

MPLS 流量工程最小干扰选路算法研究*

郑志梅⁺, 崔 勇

(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

Study of Minimum Interference Routing Algorithm for MPLS Traffic Engineering

ZHENG Zhi-Mei⁺, CUI Yong

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62785822, E-mail: zzm@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn, cy@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn

Zheng ZM, Cui Y. Study of minimum interference routing algorithm for MPLS traffic engineering. *Journal of Software*, 2006,17(4):814-821. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/814.htm>

Abstract: Multiprotocol Label Switching (MPLS) enables the deployment of Internet traffic engineering to be simple and efficient by using explicit routing of Label Switching Path (LSP). Hence, the LSP routing algorithm becomes the core and hot topic of traffic engineering. This paper analyzes the key ideas of Minimum Interference Routing Algorithm (MIRA) for LSP routing and then surveys the current improved schemes of MIRA. According to their technical methods, they are classified as reconfirming critical links class, utilizing traffic profile information class, adding admission control class, and solving multiple Quality of Service constraints class. After the key idea is analyzed for each class, their typical algorithms are presented and their advantages, suitable environments and shortcomings with a detailed comprehensive comparison are discussed. The end of the paper points out the future research field for the minimum interference routing problem.

Key words: MPLS (multiprotocol label switching); traffic engineering; interference; critical link

摘要: 多协议标记交换(multiprotocol label switching,简称 MPLS)技术运用显式的标记交换路径(label switching path,简称 LSP),使得互联网上流量工程的部署变得简单和高效.因此,LSP 选路算法成为 MPLS 流量工程中的核心和热点问题.深入剖析了 LSP 选路算法中的最小干扰选路算法(minimum interference routing algorithm,简称 MIRA)的关键思想,综述了对 MIRA 的各种改进方案,并依据其实现方案将现有主要最小干扰选路算法分为 4 类:关键链路的重新定位类、利用流量特征信息类、增加准入控制类和解决多服务质量受限类.在分析每类算法核心思想的基础上,阐述了各类的典型算法,讨论了每种算法的优点和适用环境,剖析了其中存在的主要问题,并对它们进行了综合对比.最后指出了最小干扰选路算法进一步的研究方向.

关键词: 多协议标记交换;流量工程;干扰;关键链路

中图分类号: TP393 文献标识码: A

传统的基于目的地址和跳数的路由协议容易导致部分链路成为瓶颈,造成网络拥塞和资源的利用不均^[1].流量工程(traffic engineering,简称 TE)是一种通过对网络流量的合理规划来优化网络资源,并可实现特定应用服

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60403035 (国家自然科学基金)

Received 2005-06-21; Accepted 2005-10-08

务性能要求的网络工程技术^[2,3]。多协议标记交换(multiprotocol label switching,简称 MPLS)技术具有流量工程的天然属性^[4]。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 LSP(label switching path),即业务流经过网络的节点和次序列表^[5]。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,简称 QoS)支持,并且能够通过对 LSP 的合理部署,优化网络资源,提高网络的性能^[4,6]。所以,显式路径 LSP 的选路问题成为流量工程的热点问题。

传统的以最短路径优先(shortest path first,简称 SPF)为基础的 LSP 选路算法为了实现资源的均衡利用,将网络带宽资源映射到链路权重设定中。如开放最短路径优先算法 OSPF(open shortest path first)^[7]和受限最短路径优先算法 CSPF(constraints shortest path first)^[8]分别将链路的权重定义为与链路的容量成反比或与链路的剩余容量成反比。如果每条链路的权重相同,则 SPF 算法简化为最小跳数算法 MHA(min-hop algorithm)。MHA 是一种贪婪算法,所有的业务流选用最短路径,容易引起网络中一些链路成为瓶颈链路。OSPF 引导流量使用大容量的链路,有助于负载均衡,但随着请求的不断到来,导致大容量的链路被拥塞。CSPF 的思想是优先利用负载低的链路,但容易导致业务流选择较长的路径,带来网络资源的更多投入,从而潜在地降低网络总的带宽接收。为了均衡网络资源并最小化资源消耗,最宽-最短路径算法 WSP(widest shortest path)和最短-最宽路径算法 SWP(shortest widest path)一方面将业务流引向高带宽链路,另一方面尽量降低路径长度^[9]。但这些算法在为当前业务流选择 LSP 时,都没有考虑其对将来 LSP 请求的影响,都属于贪婪算法,在优化网络资源性能上不够理想^[10,11]。

在 MPLS 网络中,边缘路由器负责 LSP 的建立,核心路由器只负责数据的转发。所以,网络中能够建立 LSP 的源和目的节点对(SD 节点对)是可知的^[3,11]。Kodialam 提出最小干扰选路算法 MIRA(minimum interference routing algorithm)^[11],利用 MPLS 网络 SD 节点对信息,在为当前请求选择 LSP 时,尽可能地避免干扰其他 SD 节点对将来请求的 LSP 建路,从而达到优化网络整体性能的目标。然而,解决各节点对之间的干扰避免问题是 NP 问题^[11,12],所以,很多研究采用启发式方案,对发生干扰的链路增加权重,选路时尽量避开这些链路。基于最小干扰思想的 LSP 选路算法在请求的选路和资源利用、链路失效时的重路由等性能上优于不考虑干扰的 SPF、WSP 和 SWP 等算法。MIRA 算法提出后,有更多研究工作在其基础上展开,分别在关键链路的定位、流量特征信息的利用、增加准入控制、解决多服务质量受限等角度对 MIRA 进行了改进。

1 最小干扰选路基本算法

Kodialam 的 MIRA 算法为其他最小干扰算法的设计基础,这里称为最小干扰选路基本算法。

1.1 最小干扰选路基本算法的设计方案

离线 TE 只有完全掌握网络中将来的业务流需求信息,才能给出最优的解决方案;在线 TE 对于每个到来的请求给出较理想的选路方案,可以满足请求的不断到来^[11]。相对于源路由,分布式路由由存在环路和多个路由节点的有效协同问题^[13];而相对于单路路径路由,多路路径路由维护管理难度大,且容易产生分组的次序混乱^[14]。鉴于以上原由,MIRA 主要研究在线的基于源路由由单路径的 LSP 选路方式。此外,基于多种度量相关的思想证明,一定条件下,队列延迟、抖动、丢失率等都可以转化为高效的带宽函数^[15]。因此,MIRA 主要研究带宽受限条件下的 LSP 选路问题,并且假设请求没有优先级,采用先到先处理的原则。

1.2 最小干扰选路基本算法的关键思想

MIRA 的关键思想是:在为当前请求选择 LSP 时,考虑将来可能存在的请求对链路的需求,该请求的 LSP 必须尽可能地避免干扰其他 SD 节点对满足将来需求的路由的建立。由于考虑所有节点对的干扰避免的确切解是一个 NP 难题^[11,16],所以,MIRA 基于特定关键链路延期加载的思想:首先,MIRA 定位当前请求的关键链路集。关键链路指的是具有这样特性的链路:一旦某 LSP 经过该链路,就会影响一个或多个 SD 节点对之间的将来请求

的 LSP 建路;然后,MIRA 根据每条关键链路上的干扰程度,设置关键链路的关键度;最后,MIRA 将链路关键度映射为链路权重,然后用 Dijkstra 算法实现干扰的最小化。

1.3 最小干扰选路基本算法设计

优化网络资源的主要表现为降低网络的请求拒绝率.Kodialam 等人设计的最小干扰选路算法 MIRA^[11],以最大化所有节点对之间最小的最大流为目标,以降低网络的请求拒绝率.因为只要属于一对 SD 节点对最大流-最小割集的一条链路的可用带宽减少时,该节点对间的最大流将会减少^[17].所以,MIRA 选取其他节点对的最大流-最小割集作为关键链路集.在为某节点对的业务流请求选择 LSP 时,要避免所选链路属于其他 SD 节点对的最小割集.为此,MIRA 设置关键链路的关键度为该链路被包含于其他节点对最小割集的次数.MIRA 算法对非关键链路的关键度视为 0,这样会导致请求选择较长的路径,引起不必要的资源浪费。

我们通过实验模拟证明,MIRA 使得各个节点对间的最大流最大化.因此,在请求拒绝率和重路由成功率等方面,MIRA 性能明显优于以往的 MHA 和 WSP 等算法.但是,MIRA 存在将关键链路定位于单个 SD 节点对、计算复杂度高等方面的缺憾。

2 MPLS 流量工程最小干扰选路算法改进

MIRA 提出后,很多研究工作对其进行了改进.对于诸多的改进算法,本文将其归类为关键链路的重新定位类、利用流量特征信息类、增加准入控制类和解决多服务质量受限类等。

2.1 关键链路的重新定位

2.1.1 用 Δ -critical links 定位关键链路

MIRA 对关键链路定义为网络中 SD 节点对的最小割集,因为属于最小割集的链路容量减少 1 个单元就会降低相应节点对间的最大流.然而,有时不属于最小割集的一条链路的容量减少多于 1 个单元,某 SD 节点对的最大流也会降低.为了克服 MIRA 只考虑链路容量减少 1 个单元来确定关键链路的不足,文献[12]中提出改进的 Δ -critical 算法,即 LMIRA(lexicographic minimum interference routing algorithm)算法.LMIRA 算法将剩余容量减少 Δ 个单元时影响 SD 节点对的最大流的链路定义为关键链路.在 LMIRA 算法中, Δ 取 1 时相当于 MIRA。

2.1.2 用链路对最大流贡献定位关键链路

MIRA 和 LMIRA 对关键链路的定位基于单个 SD 节点对,不考虑多个 SD 节点对在一条链路上的表现,潜在地导致各种请求被拒绝.尤其在网络的集中点.为此,Wang 等人提出 WSC(Wang,Su,Chen)算法^[15].WSC 在计算权重时基于 MIRA,其权重函数考虑链路对最大流的贡献;但是,对于关键链路的确定,WSC 认为如果链路对各节点对最大流的贡献比剩余容量小,意味着该链路不属于关键链路集,所以会接受额外的开销.如果链路剩余容量与它对最大流贡献相同,则该链路属于关键链路集,更高的权重值被赋予这些链路。

WSC 算法克服了 MIRA 将关键链路定位在一条 SD 节点对的缺点,但与 MIRA 和 LMIRA 一样,WSC 算法仍然需要最大流的计算,最大流计算的复杂度很高,为 $O(\min(n^{2/3}, m^{1/2}) \cdot m \cdot \log(n^2/m) \cdot \log(U))$ (m, n 分别为网络的节点数和链路数, U 为请求带宽的变化范围),不利于网络的扩展^[18,19]。

2.1.3 遍历所有链路定位关键链路

为了降低在线计算复杂度,MMWAF(max-min weighted additional flow)^[20]和 DORA(dynamic online routing algorithm)^[21]试图将复杂的在线计算转移到离线阶段.算法分为 off-line 和 on-line 两个阶段.off-line 发生在网络的源和目的节点对信息改变或网络拓扑变化时.对于关键链路的确定,MMWAF 算法试图搜索每个节点对从源到目的节点的所有路径,并对它们定义静态权重.DORA 算法通过确定每个节点对的所有 DP(disjointed paths)集,定位关键链路集以及路径的势 PPV(path potential value).在 on-line 阶段,两种算法根据当前链路上的资源重新确定其权重,并执行简单的 Dijkstra 算法,算法复杂度很低.相对于 MIRA,MMWAF 和 DORA 将复杂的在线计算转移到离线阶段,使得 on-line 阶段执行速度很高.但是,由于 off-line 执行时间太长,复杂度为 $O(n^3 m^2)$,在密度大及规模大的网络,如果网络拓扑频繁变化,则该算法实施困难^[19]。

LIOA(least interference optimization algorithm)^[22]和 HYBR(hybrid routing)算法^[23]的主要思想是:通过平衡链路上 LSP 的数量来降低竞争流之间的干扰,它们将链路的关键度设为链路上 LSP 的数量和链路剩余带宽的函数,但是,当请求带宽的变化范围很大时,链路上 LSP 的数量并不能真正反映链路的负载状况,LIOA 的性能受到影响.HYBR 则试图设定带宽门限 τ ,将业务流请求分为高带宽请求($b > \tau$)和低带宽请求($b < \tau$)以区别对待,在一定程度上改善了 LIOA 的性能,且在 $\tau=0$ 时,HYBR 与 LIOA 的性能相同.但是,这两种算法都需要扩展资源状态协议,广播链路上的 LSP 数量.

2.1.4 用优先路径定位关键链路

为了降低算法的计算复杂度及摆脱受业务流请求带宽的影响,一些算法利用基于 Dijkstra 算法的优先路径方法来定位关键链路,但它们对路径优先的定义有所不同.

LMIR(light minimum interference routing)算法^[19]定义容量最窄的路径为最优路径,提出选取具有最小可用容量的 K 条路径链路作为关键链路.我们认为:这些链路容易达到饱和,并很容易被包含到网络中任一节点对的最小割集中.该算法利用修改的 Dijkstra 算法来确定具有最小容量的 K 条路径.LMIR 实际上是通过增大容量窄的路径链路的权重,引导业务流流向剩余容量大的链路.由于 K 条最窄容量链路并不是各节点对请求的首选路径,所以这种冲突避免思想存在一定的缺陷.

SMIRA(simple minimum interference routing algorithm)^[18]通过 WSP 或 SWP 算法在网络中查找每个节点对的 K 条最优路径,每求得一条最优路径后,删除该路径上的瓶颈链路.我们认为:这 K 条路径为各节点对不考虑干扰时的首选路径.SMIRA 定义 K 条最优路径的瓶颈链路集为当前请求的关键链路集.SMIRA 算法通过对其他节点对的首选路径上的链路增加权重,降低了当前请求与将来请求的干扰.SMIRA 对非关键链路定义了静态权重,有利于引导业务流选择较短的路径,降低资源消耗.但与大多数算法一样,该算法没有考虑当前请求对链路的主观需求,没有验证各节点对的请求对其 K 条最优路径的首选状况.

MDWCRA(maximum delay-weighted capacity routing algorithm)和 M-MDWCRA(modified-MDWCRA)则认为时延最小的路径为最优路径^[24](见后文第 2.4 节).

2.2 利用流量特征信息

实际网络中,各个节点对之间的业务流类型和流量可通过测量统计或用户与提供商之间的服务等级协定 SLA(service level agreements)来确定^[25,26].如果在路径选择时合理利用这些信息,则可以使算法性能更加高效.

PBR(profile-based routing)^[25]的主要思想是,利用通过测量或 SLA 得到的网络“流量特征”信息作为将来业务流分配的粗略预测.PBR 通过离线方式将流量特征转化为多物网络流(multi-commodity flow,简称 MCF)问题,通过高效的 MCF 解决方案,并将所得结果作为准入控制指导在线路由选择,达到优化网络资源的目的.只要流量特征信息准确,请求与分类相符,PBR 就会获得很高的网络资源利用率.但这种准入控制使得如果为一类业务预分配的带宽耗尽了,则该类业务的新的请求就会被拒绝,即使存在其他业务的预分配带宽资源^[27].另外,PBR 仅仅考虑带宽受限,而其基于“流量特征”的思想难于扩展到延迟处理^[24].

与 PBR 不同,VFD(virtual flow deviation)^[26]利用 SD 节点对业务流统计信息,预测出时间 T 内将要到达的请求的 S/D 点以及带宽需求,作为虚流请求与实际请求应用 Flow Deviation 方法一起分配到网络拓扑中,以解决最小干扰问题.我们通过实验模拟证明,当入口节点流量不均衡时,VFD 的性能明显好于 MIRA.我们还在文献 [28]中提出两种数学模型.实验模拟结果显示:VFD 在不同的网络环境中,拒绝率最接近数学模型的理论低边界.但 VFD 将单个流的请求选路转化为多个流的选路,增加了算法复杂度.

2.3 增加准入控制

MPLS 流量工程的目的是合理利用网络资源,增大网络吞吐量.但是,无条件地为所有到达网络的请求搜索 LSP 路径,会导致如果选取的路径过长,势必占用更多的网络资源.所以,对于可能破坏网络整体性能请求进行有效控制,可以使网络整体性能得到更进一步的改善.

PBR 中利用离线的 MCF 得出非常高效的路由分配的同时,对进入网络的业务流请求实施准入控制.当到达

网络的业务流请求与 MCF 分类不相符时,则拒绝该请求,以保证网络长期的资源利用高效.EMIRA(exponential-MIRA)算法^[29]集合了竞争策略和最小干扰的思想,加入准入控制思想:如果找不到长度小于阈值的路径,则拒绝该请求.LCBR(link criticality based routing)算法^[27]在选择满足带宽-时延保证路径时,也加入了准入控制.LCBR 设置了一个网络角度负载均衡度量 $cost(G)$,其值越小,表示均衡度越高.对于多条满足业务流特性的路径,找到最小的 $cost(G)$ 并检验是否小于预先设置的阈值 α ,以决定接受或拒绝请求.实验结果显示,这些算法在一定程度上改善了 MIRA 的性能.

2.4 解决多服务质量受限

MPLS 网络中业务流的 QoS 特性,不仅包括带宽限制,还可能包括时延和其他特性.关于 QoS 受限问题已经有很多的研究^[15].而解决 MPLS 网络的 QoS 选路问题,还需要考虑网络资源的均衡合理性.最小干扰选路算法在多服务质量(QoS)受限问题上同样取得了很好的成果.

LCBR 对满足带宽要求的路由,用 LSS(load-based slack sharing)算法将端对端的时延分配到相应链路.在确保带宽-时延保证的同时,提供简单并高效的链路关键度符号以降低干扰,并加入准入控制(见第 2.3 节),实现网络资源性能优化.MDWCR 算法^[24]选择满足带宽-时延路由的依据是最大化每个入口-出口节点对的 DWC(delay-weighted capacity).为此,MDWCR 定位关键链路为每个节点对 K 条时延最小路径的瓶颈链路,并设关键链路权重为路径瓶颈带宽和时延的函数.TE-DB(traffic engineering-delay bandwidth)^[30]设定关键链路和链路关键度由链路负载和负载阈值共同确定.我们选择 TAMCRA(tunable accurate multiple constrained routing algorithm)算法来解决多个受限条件路径选择问题.

除以上介绍的算法以外,LCPF(least critical path first algorithm)算法^[31]探讨了网络状态信息不准确时的 LSP 选路问题;LFL(lost flow in link)算法^[32]定义了一个新的度量值链路流的丢失量 LFL,作为比例因子加入到一些在线选路算法(MIRA,LIOA 等)中,使得网络具有更好的存活性.另外,一些研究用最小干扰思想解决 GMPLS(general MPLS)网络和无线光纤网络的 LSP 选路问题,都表现出优越的性能^[33,34].

3 最小干扰选路算法综合对比

从上面介绍的诸多算法中可以看出,关键链路的定位方案对算法的性能,尤其是算法的复杂度具有很大影响.表 1 列出了几种算法在关键链路定位及性能等方面的比较.

Table 1 Schemes of critical links' identification and algorithms' characteristics or contributes

表 1 关键链路定位方案和算法特点或贡献

Algorithm	Identification of critical links	Run time	Complexity	Characteristics or contributes
MIRA	Min-Cut set of the Max-flow	On-line	High	The basic minimum interference routing algorithm
LMIRA	Δ -critical links	On-line	High	Solve the influence to the max-flow when the link's capacity decrease Δ units
WSC	The link contribution to the max-flow	On-line	High	Identify the critical links according the effect of a cluster of pairs to it
MMWAF	Traversal the set of all paths for each SD pairs	Off-line	High	Transfer the complicated computation from on-line phase to off-line phase
DORA	The set of all disjointed paths for each SD pairs	On-line	Low	
		Off-line	High	
		On-line	Low	
LIOA	All links	On-line	Low	Balance the number of the flows on the links
HYBR	All links	On-line	Low	
LMIR	The set of K -least capacity paths	On-line	Low	Identify critical links by critical paths to reduce the computation complexity of the algorithm
SMIRA	The bottleneck set of K -WSP	On-line	Low	
MDWCR	The bottleneck set of K -least delay path	On-line	Low	Solve bandwidth-delay constraints problem

从表 1 中我们可以看出,应用最大流算法定位关键链路的 MIRA,LMIRA,WSC 算法具有可靠的理论基础,但必须承受最大流的复杂计算;遍历节点对之间的所有路径来搜索关键链路的 MMWAF 和 DORA 算法,降低了

在线的计算复杂度,但庞大的离线计算使得网络拓扑变化频繁时,算法难于执行;平衡链路上 LSP 数量的 LIOA 和 HYBR 计算简单,但当请求带宽变化范围较大时,性能不够理想,并需要扩展资源状态协议来支持链路上 LSP 数量的广播;利用优先路径定位关键链路的方案,简单、高效,但优先路径的定位还值得深入研究.另外,大多数算法一方面没有考虑非关键链路的权重,容易导致选择较长的路径;另一方面一味地考虑其他节点对的需求,淡化了当前请求对链路的主观需求,不能保证真正的业务流请求选择路径时选用其他节点为其预留的链路,影响了算法的性能.

而合理利用业务流统计信息、增加准入控制对算法性能的提高开拓了新的思路.利用最小干扰思想解决 MPLS 流量工程带宽-时延等多 QoS 受限 LSP 选路问题、状态信息不准确情况下高效的 LSP 选路方案以及改进重路由性能的方案,增强了算法的适用性和健壮性.但业务流特征信息的不准确或不合理的准入控制,同样会导致网络性能的降低.其实,为了提高算法性能,设计算法时可以将多种思想结合应用.表 2 对上述一些算法的设计思想作了总结.

Table 2 Ideas of some minimum interference routing algorithms

表 2 几种最小干扰选路算法的设计思想

Design ideas	Some algorithms an its characteristics		
Utilizing traffic profile information	PBR improves network utilization by using the traffic profile data and formulating the on-line problem as a MCF problem	VFD creates a set of virtual calls based on the traffic statistics and assigns them to the network with the actual flow to realize the minimal interference	
Adding admission control	The admission principle of PBR algorithm is that which the current request matched the traffic profile or not.	The admission principle of PBR algorithm is the threshold of LSP length	LCBR algorithm's admission principle is the load balance threshold in the network
Solving multiple quality of service constraints	MDWCRA solves bandwidth-delay constraints LSPs routing by using extend Dijkstra algorithm	TE-DB uses TAMCRA to solve multi-QoS constraints question	LCBR uses LSS algorithm to ensure end-to-end delay, and long-term bandwidth
Solving accurate resource availability information is not immediately available	LCPF can be readily pre-computed for routing dozens of subsequent calls according a novel characterization of link criticality, the criticality threshold		
Improving the network survivability	LFL algorithm uses the LFL metric as a "scaling factor" for existing dynamic routing algorithms (MIRA, LIOA, etc.) to determine the LSP rerouting		

4 总结和展望

标记交换路径 LSP 选路问题是 MPLS 流量工程的核心问题.MPLS 流量工程最小干扰选路算法降低了网络拥塞率及请求拒绝率,优化了网络资源利用.

本文深入剖析了最小干扰选路算法的关键思想,综述了基本选路算法 MIRA^[11]及其主要改进方案,并依据改进思想将各种改进方案分为如下 4 类:对关键链路的重新定位类、利用流量特征信息类、增加准入控制类和解决多服务质量受限类.在分析每类中典型算法的基础上,讨论了每种算法的优点和适用环境,剖析了其中存在的主要问题,并对它们进行了综合对比.同时指出,上述几类算法的设计思想是可以相互结合的.

目前,MPLS 网络流量工程选路算法仍然面临着许多挑战,最小干扰选路算法还有许多值得研究之处.对更多 QoS 受限条件下 MPLS 的 LSP 选路问题、对于具有不同优先权请求的选路以及区分 MPLS,GMPLS 网络中 LSP 的组播路由选路问题,都有待进一步的研究.

References:

[1] Xiao XP, Hannan A, Bailey B, Ni LM. Traffic engineering with MPLS in the Internet. IEEE Network, 2001,14(2):28-33.
 [2] Awduche D, Chiu A, Elwalid A, Widjaja I, Xiao X. Overview and principles of Internet traffic engineering. RFC3272, 2002.

- [3] Lagoa CM, Che H, Movsichoff BA. Adaptive control algorithms for decentralized optimal traffic engineering in the Internet. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2004,12(3):415–428.
- [4] Swallow G. MPLS advantages for traffic engineering. *IEEE Communications Magazine*, 1999,37(12):54–57.
- [5] Awduche D, Malcolm J, Agogbua J, O'Dell M, McManus J. Requirements for traffic engineering over MPLS. RFC2702, 1999.
- [6] Mitra D, Wang Q. Stochastic traffic engineering for demand uncertainty and risk-aware network revenue management. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2005,13(2):221–233.
- [7] Fortz B, Thorup M. Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights. In: *Proc. of the 19th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000)*. 2000. 519–528.
- [8] Crawley E, Nair R, Jajagopalan B, Sandick H. A framework for QoS-based routing in the Internet. RFC2386, 1998.
- [9] Apostolopoulos G, Kama S, Williams D, Guerin R, Orda A, Przygienda T. QoS routing mechanisms and OSPF extensions. RFC 2676, 1999.
- [10] Khan JA, Alnuweiri HM. A fuzzy constraint-based routing algorithm for traffic engineering. In: *Proc. of the IEEE Global Telecommunication Conf. 2004 (GLOBECOM 2004)*. 2004,3:1366–1372.
- [11] Kodialam M, Lakshman TV. Minimum interference routing with applications to MPLS traffic engineering. In: *Proc. of the 19th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000)*. 2000,2:884–893.
- [12] Kar K, Kodialam M, Lakshman TV. MPLS traffic engineering using enhanced minimum interference routing: An approach based on lexicographic max-flow. In: *Proc. of the 8th Int'l Workshop on Quality of Service (IWQoS 2000)*. 2000. 105–114.
- [13] Chen SG, Nahrstedt K. Distributed QoS routing with imprecise state information. In: *Proc. of the 7th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks (ICCCN 1998)*. 1998. 614–621.
- [14] Tang J, Siew CK, Feng G. Parallel LSPs for constraint-based routing and load balancing in MPLS networks. *IEE Proc. on Communications*, 2005,152(1):6–12.
- [15] Cui Y, Wu JP, Xu K, Xu MW. Research on Internetwork QoS routing algorithms: A survey. *Journal of Software*, 2002,13(11):2065–2075 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/2065.htm>
- [16] Wang SX, Philip B, Chen CL. A new bandwidth guaranteed routing algorithm for MPLS traffic engineering. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2002)*. 2002,2:1001–1005.
- [17] Ahuja RK, Magnanti TL, Orlin JB. *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall, 1993.
- [18] Iliadis I, Bauer D. A new class of online minimum interference routing algorithms. In: *Proc. of the NETWORKING 2002*. LNCS 2345, 2002. 959–971.
- [19] Figueiredo GB, da Fonseca NLS, Monteiro JAS. A minimum interference routing algorithm. In: *IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2004)*. 2004,4:1942–1947.
- [20] Kumar D, Kuri J, Kumar A. Routing guaranteed bandwidth virtual paths with simultaneous maximization of additional flows. In: *IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2003)*. 2003,3:1759–1764.
- [21] Szeto W, Boutaba R, Iraqi Y. Dynamic online routing algorithm for MPLS traffic engineering. In: *Proc. of the NETWORKING 2002*. LNCS 2345, 2002. 936–946.
- [22] Bagula AB, Botha M, Krzesinski AE. Online traffic engineering: the least interference optimization algorithm. In: *IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2004)*. 2004,2:1232–1236.
- [23] Bagula AB. Online traffic engineering: A hybrid IGP+MPLS routing approach. In: *Proc. of the 5th Quality of Future Internet Services Conf., QoFIS 2004*. LNCS 3266, 2004. 134–143.
- [24] Yang Y, Zhang L, Muppala JK. Bandwidth-Delay constrained routing algorithms. *Computer Networks*, 2003,42(4):503–520.
- [25] Suri S, Waldvogel M, Bauer D, Warkhede PR. Profile-Based routing and traffic engineering. *Computer Communications*, 2003, 26(4):351–365.
- [26] Capone A, Fratta L, Martignon F. Virtual flow deviation: Dynamic routing of bandwidth guaranteed connections. In: *QoS-IP 2003*. 2003. 592–605.
- [27] Gopalan K, Chiueh TC, Lin YJ. Load balancing routing with bandwidth-delay guarantees. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42:108–113.

