采用基于目标地址的最短路径优先(Shortest Path First, SPF)算法,由于无法平衡网络负载,常常会导致网络中某些链路负荷过重,而另一些链路资源没有充分利用,从而使原本能满足流量需求的网络发生拥塞。对于这个问题,人们希望通过流量工程来解决。流量工程是指为了平衡网络的流量负载,根据数据流量来选择路径的过程。流量工程的主要目标是采用可靠有效的网络操作来优化网络资源使用和通信性能。多协议标签交换(Multi-protocol Label Switching, MPLS)是下一代 Internet 宽带网络技术,它将数据包的路由和转发相分离,利用约束路由建立显式路径,进而建立标签交换路径(Label Switched Path, LSP)。因此, MPLS 网络很适合实施流量工程,它的显式路由为流量工程的应用提供了便利。在实施流量工程的过程中,优秀的约束路由算法是工程的关键,路由算法既要满足流量的 QoS 要求,又要达到优化资源利用率的目的。

1 现有的动态路由算法介绍

简单的动态路由算法有最小跳数路径(Minimum Hop Path, MHP)算法、最宽最短路径(Widest Shortest Path, WSP)

算法和最短最宽路径(Shortest Widest Path, SWP)算法等。这些算法,都没有很好的考虑网络流量的分布情况,因此不能很好地实现流量工程。最近几年,一些比较复杂但更有效的算法陆续提出,其中比较有影响力的有最小干扰路由(Minimum Interference Routing, MIR)^[1]模型和基于多商品流理论的流量描述路由(Profile-Based Routing, PBR)^[3]模型。

2 最小干扰路由

MIR 算法基于最大网络流理论。与上述其他路由算法不同, MIR 算法引入了进出口节点对(以下简称节点对)的概念。在 MIR 模型中,虽然以后的路由请求是未知的,但网络中的所有流量所通过的入口节点和出口节点对却是能够事先确定的。节点对是 MIR 算法的一个创新,是一个很重要的概念。MIR 算法所需要的信息包括:网络拓扑结构,链路可用带宽以及节点对信息。由于一条链路可以同时承载不同节点对的传输流量,因此计算得到的路径很可能会阻塞以后到达的请求。MIR 算法利用节点对信息,很好地解决了这个问题。

MIR 算法的关键思想是:在进行路由计算时,着重选取那些对其他各个节点对的未来流量请求干扰最小的链路。根据最大网络流理论,一个节点对的最大网络流,就是在这个节点对上能够传输的业务流量的上限值。假设节点对(S1, D1)的

收稿日期:2005-10-10;修订日期:2005-12-20

作者简介:许富龙(1980-),男,河南太康人,硕士研究生,主要研究方向:计算机网络及应用;徐洁(1963-),女,四川成都人,副教授,主要研究方向:计算机网络、网络体系结构和协议分析;刘英锋(1979-),男,山西永济人,工程师,主要研究方向:计算机网络应用,软件工程。

最大流值为 v_1 。当一个流量为 D 的从 S_1 到 D_1 的请求被接受,此节点对的最大流值会随之减少 D 。同时,存在这样的情况:当一个其他节点对的 LSP 被建立, (S_1, D_1) 的最大流值也会减少。这种情况就叫做对节点对 (S_1, D_1) 的干扰。

文献[1]中构建了最小干扰路由算法的数学模型,提出了两种不同的优化目标模型,并列出了目标函数式。文献[2]对文献[1]中的算法进行了改进,又提出了更优化的目标函数,给出了相应算法。文献[4]提出的 MIRA-M 算法采用分级的链路关键度,更准确地描述了链路的权值,从而得到更优的算法。

用 θ 表示一个节点对的最大网络流值,并用向量 $I(\theta)$ 表示所有节点对的 θ 值的升序排列。这样, $I(\theta)(1)$ 就表示最小的那个最大网络流值。

2.1 WSUM-MAX^[1]

WSUM-MAX 模型将目标函数表示为最优化各节点对的带权最大流之和:

$$\text{Maximize} \sum_{(s,d) \in P(a,b)} \alpha_{sd} \theta_{sd} \quad (1)$$

将 LSP 路由请求用三元组 (u, v, d) 表示, u 代表入口节点, v 代表出口节点, 而带宽需求用 d 表示。当前 LSP 请求为 (a, b, d) 。目标函数式中的 α_{sd} 代表节点对 (s, d) 的权值, 用来表示节点对的相对重要性。例如, 对于一个至关重要的节点对, 将其 α_{sd} 值设置足够大, 从而保证路由请求在一般情况下不会干扰它。另外, P 代表网络中节点对的集合, $P \setminus (a, b)$ 表示不包括节点对 (a, b) 的集合。

在生成具体算法的过程中, 将目标函数式进行求导计算转化为各个链路的权值, 然后利用 Dijkstra 算法计算最短加权路径(具体过程可参考文献[1])。在介绍链路权值公式前, 先给出关键链路的概念: 当一条链路的可用带宽减少时, 若一个节点对的最大网络流随之减小, 那么这个链路就是这个节点对的关键链路。文献[2]中, 作为改进, Kodialam 又提出了 Δ -critical link 的概念(由于本文的目的不在于此, 所以不进行讨论), 并把它们都称作关键链路。令 C_{sd} 表示节点对 (s, d) 的关键链路集合。可以看出, 一条链路可以同时是很多个节点对的关键链路, 当路由通过此链路, 加权最大网络流之和会减少。链路的权值计算公式表明了这种思想:

$$w(l) = \sum_{(s,d): l \in C_{sd}} \alpha_{sd} \quad (2)$$

2.2 LEX-MAX^[2]

虽然 WSUM-MAX 模型与 MHP 和 WSP 相比已经有很不错的性能^[1], 但它仍然有不足之处。为了目标函数式的最优化, 一些节点对可能要作出牺牲, 即当目标函数式最优化时, 一些节点对的最大网络流值可能会变为 0 或者一个很小的值。为了避免出现这种情况, Kodialam 又提出了 LEX-MAX 模型。在此模型中, 按照各节点对的最大网络流 $I(\theta)$ 次序, 从小到大依次进行各节点对最大流值最优化处理。换句话说, 算法先找出最大网络流值最小的那个节点对来, 首先对它进行最优化; 然后找出剩余节点对集合中最大网络流最小的节点对来, 进行优化; 这样按次序进行下去, 直到最后一个节点对被优化完成。它的优化公式及推导出的链路权值公式分别为:

$$\text{Maximize} \sum_{i=1}^p \alpha_i \sum_{(s,d) \in P} y_{i,sd} \theta_{sd} \quad (3)$$

$$w(l) = \sum_{i: l \in C_{s'_i d'_i}} \alpha_i \quad (4)$$

公式中, 如果 $\theta_{sd} = I(\theta)(i)$, $y_{i,sd}$ 值为 1, 否则值为 0。 (s'_i, d'_i) 表示是 $I(\theta)(i)$ 所对应的节点对, 它的 θ 在 $I(\theta)$ 排第 i 位。 α_i 也表示权值, 但它与公式(2)中的 α_{sd} 完全不同。这里的 α_i 是为了保证按 $I(\theta)$ 顺序优化节点对最大流而专门设立的, 对 α_i 值的推导可参看文献[2]。

在权值 α_i 的保证下, LEX-MAX 模型能按照 $I(\theta)$ 对应的节点对次序依次优化各节点对最大流。文献[2]中性能分析表明: LEX-MAX 模型确实比 WSUM-MAX 模型具有更好的性能。关于 LEX-MAX 模型的节点对的权值, 文献[2]中并没重点讨论, 只是在文中说明: 若要在算法中加入节点对的权值 r_{sd} , 只需将目标函数式中的 θ_{sd} 替换为 θ_{sd}/r_{sd} , 且在进行节点对的排序时, 按照 θ_{sd}/r_{sd} 而非 θ_{sd} 的值从小到大进行排序。可以看出, Kodialam 的本意为: 节点对的权值越大, 其在节点对优化序列中的位置越靠前。

3 基于多商品流理论的路由(PBR)

在 MIR 算法出现不久, 又出现了一种以入出口节点对为主要路由信息的动态路由算法, 叫作基于多商品流理论的路由 PBR。PBR 算法借鉴了 MIR 算法的优点, 同时它对各个节点对的业务种类及流量大小进行了预测, 以此作为路由选择的一个重要信息。PBR 算法的主要思想是: 在获得各个节点对的业务种类及流量大小需求的预测信息后, 利用静态路由算法对这些预测信息进行路由计算, 从而得出最优化的链路流量分配方案。这是离线预处理阶段, 在这个阶段, 整个网络被分解为按不同业务流分类的优化了的子网络。当一个 LSP 请求到达时, 根据预处理阶段的子网络信息, 利用带宽保证的最小跳数路径算法计算路由, 同时保证该类别业务流的总占用带宽不超过预处理阶段确定的阈值范围。

PBR 算法优点在于: 它将节点对信息和流量预测信息作为路由信息, 同时引入了准入控制的概念, 对某些可能会导致网络性能恶化的 LSP 路由请求进行拦截, 而且它的计算复杂性远远优于 MIR。但是, 由于 PBR 在业务流类型之间预分配流量, 不利于网络资源的充分利用, 且由于网络内在的突发性和动态性, 作为动态路由算法, 性能会受到很大影响。

4 对最小干扰路由算法的改进

MIR 是一个很好的路由算法, 它最大的优点是不用考虑未来的路由请求。但是, 如果缺乏对未来路由请求的预测, 就会出现某些不足。例如: 某节点对的实际带宽需求值为 1000, 此时已经分配了的流量为 200, 而它的 θ 值为 800; 而另一个节点对, 它的实际带宽需求为 200, 已经分配了 200, 同时 θ 值为 50。比较这两个节点对, 前者的 θ 应该比后者更需要保护, 这是它的未来带宽需求决定的。而后者虽然 θ 值比较小, 但它不会再有新的流量请求到达, 因此, 它的 θ 减小不会影响此节点对的网络性能。由于 MIR 没有考虑这些节点对的实际带宽需求, 只能死板地按照一定规则(第 2 小节讲的三种模型)优化 θ , 路由计算很可能导致前者的 θ 继续减小, 而后者 θ 保持。

针对这种不足, 本文提出对 MIR 的改进算法。我们赞成文献[3]中描述 PBR 算法时提出的观点: “如果路由算法不考

虑网络中的流量分布信息(利用节点对和节点对的流量预测信息),那将不能最优化网络资源利用率,而这种不优化在某些情况下会很糟糕”。具体的改进思想是:引入节点对的带宽需求预测,并将此预测信息转化为节点对的权值,利用 MIR 路由的 WSUM-MAX 算法和 LEX-MAX 算法,求得链路权值,进而用 Dijkstra 计算得到更优路由。类似的,引入带宽预测转化为节点对权值并加以利用的思想在文献[5]中曾有论述,它利用与入、出节点直接相连的链路的带宽使用情况来粗略估计未来流量,并计算节点对的权值;文献[5]的观点是:当与入、出节点直接相连的链路的带宽利用率已经非常高的时候,这个节点对的未来流量需求就会很少了。本文的带宽预测思想和文献[5]不同,我们认为:当一个节点对的总带宽需求都已经满足时,此节点对的最大网络流值仍然可以很大。

4.1 节点对带宽预测

网络实际流量往往具有一定的规律性,可以通过测量统计网络流量来预测节点对的带宽需求。节点对的带宽需求还可以通过 SLA(Service Level Agreement)来获得。

4.2 节点对的权值 r_{sd}

用 r_{sd} 表示节点对的权值。合理的节点对权值公式,将使改进的 MIR 具有更优的性能。首先对节点对进行分类:有盈余的节点对和无盈余节点对。定义公式:

$$R_{sd} = \theta_{sd} - (f_{total}^{sd} - f_{alloc}^{sd}) \quad (5)$$

其中 R_{sd} 用来表示节点对 (s, d) 的盈余,即在满足 (s, d) 的预测总带宽需求(用 f_{total}^{sd} 表示)之后,最大网络流的剩余量。 f_{alloc}^{sd} 表示已经分配的流量带宽值。 $R_{sd} > 0$ 的节点对称为有盈余节点对,否则成为无盈余节点对。节点对的权值公式:

$$r_{sd} = \begin{cases} 1 + \frac{R_{min}}{R_{sd}} & R_{sd} > 0 \\ 2p + \frac{f_{total}^{sd} - f_{alloc}^{sd}}{\theta_{sd}} & R_{sd} \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, R_{min} 是所有有盈余节点对($R_{sd} > 0$)中盈余的最小值。若节点对 (s, d) 是有盈余的($R_{sd} > 0$),它的 r_{sd} 满足 $1 < r_{sd} \leq 2$,且盈余越大, r_{sd} 就越小。这样在路由计算时,保证盈余更大的节点对的关键链路被优先选择路由。公式中加 1 是为了防止当 $R_{min} \ll R_{sd}$ 时,使用公式(2)计算链路权值时体现不出关键链路的作用(因为非关键链路的权值在计算时设为一个很小的正值)。当节点对是无盈余的时($R_{sd} \leq 0$),说明 θ_{sd} 已不能满足节点对的带宽需求,对这样的节点对要重点保护,尽量使这样的节点对不受路由请求的干扰。公式表明,对无盈余的节点对,在带宽需求($f_{total}^{sd} - f_{alloc}^{sd}$)相同的情况下, θ_{sd} 越小,节点对的权值也越大。式中 p 为节点对的数量,权值公式里加上 $2p$ 是为了保证在使用该公式计算链路权值时,无盈余节点对的关键链路的权值总是大于有盈余节点对的关键路径的权值的,即使后者是很多个有盈余节点对的共同的关键链路。从上述公式很容易看出,有盈余节点对的权值总是小于无盈余节点对的权值的。这样,就可以按照 r_{sd} 的大小顺序来对节点对的重要性进行排序。

需要说明的是,虽然前面给出了具体的节点对权值公式,但节点对的权值设定还是能按照网络管理者的策略来进行不同设置的。比如,若一个节点对是用于传输某些特殊的非常重要的数据流的,决不允许其他路由请求来进行干涉,那么就

可以将其节点对的权值事先手动设置为一个非常大的值,再加上准入控制机制对某些不得不走此节点对的关键链路的 LSP 请求进行拒绝,以达到拒绝目的。而这种手动设置权值的方法可以和上述节点对权值公式(6)同时使用,以满足实际网络路由的需要。

4.3 链路的权值

在前面得出节点对的权值 r_{sd} 之后,就可以进行链路权值的计算,从而为利用 Dijkstra 计算带权最短路径做准备。对于 WSUM-MAX 模型,可以直接使用(2)式,将其中的 α_{sd} 替换为 r_{sd} 来计算 $w(l)$ 。对于 LEX-MAX 模型,为了利用权值 α_i ,简化求解复杂度,节点对的权值 r_{sd} 只用来排序,将各个节点对按照 r_{sd} 值从大到小顺序排列,然后按照这种节点对顺序(而非 $I(\theta)$ 的顺序),利用(4)计算 $w(l)$,从而保证优化最大网络流的顺序是按照节点对的权重从高到底的顺序进行。

不论是利用 WSUM-MAX 模型还是 LEX-MAX 模型来实现改进的 MIR 算法,仔细分析可以发现,它们的求链路权值的公式是相同的: $w(l) = \sum_{(s,d): l \in C_{sd}} \alpha_{sd}$,都是将此链路作为关键链路的各节点对的对应权值 α_{sd} 之和来作为此链路的权值。不同之处只在于各节点对的 α_{sd} 设置上。可以说,谁的节点对权值公式更合理,更能体现出实际网络需求,谁就会有更好的性能。所以我们认为,虽然前面计算得到的 r_{sd} 在 LEX-MAX 模型中仅仅用来确定节点对的排序,而没有用来参与具体值的计算,但是,节点对的重要性已经通过权值 α_i 来保证,所以,改进的算法应用 LEX-MAX 模型应该不会比应用 WSUM-MAX 模型得到的性能差。

5 结语

提出了一种改进的 MIR 算法。通过引入节点对的流量需求预测,结合节点对的最大网络流值,来计算出各节点对的权值,并将其作为节点对的重要性评判的标准:节点对的权值越大,越是需要重点保护。在采用 MIR 算法进行选路时,通过尽可能少地“干扰”那些相对重要的节点对,来使这些节点对的最大网络流尽可能的维持较高值,从而更好的满足实际需求,达到更小的 LSP 请求的被拒绝率。文章最后指出,合理的节点对权值公式,是优化 MIR 算法路由性能的关键。

参考文献:

- [1] KODIALAM M, LAKSHMAN TV. Minimum interference routing with applications to MPLS traffic engineering [A]. Proceedings of the Conference on Computer Communications (IEEE Infocom) [C]. 2000. 884 - 893.
- [2] KAR K, KODIALAM M, LAKSHMAN TV. MPLS traffic engineering using enhanced minimum interference routing: an approach based on lexicographic max-flow [A]. Proceedings of International Workshop on QoS [C]. 2000. 105 - 114.
- [3] SURI S, WALDVOGEL M, WARKHEDE PR. Profile-based routing: a new framework for MPLS traffic engineering [R]. Washington University Computer Science Technical Report WUCS-00-21, 2000.
- [4] 刘红, 白栋, 丁炜. 基于最小干扰路由的流量工程动态算法研究 [J]. 电子与信息学报, 2005, 27(1): 127 - 130.
- [5] XU YX, ZHANG GD. Models and Algorithms of QoS-based Routing with MPLS Traffic Engineering [A]. The 5th IEEE HSNMC [C]. Jeju Islands, Korea, 2002. 128 - 132.