

## 基于人工蜘蛛的 MPLS 路由及重路由模型

杨新宇<sup>①</sup> 王向华<sup>②</sup> 史 旒<sup>①</sup> 杜 晶<sup>①</sup>  
<sup>①</sup>(西安交通大学计算机科学与技术系 西安 710049)  
<sup>②</sup>(中国兵器科学研究院 北京 100089)

**摘 要:** 该文在对 MPLS 工作原理深入了解的基础上,提出了一种新的路由模型 S-DQRA,希望在为业务建立 LSP 之初不仅考虑业务的实际需求,而且保证网络资源的合理利用。在此基础上,为了保证可靠的服务,又提出了一种新的重路由模型 S-DQRRR。在失效发生时迅速启动,将工作路径上的流量切换到备份路径上。最后,用 NS 对这两种模型进行了仿真实验,并分别与其经典的模型进行了比较,实验结果表明该文提出的路由及重路由模型均具备良好的工作性能。

**关键词:** 路由模型; 重路由模型; 人工蜘蛛

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2008)07-1619-06

## MPLS Router and Re-router Model Based on Artificial Spider

Yang Xin-yu<sup>①</sup> Wang Xiang-hua<sup>②</sup> Shi Yi<sup>①</sup> Du Jing<sup>①</sup>  
<sup>①</sup>(Dept. of Computer Science & Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)  
<sup>②</sup>(Weapon Science Research Center of China, Beijing 100089, China)

**Abstract:** In this paper, based on studying the routing algorithm and re-router model of MPLS Traffic Engineering, a new routing model S-DQRA is proposed. It not only considers the practical requirements of the traffic when the LSP is initially established, but also guarantees reasonable resource utilization. Moreover, for the warrant of more reliable service, a novel re-router model S-DQRRR is proposed based on the S-DQRA model. It works when any invalidation occurs, and switches the traffic from the work path to the backup path. Finally, extensive simulation using NS-2 is conducted to verify the effectiveness of these two models. Compared with the classical models, the experimental results indicate that the models have the favorable working performance.

**Key words:** Router model; Re-router model; Artificial spider

### 1 引言

随着计算机网络的应用与发展,人们对网络所提供的延迟、带宽等能力的要求越来越高。作为网络的一个新世界的标准,MPLS是基于标记交换的Internet Engineering Task Force (IETF)的标准。标签表明了路线和服务的特征<sup>[1]</sup>。在MPLS网络的入口,流入的数据包经过处理,选择和应用标签。中心仅仅是读标签,应用适当的服务并且基于标签转发包。详细的分析和分类只在入口发生一次。在出口,标签被剥离,数据包被转发到它们最终的目的<sup>[2]</sup>。

在MPLS网络中,通过显式路由可以任意指定业务流所走的路径。在两个业务流到达入口LSR的时候,就可以给它们分配不同的FEC,走不同的LSP。利用MPLS这种灵活的路径切换机制,可以实现针对不同业务类型要求的带有QoS需求的路由算法<sup>[3]</sup>。目前在MPLS网络中广泛使用的路由算法或者协议大部分是在IP网络中经过长时间应用和验

证的,包括最短路径算法(shortest-distance path)、最宽最短路径算法(WSP, Widest-Shortest Path)、最短最宽路径算法(SWP, Shortest-Widest Path)、动态选择路径算法(dynamic-alternative path)等<sup>[4]</sup>。这些算法已经考虑了带宽保证且各有优势,但是均没有站在网络整体的角度考虑对网络资源的利用,因此,如何在通信资源节省、网络负载均匀以及计算复杂度之间取得最佳的平衡点,这是基于约束的路由算法中的一个研究重点<sup>[5-7]</sup>。

服务质量QoS(Quality of service)和生存性(survivability)是目前Internet面临的两大问题。网络生存性是指系统发生故障时,网络仍能维持服务连续性的能力,即网络具有一定的故障恢复能力<sup>[8]</sup>。面向路径的特性使多协议标记交换MPLS在故障恢复上比IP更具优势,它可以提供毫秒级的恢复速度,而传统的IP技术则需数秒时间来检测和恢复网络故障。优化网络性能的同时保障网络可靠运行,提高网络生存性是实施MPLS流量工程的主要目标。现有的重路由模型主要以事先建立备份路径的为主<sup>[4]</sup>,比较著名的包括Haskin<sup>[9]</sup>提出的倒退式重路由模型和Makam<sup>[10]</sup>提出的全局

2006-11-27 收到, 2007-09-17 改回  
国家自然科学基金(60403028)和陕西省自然科学基金(2004F43)资助课题

式重路由模型。但这一类模型都存在着重路由时间长,丢包、失序率高,对业务传输影响大的缺点。

本文提出了一种全新的 QoS 路由模型——S-DQRA 模型,可以根据业务的实际要求灵活寻路,并针对网络负载均衡的要求提出了网络平均空闲率的概念,对路由选择进行了进一步的定义。在对重路由设计需要研究的基础上,又提出了一种动态分布式的重路由模型——S-DQRRRA 模型,在节点或者链路发生故障时启动完成本地备份路径建立的工作。

## 2 路由模型 S-DQRA

本模型最初的构造灵感来源于自然界中的蜘蛛网。现实中发现,蜘蛛总是可以灵活地根据自己在进化中业已形成一套特殊但有效的探路规则找到一条“最优路径”,并顺利抵达猎物身边。文献[11]从仿生学的角度研究了蜘蛛网的特点,提出了将网络转化为人工逻辑蛛网的设想,并试图构造一种虚拟的人工蜘蛛,实现动态的重路由过程。

在以上思想的启发下,本文也提出了构造人工蜘蛛的思想,不仅希望大大提高探路的速度,还要实现这个过程的智能化,使其可以根据网络业务中随机发生的“捕食”需求,灵活运动,并且在运动过程中完成对 QoS 需求的筛选,自动计算出某一具体过程中的最优路径。因此,将模型的名字命名为人工蜘蛛动态分布式 QoS 路由模型,即 S-DQRA(Spidery Distributed QoS Routing Algorithm)模型。

### 2.1 模型的构造

当入口节点收到业务连接请求的时候,将根据业务的 QoS 为其建立一条 LSP(Label Switch Path,标记交换路径),这个寻找符合需求的 LSP 的过程就是本文定义的路由模型的工作过程。模型的工作过程可以分为路径信息采集和路由选择两个阶段:路径信息采集是指根据 QoS 需求对路径加以筛选和收集的过程;路由选择则是根据一定的原则来确定最终路径。

根据模型设计的需要,首先构造一个人工蜘蛛,这个蜘蛛不但可以在网络中灵活运动,还必须具有 QoS 的筛选功能。因此,人工蜘蛛的构造是整个路由模型的一个关键。

**2.1.1 构造人工蜘蛛** 本文将人工蜘蛛的内部结构即所携带的信息项进行如下的设定和解释:

(1)WSL\_ID(Work-path Switch LSR\_ID):是一个整数或者一个 IP 地址值,代表 LSP 起点即入口节点 LER 的 ID。

(2)WML\_ID(Work-path Merge LSR\_ID):是一个整数或者一个 IP 地址值,代表 LSP 终点即出口节点 LER 的 ID。

(3)count:是一个大于 0 的整数值,用来表示人工蜘蛛所被允许的最大跳数即活动范围,每经过一个节点就减 1。

(4)start\_time:人工蜘蛛从 WSL 出发的时间,用来限制蜘蛛的生存时间。

(5)LSR\_List:人工蜘蛛在寻路过程中所经过的路由器

LSR 列表。

(6)相应链路状态:即路径的路径上各链路的总带宽、已用带宽(或者剩余可用带宽),用于计算网络负载。

(7)业务的 QoS 需求:所需最小带宽 minBAND,允许最大花费 maxCOST,允许最大延迟 maxDELAY 等。

(8)路径的 QoS 数据:瓶颈带宽 totalBAND,累计花费 totalCOST,累计延迟 totalDELAY 等。

(9)failure:表征蜘蛛寻路次数的标志位,第 1 次寻路为 0,第 2 次寻路为 1。

其中第(7)项中的各项参数均为可选项,根据业务的具体要求来选择是否携带和携带哪些参数,第(8)项中所携带的参数与第(7)项是对应的。

**2.1.2 人工蜘蛛行为规则** (1)蜘蛛的分类 WSL 收到业务请求后,对人工蜘蛛初始化,并令其出发。将从 WSL 出发的人工蜘蛛命名为父蜘蛛,父蜘蛛在行走过程中派生出的新蜘蛛,以及这些新蜘蛛各自又派生出的蜘蛛统称为子蜘蛛。路径信息采集的过程本质上就是以父蜘蛛的出发为开始,子蜘蛛的回归为结束的。

(2)蜘蛛的行走规则 WSL 在对父蜘蛛信息项初始化之后令其出发,同时等待子蜘蛛的到来。若等待时间超过 2 倍的最大延迟 maxDelay 则停止接受返回的子蜘蛛,表明这次寻路失败。对于刚出发的父蜘蛛,信息项(1)(2)(3)(4)(7)是已知的,对于第一次出发的父蜘蛛,(9)赋值为 0,其余未知项赋为空。父蜘蛛向 WML 行进,在行走过程中在每个出口依据派生规则派生子蜘蛛,子蜘蛛以后在每个中途节点都依据派生规则和死亡规则实现寻路,同时修改信息项(3)(5)(6)(8)的值,并派生出新蜘蛛,将所有信息项传递下去,所有到达 WML 的蜘蛛,沿原路返回 WSL,完成寻路。其中第(8)项中的各项数据的修改需要经过一些简单的计算。路径的瓶颈带宽是一个最小性度量<sup>[5]</sup>,也称为凹性度量<sup>[12]</sup>,表示整个路径的最窄链路带宽。

(3)蜘蛛的派生规则 父蜘蛛及其子蜘蛛都依照此派生规则派生出自己的子蜘蛛。若链路下一跳是信息项(5)中的值,则不派生。若链路的 QoS 属性不符合信息项(7)的要求,则不派生。

(4)蜘蛛的死亡规则 父蜘蛛及其子蜘蛛在寻路过程中都依照此死亡规则。若人工蜘蛛在某点的所有下一跳都没有派生蜘蛛,则此蜘蛛死亡。若蜘蛛已经完成了向所有下一跳的派生,则此蜘蛛死亡。若人工蜘蛛的 count 值为 0,则此蜘蛛死亡。若本地时间  $\text{now\_time} - \text{start\_time} \geq 2 * \text{max\_Delay}$ ,则此蜘蛛死亡。

### 2.2 路由选择

携带信息项返回 WSL 的人工蜘蛛表明找到了可行路径,但是网络中存在的可行路径可能不止一条,如果只是随便的择取其中一条,并不符合 QoS 路由的要求。

在网络运行过程中,如果业务请求总是被路由到某些固

定的链路, 将很容易造成这些链路的阻塞, 而其他的链路资源却没有被充分利用, 这种现象即网络负载不均衡。为了更好地解决这个问题, 本文考虑基于网络负载平衡程度进行路由选择。

一个网络可以数学表示为一个有向图  $G = \langle V, E \rangle$ ,  $V$  表示网络中路由器节点的集合,  $E$  表示路由器之间链路集合。假设网络中某条链路  $l$  的带宽容量是  $C_l$ , 链路的剩余带宽是  $R_l$ , 即链路已占用带宽为  $C_l - R_l$ , 则有链路  $l$  当前的资源空闲率为

$$B_l = R_l / C_l \quad (1)$$

若某条路径  $M$  包含链路数为  $m$ , 设这条路径的平均资源空闲率  $M(B)$ , 即

$$M(B) = \sum_{l=1}^m B_l / m \quad (2)$$

显然, 平均资源空闲率越低, 负载越重; 相反地, 平均资源空闲率越高, 负载越轻。选择负载较轻的路径有利于网络负载平衡, 同时也有利于流量传输的畅通。

收到返回的人工蜘蛛后, 分别计算所寻到的路径的平均资源空闲率  $M(B)_1, M(B)_2, M(B)_3, \dots$ , 将各路径的平均资源空闲率进行比较, 最高的即表示负载越轻, 选取其作为工作路径。

### 3 重路由模型 S-DQRRRA

本文已经提出的路由模型 S-DQRA 在一定程度上也可以运用到重路由过程中, 只是启动触发事件为失效而非业务请求, 同时启动节点也应设置为失效端的上游节点。

鉴于重路由算法需要的附加约束条件稍宽松于路由, 所以应该选择不同于路由算法的算法。对于长期的失效, 完全可以通过通知消息告诉入口 LER, 使之重新考虑另一条路径, 这样就转化成路由算法应该解决的问题了。重路由要解决的是通知消息到达入口 LER, 入口 LER 作出新的决定之前, 业务要正常传送, 数据不能丢失, 从端到端的角度看业务不能受较大影响。对于重路由模型来说, 快速恢复服务是一个重要的设计指标, 且由于重路由是一个短暂时时间范围内的事件, 因此可以不考虑网络内负载的需要。基于以上原因, 我们考虑将以上的基于 S-DQRA 模型的重路由模型加以改进, 即将单向寻路改进为双向寻路, 目的是提高算法的速度, 缩短重路由时间, 从而建立一种真正适合重路由需要的重路由模型——S-DQRRRA (Spidery Distributed QoS ReRouting Algorithm) 模型。

#### 3.1 模型的构造

**3.1.1 S-DQRRRA 模型中的人工蜘蛛** 对于 S-DQRRRA 模型来说, 必须要重新构造一个适合重路由需求的人工蜘蛛。将其内部结构即所携带的信息项进行如下的设定和解释:

(1)PSL\_ID: 是一个整数或者一个 IP 地址值, 替代路径的起点即失效端的上游节点 ID。

(2)PML\_ID: 是一个整数或者一个 IP 地址值, 替代路径的终点即失效端的下游节点 ID。

(3)hop: 是一个大于 0 的整数数值, 用来表示人工蜘蛛所被允许的最大跳数即活动范围。

(4)count: 是一个大于 0 的整数数值, 用来表示人工蜘蛛所被允许的最大跳数即活动范围, 初始值与 hop 相同, 但是每经过一个节点就减 1。

(5)walk\_time: 人工蜘蛛行走花费的时间, 用来限制蜘蛛的生存时间。

(6)LSR\_List: 人工蜘蛛经过路径的路由器 LSR 列表。

(7)业务的 QoS 需求: 最小带宽 minBAND, 最大花费 maxCOST, 最大延迟 maxDELAY 等。

(8)路径的 QoS 数据: 瓶颈带宽 totalBAND, 累计花费 totalCOST, 累计延迟 totalDELAY 等。

(9)type: 表征父蜘蛛和母蜘蛛的标志位, 父蜘蛛及其后代蜘蛛为 0, 母蜘蛛及其后代蜘蛛为 1。

(10)son: 表征子蜘蛛的标志位, 非子蜘蛛为 0, 子蜘蛛为 1。

(11)sequence: 业务的序列号, 区分不同的任务。

类似地, 第(7)项中的各项参数均是可选项, 第(8)项中所携带的参数与项(7)是对应的。

**3.1.2 人工蜘蛛分类及行为规则** (1)蜘蛛的分类 根据产生的不同时间和原因将所有的人工蜘蛛分为 3 类。

父蜘蛛: 从 PSL 出发寻路的蜘蛛以及其派生出的后代蜘蛛均称为父蜘蛛;

母蜘蛛: 从 PML 出发寻路的蜘蛛以及其派生出的后代蜘蛛均称为母蜘蛛;

子蜘蛛: 父蜘蛛、母蜘蛛相遇后产生的蜘蛛称为子蜘蛛。

(2)蜘蛛的行为规则 失效状况发生后, 位于失效链路或者节点的上游、下游节点作为 PSL, PML 分别派父母蜘蛛相向出发。在出发时, 父母蜘蛛所携带的信息项中的(1)(2)(3)(4)(7)(9)(10)(11)都是已知项, 在行进过程中, 父母蜘蛛在每个出口都依据派生规则派生自己的后代蜘蛛, 同时修改信息项(4)(5)(6)(8)。若两蜘蛛相遇, 且(11)项 sequence 相同, 将(9)项 type 位进行异或, 若值为 0, 各自继续行走, 若值为 1, 则表示父母蜘蛛相遇。父母蜘蛛相遇后, 按顺序完成一系列比较或计算如下(用下标  $f$  表示父蜘蛛的参数, 用下标  $m$  表示母蜘蛛的参数):

如果  $count_f + count_m < hop$ , 各自继续行走。

如果  $work\_time_f + work\_time_m > maxDELAY$ , 各自继续行走。

如果  $LSR\_List_f \cap LSR\_List_m \neq \emptyset$ , 各自继续行走。

经过上述计算后继续保留的一对蜘蛛产生一只子蜘蛛, 子蜘蛛的信息项(1)(2)(3)(7)(11)与其父母相同, (4)为父蜘蛛母蜘蛛的(4)项相减的绝对值, (5)为父蜘蛛母蜘蛛(5)项之和, (6)为父蜘蛛的(6)与母蜘蛛(6)的逆序的合并, (8)则根据需求

具体进行计算或比较，如瓶颈带宽为父母蜘蛛瓶颈带宽的较小项。(10)项为 1。之后，子蜘蛛沿父蜘蛛来的方向原路返回。PSL 收到首只子蜘蛛后，表示寻找备份路径成功，结束重路由过程。

(3)蜘蛛的派生规则 父蜘蛛、母蜘蛛都依照此派生规则派生出自己的后代蜘蛛。若链路下一跳是信息项(6)中的值，则不派生。若链路的 QoS 属性不符合信息项(7)的要求，则不派生。

(4)蜘蛛的死亡规则 父蜘蛛、母蜘蛛以及各自的后代蜘蛛在寻路过程中都依照此死亡规则。若人工蜘蛛在某点的所有下一跳都没有派生蜘蛛，则此蜘蛛死亡。若蜘蛛已经完成了向所有下一跳的派生，则此蜘蛛死亡。若人工蜘蛛的 count 值为 0，则此蜘蛛死亡。若父、母蜘蛛相遇派生出相应的子蜘蛛，则此父、母蜘蛛均死亡。若重路由进程结束，则正在行走的所有蜘蛛死亡。

### 3.2 S-DQRRR 模型的改进

由上述的算法描述可以看出，经过改进，PSL 收到的首条路径信息的时间肯定早于从 PSL 向 PML 单向寻路的蜘蛛。当然，如果需要收集所有的路径，则所花费时间与单向寻路的结果是一样的。因此，双向寻路的最大优势在于收到第一条可用路径的速度较快。因此，将这个双向寻路的模型运用到重路由过程中达到了我们提高算法速度、加快重路由进程的目的。

在 MPLS 自治网络的实际应用中，因为需要同时确定失效的两端节点，并且可能由于路径拥塞而造成失效下游节点的不可知，或者失效链路并非一段，逐点、逐链确定 PML 势必需要一定的时间，不符合我们提高算法速度的初衷。因此对现有的重路由模型再做一点小小的改进，考虑从最坏的情况出发，假定失效路段是从 PSL 到主路径的出口节点为止，那么可以约定将出口节点作为保护主路径的固定 PML，只要 PSL 被确定了，即可启动重路由进程，母蜘蛛在 WML 完成自我的初始化后就出发寻路，大大减少了因为确定 PML 所需要的时间。

## 4 实验及结果讨论

### 4.1 路由模型 S-DQRA 的仿真

4.1.1 仿真拓扑构造及仿真过程 本文采用 NS-2 对已提出的 S-DQRA 模型进行仿真，为了验证它的工作性能，还模拟了几种经典的已经得到广泛使用的路由模型与之比较。本文以一个实际的拓扑图：KL 拓扑为基础，进行仿真，它在国际上关于 MPLS 路由算法的研究中被广泛采用，具有一定的代表性。

网络拓扑的构造在 NS2 仿真中用 Otcl 语言实现，建立 15 个节点，作为 MPLS 网络中的 LSR，其中节点 0, 1, 3, 4, 7, 8, 11, 12, 13, 14 这 10 个节点是边缘 LSR，即 LER；节点 2, 5, 6, 9, 10 是中间 LSR。建立节点间的链路连接，

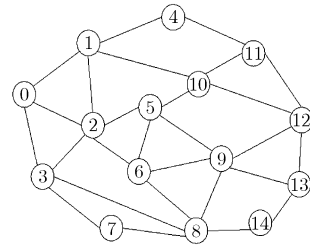


图 1 KL 拓扑

链路的带宽是 100Mb/s，延迟为 10ms，队列类型为 DropTail。在每个节点上均需要绑定标志 MPLS 网络的 Agent，但是对于不同的仿真模型，绑定的 Agent 实现的功能是一样的。设置网络中有已经按照标记规则发送的数据流，表示已经成功建立 LSP 的业务，将节点 0 和 13 设置为本实验中使用的的一对边缘节点，以 0 节点为入口，13 节点为出口，即当业务请求发生时，由 0 向 13 进行相应的寻路，建立路径。假设当前的实验业务请求要求带宽为 30，延迟要求小于 100ms。

为了便于比较，对每个模型的工作过程均记录网络日志，记录内容包括业务请求的开始时间、建立 LSP 的时间、所建立路径的节点及带宽信息等。在 LSP 建立之后，输出的是带有链路带宽信息的路径信息。

将各模型的路由时间、所建立的 LSP 的一些相关指标进行比较，如表 1 所示。

表 1 路由模型的仿真数据比较

算法	建立 LSP 时间(ms)	路径信息	跳数	LSP 带宽 (Mb/s)	平均空闲率(%)
SPF	80.72	0-1-10-12-13	5	30	42.5
WSP	82.60	0-3-8-14-13	5	35	37.5
SWP	96.44	0-1-4-11-10-12-13	7	45	45.8
S-DQRA	85.88	0-2-5-6-9-13	6	40	69.0

4.1.2 结果评价 将表 1 的数据以先后次序排列可以得到表 2。

表 2 仿真路由模型的优势比较

算法	建立 LSP 的时间	距离	LSP 带宽	平均空闲率
SPF	1st	1st	4th	3rd
WSP	2nd	1st	3rd	4th
SWP	4th	3rd	1st	2nd
S-DQRA	3rd	2nd	2nd	1st

通过模拟可以看出，最短路径算法(SPF)，最宽最短路径算法(WSP)，最短最宽路径算法(SWP)以及 S-DQRA 模型在 LSP 建立时间、距离等方面各有优势，SPF，WSP，

SWP 已经考虑了带宽保证并各有不同的侧重点，但是这些算法都没有考虑网络的资源利用率，而 S-DQRA 模型对网络负载平衡的考虑解决了这方面的问题。另外在算法的时间复杂度方面，传统的路由算法，算法的复杂度与节点数  $N$  的幂次方成正比，如 dijkstra 算法，复杂度为  $O(N^3)$ ，而 S-DQRA 模型的时间复杂度同样是与节点数  $N$  的幂次方成正比，因此在算法的时间复杂度上，S-DQRA 模型算法与传统算法相差不多，计算复杂度并不高。在网络对服务质量要求日益提高的今天，S-DQRA 模型不仅解决了网络负载平衡的问题，而且采用灵活选择的 QoS 需求指标的选择，可以针对不同的业务灵活选择。

#### 4.2 重路由模型 S-DQRRRA 的仿真

**4.2.1 仿真拓扑构造及仿真过程** 仍然采用 KL 拓扑，各条链路带宽仍设为 100Mb/s，延迟设为 10ms，仿真时间为 1000ms。根据 S-DQRA 模型的结果，将 0-2-5-6-9-13 设为要观测的实验业务的工作路径。由于实验将要模拟的 Makam 和 Haskin 模型都是属于事先建立备份路径的重路由模型，因此在建立好工作路径的同时需要相应地建立一条备份路径，即根据两个模型的不同原理，Makam 模型对应的备份路径为：0-1-4-11-12-13；Haskin 模型对应的备份路径为：9-6-5-2-0-1-4-11-12-13。

在相同的条件下，对 Makam 模型，Haskin 模型以及 S-DQRRRA 模型进行模拟。模拟条件为，由节点 0 沿工作路径向节点 13 传送数据包，将所有数据包按照发送次序编号，每隔 1ms 发一个。在第 500 个包发送后，链路或节点出现故障，各模型根据自己的工作特点进行重路由，发包 1000 个之后，结束仿真，根据包的序号及到达时间计算包的失序率、丢包率和重路由速度等。重路由速度在本文中定义为从链路或节点失效开始到目的节点接收到第 1 个重路由包的时间。我们分别对整个工作路径的所有链路 0-2，2-5，5-6，6-9，9-13 和各个节点均进行了失效后的重路由过程仿真，通过统计值的取得对各个模型进行性能评价。

**4.2.2 结果评价** 为了更加清楚地了解 3 种重路由模型 Makam，Haskin 和 S-DQRRRA 的性能优劣，本节将 3 个模型在不同链路失效情况下的重路由速度、丢包率、失序率的统计分别用曲线表示出来。

(1)重路由速度 图 2 为重路由速度比较曲线。从图中可以看出，Makam 模型和 Haskin 模型的重路由所需时间相差不多，而且对于失效位置来说，越远于入口节点，重路由速度也越慢，并且变化显著。而对于 S-DQRRRA 模型来说，重路由速度随失效位置与入口节点距离的增大而产生的变化并不明显，且由于将单向寻路模型改为双向寻路模型，减少了重路由以及业务切换的时间，整体速度高于其余两模型。

(2)丢包率 图 3 为丢包率比较曲线。已经得知 Makam 模型是一种丢包率较高的模型，而且丢包率随着失效位置与入口节点距离增大而增长的趋势相当明显。相比较而言，其

余两种模型的丢包率不高。

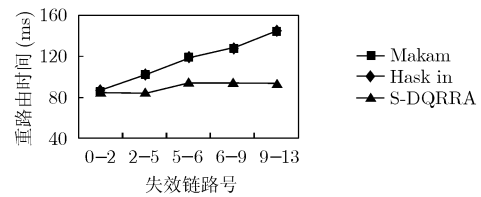


图 2 重路由速度比较

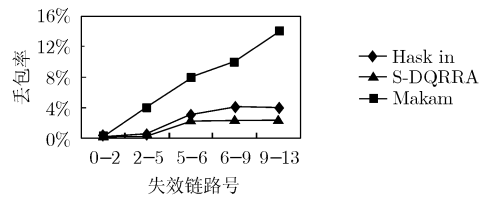


图 3 丢包率比较

(3)失序率 图 4 为失序率比较曲线。已经得知由于业务流被倒退着引入入口节点，因此 Haskin 模型是一种失序率较高的模型。而从图中曲线可以看出，其余两种模型的失序率并不高，而且随失效位置不同而产生的变化也不显著。

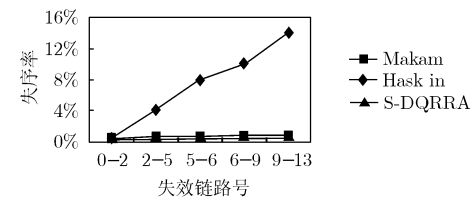


图 4 失序率比较

通过仿真表明，S-DQRRRA 模型作为一种动态的重路由模型，是在失效事件检测到之后才启动重路由进程，相比较于事先建立备份路径的重路由模型，具有重路由速度快、丢包率、失序率低的良好性能。而且 S-DQRRRA 模型的工作性能并不会随着失效链路与入口节点之间距离的变化而产生大的波动，是一种稳定的重路由模型。此外，在模型工作过程中，仍然考虑了对业务 QoS 需求的满足，因此亦可选择当时当地的最优路径，以便于提高网络资源利用率。

## 5 结束语

本文在对 MPLS 网络工作原理及路由机制的研究基础上，提出了一种全新的带有 QoS 需求的路由模型和重路由模型，为了提高工作性能，还对其进行了一系列的改进和完善。使用 NS2 工作进行仿真，通过与经典模型的对比实验，验证了模型工作性能良好，并能根据业务需求灵活的进行扩展。

## 参考文献

- [1] Awduche D and Malcolm J, *et al.* Requirements for traffic engineering over MPLS. RFC2702,1999, <http://www.ietf.org>.

- org/rfc/rfc2702.txt.
- [2] Rosen E, Viswanathan A, and Callon R. Multiprotocol label switching architecture, RFC3031, 2001. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3031.txt>.
- [3] Wydrowski B and Zukerman M. QoS in best-effort networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(12): 44-49.
- [4] Marzo J L and Calle E. QoS online routing and MPLS multilevel protection: A survey. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(10): 126-132.
- [5] 崔勇, 吴建平. 互联网络服务质量路由算法研究综述. *软件学报*, 2002, 13(11): 2065-2075.
- Cui Y and Wu J P. Research on internetwork QoS routing algorithms: A survey. *Journal of Software*, 2002, 13(11): 2065-2075.
- [6] Kamei S and Kimura T. Evaluation of routing algorithms and network topologies for MPLS traffic engineering. In Proc. IEEE Global Telecommunications Conference, San Antonio, TX, USA, 2001: 25-29.
- [7] Capone A and Martignon F. Analysis of dynamic QoS routing algorithms for MPLS networks. In Proc. IEEE International Conference on Communications, Paris, France, 2004: 1192-1196.
- [8] Manchester J. The evolution of transport network survivability. *IEEE Communications Magazine*, 1999, 37(8): 44-51.
- [9] Haskin D and Krishnan R. A method for setting an alternative label switched paths to handle fast reroute. Internet draft, 2000. <http://www.watersprings.org/pub/id/draft-haskin-mpls-fast-reroute-05.txt>.
- [10] Sharma V, *et al.* Framework for MPLS based recovery. Internet draft, 2000. <http://www.watersprings.org/pub/id/draft-ietf-mpls-recovery-frmrk-02.txt>.
- [11] 杨新宇, 王鹏, 曾明, 郑守淇. MPLS 自治系统中基于人工蜘蛛的重路由研究. *自然科学进展*, 2004, 14(7): 804-809.
- Yang X Y, Wang P, Zeng M, and Zheng S Q. Research on re-router model based-on artificial spider in MPLS autonomous systems. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(7): 804-809.
- [12] Wang Z and Crowcroft J. QoS Routing for supporting resource reservation. *IEEE JSAC*, 1996, 14(7): 1228-1234.
- 杨新宇: 男, 1973年生, 副教授, 博士后, 研究方向为计算机网络路由、计算机网络安全等.
- 王向华: 男, 1971年生, 博士, 研究方向为计算机网络.
- 史 旻: 男, 1983年生, 硕士生, 研究方向为无线传感器网络.
- 杜 晶: 女, 1978年生, 硕士, 研究方向为计算机网络.