

多协议标签交换流量工程隧道实时监测方法——MTRM

朱利娜^{1*}, 梁伟², 赵瑞莲¹, 毕经平²

(1. 北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029; 2. 中国科学院 计算技术研究所, 北京 100190)

(* 通信作者电子邮箱 2009000860@grad.buct.edu.cn)

摘要:针对现有工作无法实时动态监测多协议标签交换(MPLS)流量工程(TE)隧道状态变化的问题,提出了一种MPLS TE隧道实时监测方法——MTRM。在网络中植入被动采集探针以采集OSPF-TE信令,以此为基础构建网络模型,使用隧道路径实时监测算法进行实时的隧道路径计算,最终实现动态监测。仿真实验在15个节点的MPLS网络中进行。结果表明,MTRM能够在5s之内监测到隧道变化,准确率超过90%。这种MPLS TE隧道实时监测方法,大大降低了MPLS网络管理和流量工程实施的难度,具有广阔的应用前景。

关键词:网络监测;多协议标签交换;流量工程;隧道;开放式最短路径优先;CSPF

中图分类号: TP393.07 **文献标志码:** A

MTRM: real-time monitoring method for multi-protocol label switch traffic engineering tunnel

ZHU Li-na^{1*}, LIANG Wei², ZHAO Rui-lian¹, BI Jing-ping²

(1. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The available network management approaches are not able to monitor Multi-protocol Label Switch (MPLS) Traffic Engineering (TE) tunnels dynamically in real-time. To address this problem, a real-time monitoring approach for MPLS TE tunnels, called MPLS TE Tunnels Real-time Monitoring (MTRM), was proposed in this paper. A probe was placed in the network to collect Open Shortest Path First-TE (OSPF-TE) signaling messages passively. Based on the collected information, a MPLS network model was built and tunnel paths were dynamically computed using the tunnel paths real-time monitoring algorithm. The MPLS TE tunnel paths could thus be monitored in real-time. The simulation experiments were carried out on a MPLS network with 15 nodes. The results show that the proposed approach can monitor the changes of MPLS TE tunnels within five seconds, with precision over 90%. This real-time monitoring approach can greatly reduce the difficulties of MPLS network management and TE implementation, and it has a wide application prospect.

Key words: network monitoring; Multi-protocol Label Switch (MPLS); Traffic Engineering (TE); tunnel; Open Shortest Path First (OSPF); Constraint-based SPF (CSPF)

0 引言

Internet 近些年的爆炸性增长,为 Internet 服务提供商提供了巨大的商业机会,同时也对其骨干网络的管理和运营提出了更高的要求。多协议标签交换(Multi-protocol Label Switch, MPLS)吸收了异步传输模式(Asynchronous Transfer Mode, ATM)的虚路径标识符(Virtual Path Identifier, VPI)/虚通道标识符(Virtual Channel Identifier, VCI)交换思想,无缝地集成了IP路由技术的灵活性和二层交换的简捷性。骨干网中利用MPLS技术建立“虚连接”,在无连接的IP网络中增加了面向连接的属性,为IP网络增加了管理和运营手段^[1]。

MPLS应用主要包括MPLS流量工程(Traffic Engineering, TE)和MPLS虚拟专用网络(Virtual Private Network, VPN)两种。通过MPLS TE,服务提供商可以精确地控制流经的路径,从而避开拥塞的节点,解决一部分路径过载,另一部路径空闲的问题,提高网络带宽利用率。同时,MPLS TE在建立标签交换路径(Label Switched Path, LSP)隧道的过程中,可以预留资源,保证服务质量;并且可以进行定时优化,在资源紧

张的情况下,抢占低优先级LSP隧道的带宽资源。为了保证服务的连续性,MPLS TE还引入路径备份和快速重路由机制,可以在链路故障时及时进行切换。通过MPLS TE技术,服务提供商能够充分利用现有的网络资源,提供多样化的服务,优化网络资源,进行科学的网络管理。

但是,MPLS TE技术在提供上述强大的网络运行维护及建模规划能力的同时,也由于其复杂性,给MPLS网络的管理带来了巨大的挑战^[2-3]:由于MPLS TE隧道(Tunnel)是使用带有约束扩展的最短路径路由算法计算到的,因而它和其他的动态路由路径一样是动态变化的。但遗憾的是,目前却无法实时动态监测TE隧道的状态变化。这种状态变化监测的缺失严重影响了网络管理和流量工程的实施:由于缺少实时的信息,监测和侦错也受到影响;没有当前网络实时状态数据信息,随意修改网络设备或链路属性,更容易导致错误,甚至会影响用户的服务交付或导致服务等级协议(Service-Level Agreement, SLA)支出;资源规划不够精确,会浪费基础设施投资及导致计划外经费开销。因此,本文提出了一种实时监测MPLS TE隧道方法——MTRM(MPLS TE Tunnels Real-time

收稿日期:2012-01-18;修回日期:2012-03-08。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60803138; 61073035)。

作者简介:朱利娜(1987-),女,河南辉县人,硕士研究生,主要研究方向:软件测试; 梁伟(1983-),男,山东菏泽人,博士研究生,主要研究方向:网络测量和性能分析; 赵瑞莲(1964-),女,山西忻州人,教授,主要研究方向:软件测试、软件可靠性; 毕经平(1974-),女,山东莱芜人,教授,博士生导师,主要研究方向:下一代互联网、网络监测与管理、网络行为分析。

Monitoring),通过被动采集基于流量工程扩展的开放式最短路径优先(Open Shortest Path First-TE,OSPF-TE)信令,实时获取网络当前状态,进行隧道路径计算,最终实现 MPLS TE 隧道路径的动态监测。

MPLS TE 是当前 Internet 核心网主流的流量工程技术,它能够减少拥塞,保证 IP 网络的服务质量(Quality of Service, QoS)。MPLS TE 的实现主要由4部分^[4]组成。

1)在 MPLS 网络中发布包含 TE 属性的信息。MPLS TE 需要了解每条链路的 TE 相关属性,通过对使用链路状态算法的内部网关协议(Interior Gateway Protocol,IGP)进行扩展来实现,如 OSPF 协议的扩展——OSPF-TE。OSPF-TE 通过扩展 OSPF 协议的 10 类链路状态通告(Link State Advertisement, LSA),在链路状态中增加了链路带宽、优先级、属性标志位等 TE 相关属性。每台设备收集本 area 或本自治域(Autonomous Domain,AS)所有设备每条链路的 TE 相关信息,生成流量工程数据库(TE DataBase,TEDB)。

2)计算路径。MPLS TE 使用最短路径优先(Shortest Path First,SPF)算法的扩展——基于约束的 SPF(Constraint-based SPF,CSPF)算法,计算得出到达某个节点的最短路径。CSPF 算法有两个输入:隧道的 TE 约束条件及网络的 TEDB。CSPF 针对隧道的约束条件,对 TEDB 中的链路进行剪切,然后采用 SPF 算法,寻找一条隧道的最短路径。

3)使用基于流量工程扩展的资源预留协议(Resource Reservation Protocol-TE,RSVP-TE)^[5]信令建立隧道。

4)使用建立的隧道转发报文。

1 国内外研究现状

Akyildiz 等^[6]提出并实现了一个 DiffServ(Differentiated Services)/MPLS 网络管理系统 TEAM(Traffic Engineering Automated Manager),TEAM 提供网络的动态带宽管理和路由管理。基于网络状态,TEAM 能够做出正确的决策并重新配置网络,给管理大规模 DiffServ/MPLS 提供了新的模式。Kim 等^[7]总结了 MPLS TE 管理系统须满足的基本需求,并基于这些需求实现了 MPLS TE 的服务和网络管理系统。Choi 等^[8]和 Nam 等^[9]提出了通过分析 MPLS 操作管理维护(Operation Administration and Maintenance,OAM)报文中 LSP 的边到边链路信息和周期轮询 LSP 中每个节点的 LSP 静态信息来管理一条 LSP 的方法。

但以上管理流量工程 Tunnel 的方法都不适合于实时追踪 Tunnel 的动态变化。首先,Tunnel 路径随着 IGP 和带宽的变化可能快速发生变化,而以上监测 TE Tunnel 的方法都是基于相对来说不频繁的简单网络管理协议(Simple Network Management Protocol,SNMP)轮询(最少 5 min 查询一次)或不定期的配置文件下载。这就意味着只有一小部分的 Tunnel 变化被捕捉到了,大大降低了网络监测及问题解决的数据可用性。其次,由于产品实现的约束,大部分路由器并不通过 SNMP 提供 Tunnel 的详细信息。而本文提出的 MTRM 方法通过被动实时采集 MPLS 网络报文,基于实时的 MPLS 网络拓扑信息进行计算,实现了 MPLS TE 隧道路径的实时监测。

2 MTRM 方法

2.1 网络模型

MPLS 网络是一个有向有权图 $G_{\text{mplste}} = \langle N, E \rangle$ 。其中: N 为

节点集, E 为有向边集。节点 $n_i \in N$ 代表 MPLS 网络设备,节点 n_i, n_j 之间的有向边 $e_{ij} \in E$ 代表 MPLS 网络中的链路,有向边 e_{ij} 上的权值 c_{ij} 代表了有向边的 TE 约束。

图 1 描述了一个在 MPLS 网络的节点 $q \in N$ 上搜索隧道路径时的网络模型, $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_i$ 是节点 q 的邻居节点, $c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_i$ 分别为从节点 q 到其邻居节点 $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_i$ 的约束条件。这里 $c_i = \{\text{teMetric}, \text{maxReservBand}, \text{unReservBand}, \text{adminGroup}\}$, 其中:teMetric 表示管理权重,在 CSPF 算法中作为链路的 cost 值;maxReservBand 表示链路最大可预留带宽,最大值为链路最大物理带宽的 75%;unReservBand 表示链路未预留的带宽,即剩余带宽,它是一个分别对应于优先权(Priority)值 0 到 7 的一个数组,数组的每个元素保存了对应优先权的剩余带宽;adminGroup 表示管理组,用二进制数来表示,长 32 b,为链路的属性标志位。

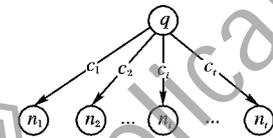


图 1 MPLS 网络模型示意图

2.2 OSPF-TE 信令被动采集方法

在网络中植入被动采集探针,通过采集 MPLS 网络中设备发布的 OSPF-TE^[10-11]报文,生成 TEDB。主要步骤:在一台 Linux 主机上运行开源软件路由器 Zebra^[12]来模拟一台路由器,Zebra 进行特殊编译,支持 MPLS 流量工程及 OSPF 10 类 LSA 的泛洪。将该 Linux 主机接入当前被监测的网络中,配置这台模拟路由器使其运行和网络中设备相同的路由协议即 OSPF-TE。该模拟路由器和网络中每个 area 中选定的一台路由器建立被动的路由对等关系,即该模拟路由器如同其他的路由器一样接入 OSPF-TE 网络。通过重定向配置,它被动地接收 OSPF-TE 报文,而不向网络中其他路由器发送 OSPF-TE 报文。

2.3 基于 OSPF-TE 被动采集的隧道路径监测方法

根据 OSPF-TE 信令被动采集方法获取的 OSPF-TE 报文,可以生成 MPLS 网络的 TEDB。基于 TEDB 构建 MPLS 网络模型,并设计隧道路径计算方法,最终实现 MPLSTE 隧道路径的实时监测。当 MPLS 网络发生变化时,会如同网络中的设备一样,实时被动采集到携带变化信息的 OSPF-TE 报文,调整 MPLS 网络的 TEDB,进而调整 MPLS 网络模型,重新进行路径计算,以达到 MPLS TE 隧道路径的实时监测。因而,隧道路径实时监测的算法可描述如下。

在 MPLS 网络 G_{mplste} 中,根据指定的隧道的配置信息 T_{con} ,计算满足 TE 约束的隧道路径^[13-14]。当链路因其他隧道的建立或其他原因发生变化时,调整 G_{mplste} ,重新进行隧道路径的计算。

MPLS TE 隧道在建立时,通常采取以下三种路径选项(path-option):动态路径、指定每一跳的显式路径和排除指定跳的显式路径。1)动态路径是一种最宽松的路径选项,CSPF^[15]算法根据隧道的源、目的和其他指定约束条件计算出满足约束的最短路径;2)指定每一跳的显式路径指定了隧道的显式路径,CSPF 算法检查指定的地址序列是否满足约束;3)排除指定跳的显式路径指定了不允许隧道经过的节点或链路,CSPF 根据隧道的源、目的、显式路径和其他指定约束条

件计算得出不经过该地址并满足其他约束的最短路径。隧道路径计算方法实现了相应的算法来实现隧道路径的实时监测,其中将排除指定跳的显式路径选项作为一种带有特定约束的动态路径选项。

对于隧道 T ,其配置信息为 $T_{con} = \{sourceID, targetID, bandwidth, affinity, affinityMask, setupPriority, holdPriority, explicitPath\}$,其中:sourceID 为隧道源节点的标识,targetID 为目的节点的标识,bandwidth 表示隧道的请求的预留带宽,affinity 表示隧道的亲和度,affinityMask 表示隧道的亲和度掩码,setupPriority 表示隧道的建立优先权,holdPriority 表示隧道的保持优先权,explicitPath 表示显式路径,指定了隧道路径的每一跳。

隧道路径的计算方法对 CSPF 算法进行了改进。对数据结构的定义如下。

节点 vertex 表示 MPLS TE 网络中的一个节点,使用路由器标识(RouterID,RID)作为其标识,同时节点中保存了从源节点到当前节点的满足流量工程约束的路径及相应的 cost 值:

$$vertex = \{RID, paths \mid paths = \{ \langle path, cost \rangle \}$$

TunnelCompute 树表示以隧道路径源节点 sourceID 为根的隧道路径生成树,实际为 MPLS TE 网络节点集合的子集,集合中的每一节点 vertex 中都保存了从源节点 sourceID 到当前节点的路径:

$TunnelCompute = \{ vertex \mid vertex \text{ 满足所有约束条件} \}$

candidates 表示隧道路径候选解集,为隧道路径计算过程中加入 TunnelCompute 树的候选节点集:

$candidates = \{ vertex \mid vertex \text{ 满足所有约束条件且尚未进入 TunnelCompute} \}$

其中一次隧道路径计算的算法如下。

1)对于使用动态路径选项建立的隧道,路径计算算法伪代码如下。

```
TunnelCompute_dynamic 算法
{
1) 将根节点 root 放入候选解集 candidates;
2) do{
3) if ( 候选解集 candidates 中最小节点 justAdded 不在 TunnelCompute 树中)
   将 justAdded 放入 TunnelCompute 树中;
4) else
5) 将 justAdded 的 paths 放入 TunnelCompute 树中对应节点的 paths 中;
6) While ( 遍历所有 justAdded 节点邻居节点) {
   //对 MPLS TE 的多种约束进行处理
7) if (链路上指定优先权的已占用带宽 < 指定优先权的预留带宽)
8) continue;
9) if (( adminGroup&affinitymask) != ( affinity&affinitymask))
10) continue;
11) While ( 遍历 justAdded 节点 paths 中的每个 path) {
12) 将该邻居节点加入 path 中并调整 path 对应的 cost 值;
13) 将该 path 加入该邻居节点的 paths 中;
14) }
15) if (该邻居节点的 paths 不为空)
16) 将该邻居节点加入候选解集 candidates 中;
```

```
}
17) } while( 候选解集 candidates 不为空)
}
```

2)使用显式路径选项建立隧道,与使用动态路径建立隧道类似,路径计算方法简述如下。

```
TunnelCompute_explicit 算法
{
1) 如果显式路径指定了从源节点到目的节点的一条路径的每一跳:
2) 如果该路径上的链路都满足以下约束
3) 链路上指定优先权的已占用带宽 > 指定优先权的预留带宽
4) ( adminGroup&raffinitymask) == ( raffinity&raffinitymask)
5) 那么:
6) 该显式路径即为隧道路径;
7) 否则:
8) 隧道建立失败;
}
```

3 实验验证

为了验证 MTRM 方法的有效性和准确性,针对图 2 所示网络拓扑^[16-17]进行两组实验:该拓扑图包括 15 个节点和 28 条双向边。细线的带宽为 12×100 个单位,粗线的带宽为 48×100 个单位。用来模拟 OC-12 链路(622.08 Mbps)和 OC-48链路(2405.376 Mbps)的带宽。在实验中,假设所有隧道都是长期存在的。使用网络虚拟软件 GNS3 模拟该网络,网络中节点使用 CISCO7200 系列路由器模拟,路由器上运行 OSPF-TE、RSVP-TE 及 MPLS 协议。

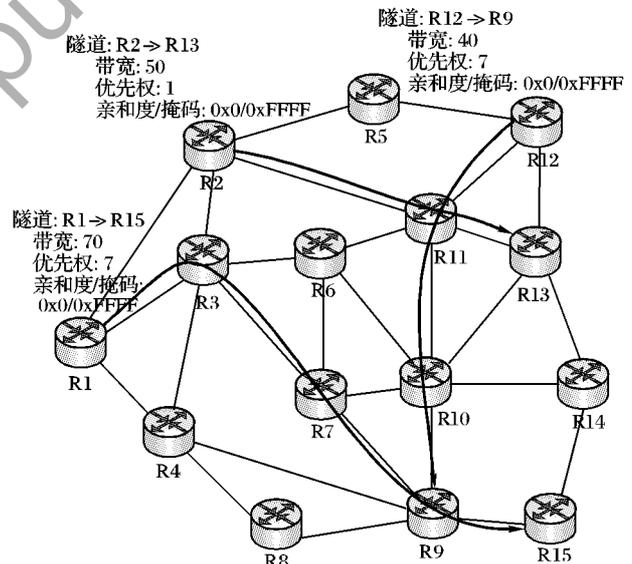


图 2 模拟网络物理连接图

实验 1 分别在 R1、R15 之间,R2、R13 之间,R12、R9 之间建立隧道,隧道的具体参数见表 1。

表 1 隧道配置参数

隧道	源节点	目的节点	预留带宽	优先权	亲和度/掩码
R1 -> R15	R1	R15	70	7	0x0/0xFFFF
R2 -> R13	R2	R13	50	1	0x0/0xFFFF
R12 -> R9	R12	R9	40	7	0x0/0xFFFF

根据用户输入的隧道参数,实时监测当前 MPLS TE 网络中用户指定隧道的路径,统计监测到的隧道路径信息及 MTRM 从发现 MPLS 网络发生变化到监测到新的隧道路径平

均所需时间。重复10次实验,实验结果见表2。

经过对每条隧道进行Telnet验证,可知:隧道实时监测方法可以准确、实时地监测网络中的每条隧道的路径。当因网络链路发生变化等原因导致隧道路径发生变化时,MTRM立即重新进行隧道路径计算,在平均不到5s的时间内监测到了隧道重新选择的新路径。

表2 实时监测方法监测结果

隧道	路径信息	时间/s
R1 -> R15	R1 -> R3 -> R7 -> R9 -> R15	4.167
R2 -> R13	R2 -> R11 -> R13	3.045
R12 -> R9	R12 -> R11 -> R10 -> R9	4.460

实验2 在模拟网络中分组建立隧道,每组10条,隧道配置参数随机生成。参数范围见表3。

表3 隧道配置参数范围

隧道配置参数	参数范围
源节点	模拟网络中任意节点
目的节点	模拟网络中不同于源节点的任意节点
预留带宽	5~20个单位
优先权	0~7的整数
亲和度	0x0或0x1
亲和度掩码	0xFFFF

重复5次实验,随着网络中隧道数量的增多,统计隧道实时监测方法准确率的变化,其中准确率为准确监测到的隧道数量除以网络中总隧道数量,实验结果见图3。从中可以看出,在这5次实验中,Test2随着隧道数量的增加,准确率从100%下降为95%、96%、90%,其他4次实验随着隧道数量的增加,准确率一直为100%。这是由于MTRM是基于网络模型及隧道配置信息进行监测的,如果网络中存在配置信息除带宽以外完全相同的两条隧道,则无法准确监测这两条隧道。但在MPLS TE网络之中,配置信息除带宽以外完全相同的隧道是很少存在的,因此,MTRM在绝大多数情况下能准确监测隧道路径。

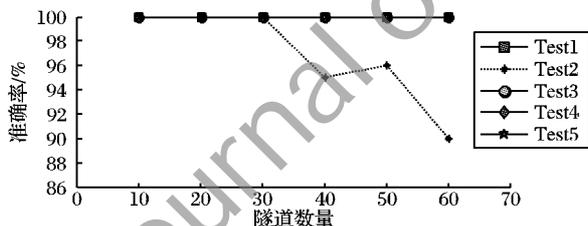


图3 准确率随隧道数量变化

4 结语

MPLS TE是一种主要的网络流量管理技术,同时由于MPLS和MPLS TE技术的复杂性,使得MPLS网络管理面临着巨大挑战。本文提出了一种与以往基于周期性轮询/离线方式不同的MPLS TE监测方法:MPLS TE隧道实时监测方法MTRM。MTRM通过监测MPLS网络的OSPF-TE信令,构建实时的MPLS网络模型,进行隧道路径计算,来实现隧道路径的动态监测。经实验验证:该方法可以实时监测隧道路径及网络拓扑的动态变化,并且在绝大多数情况下能准确监测隧道路径信息。

参考文献:

- [1] OSBORNE E, SIMBA A. Traffic engineering with MPLS [M]. Indianapolis: Cisco Press, 2002.
- [2] Packet Design Inc. Real-time traffic engineering management with route analytics [EB/OL]. [2011-10-09]. <http://www.packetdesign.com/documents/Real-Time%20Traffic%20Engineering%20Management%20with%20Route%20Analytics.pdf>.
- [3] 钟麟.基于MPLS的Internet流量工程系统设计RSVPTE信令协议的设计实现[D].成都:电子科技大学,2005.
- [4] 华为技术有限公司. Quidway NetEngine16E/08E/05路由器配置指南—MPLS[EB/OL]. [2011-06-20]. [http://61.235.93.92:168/huawei/disc1/%C2%B7%D3%C9%C6%F7/NetEngine0508E16E/%C5%E4%D6%C3%D6%B8%C4%CF-MPLS\(VRP5_30_02\)/00-1%D7%B0%D6%A1.pdf](http://61.235.93.92:168/huawei/disc1/%C2%B7%D3%C9%C6%F7/NetEngine0508E16E/%C5%E4%D6%C3%D6%B8%C4%CF-MPLS(VRP5_30_02)/00-1%D7%B0%D6%A1.pdf).
- [5] AWDUCHE D, BERGER L, GAN D, et al. RFC 3209, RSVP-TE extensions to RSVP for LSP tunnels [S]. IETF, 2001.
- [6] AKYILDIZA I F, ANJALIA T, CHENA L, et al. A new traffic engineering manager for DiffServ/MPLS networks: design and implementation on an IP QoS testbed [J]. Computer Communications, 2003, 26(4): 388-403.
- [7] KIM C, CHOI T, JEONG T. An integrated service and network management system for MPLS traffic engineering and VPN services [C]// IPOM 2003: Proceedings of the 3rd IEEE Workshop on IP Operations and Management. Piscataway: IEEE, 2003: 69-75.
- [8] CHOI T, CHUNG H, KIM C, et al. Design and implementation of an information model for integrated configuration and performance management of MPLS-TE/VPN/QoS [C]// IFIP/IEEE Eighth International Symposium on Integrated Network Management. Piscataway: IEEE, 2003: 143-146.
- [9] NAM H S, CHO E Y, YAE B H. Apparatus and method for managing quality of a label switched path in a convergence network: US, 7599310B2 [P]. 2009-10-06.
- [10] KATZ D, KOMPPELLA K, YEUNG D M, et al. RFC 3630, Traffic Engineering (TE) extensions to OSPF Version 2 [S]. IETF, 2003.
- [11] AWDUCHE D, MALCOLM J, AGOGBUA J, et al. RFC 2702, Requirements for traffic engineering over MPLS [S]. IETF, 1999.
- [12] Packet Design Inc. IP route analytics: A new foundation for modern network operations [EB/OL]. [2011-03-20]. <http://www.packetdesign.com/documents/IP%20Route%20Analytics%20White%20Paper.pdf>.
- [13] KOTTI A, HAMZA R, BOULEIMEN K. Bandwidth constrained routing algorithm for MPLS traffic engineering [C]// Proceedings of the Third International Conference on Networking and Services. Piscataway: IEEE, 2007: 20-25.
- [14] KARAMAN A. Constraint-based routing in traffic engineering [C]// Proceedings of the Seventh IEEE International Symposium on Computer Network. Piscataway: IEEE, 2006: 49-54.
- [15] 郝立刚,耿昕. OSPF的流量工程扩展和CSPF路由算法研究[J]. 无线电通信技术, 2004, 30(6): 50-52.
- [16] KODIALAM T L M. Minimum interference routing with applications to MPLS traffic engineering [C]// International Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE, 2000: 884-893.
- [17] CHAIEB I, Le ROUX J L. Improved MPLS-TE LSP path computation using preemption [C]// IEEE Global Information Infrastructure Symposium. Piscataway: IEEE, 2007: 218-221.