

## 可重构服务承载网容错构建算法研究

齐宁\* 汪斌强 王志明

(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)

**摘要:** 基于可重构柔性网络(Reconfigurable Flexible Network, ReFlexNet)构建可重构服务承载网(Reconfigurable Service Carrying Network, RSCN)能够有效解决传统互联网体系结构面临的困境。论文在物理链路易发故障的前提下针对 RSCN 容错构建问题进行了数学建模和理论分析。为尽量避免重要资源故障给网络带来的影响,基于不同资源的重要程度,设计了资源紧迫度感知的 RSCN 构建算法 RSF-ACA。为提高 RSCN 的运行成功率,设计了发生网络故障时的 RSCN 恢复算法 RSLFRA。最后,通过仿真实验,从 RSCN 成功运行率、资源紧迫度和物理链路利用率 3 个方面验证了该文提出的算法的优越性。

**关键词:** 可重构柔性网络; 可重构服务承载网; 故障恢复; 资源紧迫度

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)02-0468-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00670

## Research on Reconfigurable Service Carrying Network Resilient Construction Algorithms

Qi Ning Wang Bin-qiang Wang Zhi-ming

(National Digital Switching System Engineering and Technological Research Center, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** To construct Reconfigurable Service Carrying Network (RSCN) in Reconfigurable Flexible Network (ReFlexNet) infrastructure can effectively solve the puzzle faced by traditional internet infrastructure. Resilient construction problems of RSCN in the precondition of physical link prone to failure are discussed. Mathematics model of RSCN resilient construction issues are established. To avoid enormous influence because of important resource failure, a Resource Stress Factor (RSF) Awareness RSCN Construction Algorithm named RSF-ACA is proposed. To improve success running ratio of RSCN, RSCN Link Failure Recovery Algorithm named RSLFRA is implemented when single link failure takes place. The efficiency of algorithms is evaluated by emulation experiments according to RSCN success running ratio and different RSF resource distribution and physical link utilization under several scenarios.

**Key words:** Reconfigurable Flexible Network (ReFlexNet); Reconfigurable Service Carrying Network (RSCN); Failure recovery; Resource Stress Factor (RSF)

### 1 引言

互联网由于基于IP分组交换、资源统计复用、“尽力而为”服务模式的特点,辅以覆盖网(overlay)、内容分发网络(Content Delivery Network, CDN)、虚拟专用网络(Virtual Private Network, VPN)、多协议标签交换(Multi-Protocol Label Switching, MPLS)等技术大大拓展了其所能承载的业务范围,一定程度上满足了规模化的交互式数据业务、音视频业务、组播业务等承载要求,

但并未从根本上解决互联网面临的问题,众多业务仍需通过构建物理专网的形式来运营,也使得目前的互联网体系难以支撑未来三网融合的需求。一方面在当前的互联网体系架构下,部署新的服务和技术需要对网络系统进行升级和改造,而互联网庞大的规模导致这种改造成本过高。另一方面,互联网是由众多异构的自治域组成,分别由不同的互联网服务提供商(ISP)建设、运营和管理,仅仅一个ISP部署应用新技术只能获得很少的收益,而要其他ISP都同意这样做是非常困难的。因此,虽然目前互联网应用上的创新层出不穷,但是在网络技术本身的创新却处于停滞不前的僵化境地<sup>[1]</sup>。

基于上述分析,我们摆脱传统网络技术体系的束缚,着眼于网络服务的创新视角,以用户业务需

2011-07-03 收到, 2011-10-11 改回

国家 863 计划项目(2009AA01A334, 2008AA01A323, 2008AA01A326)资助课题

\*通信作者: 齐宁 benqqn@yahoo.com.cn

求为驱动,提出了面向服务承载的可重构柔性网络(Reconfigurable Flexible Network, ReFlexNet)技术体系,基于可重构路由交换平台<sup>[2]</sup>,通过构建可重构服务承载网(Reconfigurable Service Carrying Network, RSCN)的形式快速、灵活和高效地为为用户业务提供多样化的网络服务,推动传统互联网技术向新一代网络体系平滑演进。

由于IP骨干网网络故障的时有发生<sup>[3,4]</sup>,从而造成RSCN服务中断,给用户带来不好的用户体验,同时还给服务提供者造成经济损失。因此,如何构建能够容错的RSCN以提供高可靠的承载服务亟待解决,这就迫切需要研究RSCN容错构建模型和机制,提出在发生网络故障时的高效应急措施。

针对RSCN的构建方法,主要集中在虚拟网和逻辑承载网构建算法的研究<sup>[2,5-8]</sup>。文献[5]利用混合整数规划,针对不同应用场景,有效结合节点映射和链路映射过程,分别提出了确定型虚拟网映射算法(D-ViNE)和随机虚拟网映射算法(R-ViNE)。文献[6]提出了两阶段虚拟网映射算法,首先进行节点映射,然后利用最短路算法,并基于多商品流问题进行路径集映射。文献[7]以构建成本为约束条件,以构建收益最大化为目标,研究虚拟网构建映射问题。文献[8]基于链路负载均衡度和节点负载均衡度提出自适应的均衡虚拟网构建方法。文献[2]以映射路径上所有节点的平均强度最小为目标,采用启发式算法构建逻辑承载网。以上虚拟网和逻辑承载网构建算法主要针对虚拟网构建进行最小代价或最短路径优化,没有考虑节点或链路发生故障和拥塞时的处理策略。

为此,文献[9]针对网络的动态性,提出了带迁移同时考虑网络均衡的逻辑承载网构建方法。文献[10]基于流量均衡实现虚拟网的拓扑设计,采用周期性地节点优化策略进行虚拟网重映射。文献[11]以提高传统虚拟网映射算法的需求接受率和负载均衡为目的,设计了虚节点和虚链路的重映射机制。文献[12]通过预计算备份链路,在发生链路故障时将主路径的数据迁移到备份链路上,从而避免服务中断。上述算法基于网络均衡对虚拟网构建进行重新优化映射,或者没有考虑如何避免物理网络发生故障后对ReFlexNet造成的影响以及故障恢复策略,或者仅仅通过引入备份路径,成本太高。

针对RSCN容错构建的问题,本文的解决思路是,首先结合节点和链路的联通度,对不同网络资源在网络中的重要性进行刻画,在RSCN构建过程中尽量避免使用因故障易造成网络分割的节点和链路;其次,当发生网络故障时,对故障节点或链路

进行优化重映射,以较小的重映射代价换取ReFlexNet较高的可靠性。

本文主要解决的问题包括ReFlexNet资源重要程度的描述、资源感知的RSCN容错构建模型和算法以及发生网络故障时的RSCN恢复策略等。本文组织结构如下:第2节对国内外相关研究现状进行论述;第3节对RSCN容错构建问题进行建模;第4节论述资源紧迫度感知的RSCN构建机制和发生网络故障时的RSCN恢复算法;第5节对本文提出的算法进行理论和仿真分析;第6节是本文工作的总结。

## 2 RSCN容错构建模型

### 2.1 网络模型

无向图 $G^p = (N^p, E^p, C^p)$ 表示物理网络,其中, $N^p$ 和 $E^p$ 分别表示物理节点和链路集合, $C^p$ 表示物理网络能够提供的服务承载能力,如链路带宽等。

无向图 $G^r = (N^r, E^r, R^r)$ 表示RSCN构建需求,其中, $N^r$ 和 $E^r$ 分别表示用户请求的RSCN中虚节点和虚链路的集合,分别是 $N^p$ 和 $E^p$ 的子集, $R^r$ 表示RSCN的构建请求中的服务承载能力需求。

RSCN构建问题可以描述成一个满足 $G^r$ 中约束条件的 $G^r$ 到 $G^p$ 子集的映射,用 $G^s$ 表示:

$$M: G^r \mapsto G^s, G^s = (N^s, E^s, C^s) \quad (1)$$

其中 $N^s \subset N^p$ ,  $E^s \subset E^p$ ,  $C^s$ 表示构建的RSCN能够提供的服务承载能力。

### 2.2 资源紧迫度

现有虚拟网构建算法没有对网络资源进行精确区分对待并且缺乏故障后的重映射机制。为了对不同网络资源在网络中的重要性进行刻画,本文首先提出资源紧迫度(Resource Stress Factor, RSF)的概念,主要包括两个元素:联通度(Connectivity Factor, CF)和饱和度(Saturation Factor, SF)。

如图1所示的网络中,由于许多链路都经过节点 $e$ ,一旦节点 $e$ 发生故障,将导致大面积的网络瘫痪,网络的联通性所受影响最大。因此,节点 $e$ 对网络联通程度的影响最大,其故障导致的网络联通性破坏程度也最大。为此,引入如下概念。

**定义1** 节点影响度:在网络 $G^p$ 中,设节点 $n_i$

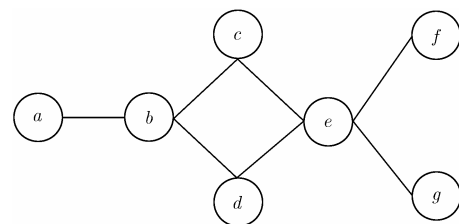


图1 网络联通度示意图

的度数为  $d_i$ ，则向量  $\mathbf{NI} = (1/d_1, 1/d_2, \dots, 1/d_n)$  为节点对邻接点的影响度向量，称之为节点影响度。

**定义 2** 节点联通度：物理网络资源的节点 CF 刻画了由于节点故障给剩余网络造成分割的程度。设  $\mathbf{A}(G^p)$  为  $G^p$  的邻接矩阵，则向量  $\mathbf{NCF} = \mathbf{NI} \cdot \mathbf{A}(G^p)$  为各节点对网络联通性的影响程度， $\mathbf{NCF}(n_i)$  的值越大，节点联通度越大，采用式(2)对其进行归一化后，称之为节点联通度。

$$\mathbf{NCF}(n_i) = \begin{cases} \frac{\mathbf{NCF}(n_i) - \min(\mathbf{NCF})}{\max(\mathbf{NCF}) - \min(\mathbf{NCF})}, & \max(\mathbf{NCF}) - \min(\mathbf{NCF}) \neq 0 \\ 1, & \max(\mathbf{NCF}) - \min(\mathbf{NCF}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

**定义 3** 链路联通度：链路的邻接节点影响度可以反映该链路故障对网络连通性的影响程度，表示成  $\text{ECF}_{i,j} = (1/d_i + 1/d_j)/2$ ，称之为链路联通度。

**定义 4** 饱和度：用于刻画当节点或链路发生故障时，有多少 RSCN 会受到影响。可以用式(3)表示。

$$\text{SF}(x) = \begin{cases} 0, & k = 0 \\ (\text{PM}_x)^{1/k}, & x \in N^p \\ (\text{PM}_x)^{1/k}, & x \in E^p \end{cases} \quad (3)$$

其中  $\text{SF}(x)$  表示资源  $x$  的饱和度， $x$  可以是节点资源，也可以是链路资源， $k$  表示资源  $x$  承载 RSCN 的个数， $\text{PM}_x$  表示资源  $x$  中已分配资源的百分比。

**定义 5** 资源紧迫度：综合考虑节点联通度、链路联通度和饱和度，由此得到资源紧迫度，用式(4)表示。

$$\Psi(x) = \begin{cases} \alpha \cdot \mathbf{NCF}(x) + \beta \cdot \text{SF}(x), & x \in N^p \\ \alpha \cdot \text{ECF}(x) + \beta \cdot \text{SF}(x), & x \in E^p \end{cases} \quad (4)$$

其中  $\Psi(x)$  表示  $x$  的资源紧迫度， $\alpha$  和  $\beta$  是调节因子，且  $\alpha + \beta = 1$ 。 $\Psi(x)$  值越大表示资源  $x$  的故障对网络影响越大。

在构建 RSCN 时不仅要考虑构建代价，还要尽量避免占用紧迫程度较高的资源，减小资源故障涉及的 RSCN 数量。为此，结合资源紧迫度以及资源初始价值，给出改进后的 RSCN 构建代价函数，如式(5)。

$$C(G^s) = \sum_{e^s \in E^s} \Psi(e^s)c(e^s) + \sum_{n^s \in N^s} \Psi(n^s)c(n^s) \quad (5)$$

其中  $c(e^s)$  和  $c(n^s)$  分别代表构建的 RSCN 所占用的物理链路和节点的初始代价。由式(5)可知，资源紧迫度越高，占用其资源构建 RSCN 时付出的代价越高。

### 3 RSCN 构建和故障恢复机制

#### 3.1 RSCN 构建机制

不失一般性，本文将 RSCN 构建需求分解为由 RSCN 中邻接的两个节点和连接这两个节点的链路带宽的基本需求，用  $(s, t, d)$  表示，其中， $s, t$  表示邻接的两个节点， $d$  表示链路带宽需求，称  $(s, t, d)$  为 RSCN 构建元需求。

完成 RSCN 构建需求分解之后，RSCN 构建问题可以简化为对元需求逐一求解的过程。RSCN 构建实际上就是在  $G^p$  中确定连接  $s$  和  $t$  的路径，记为  $P_{s,t}$ ，且  $P_{s,t}$  满足：

$$\forall e \in P_{s,t}, b(e) \geq d_e \quad (6)$$

其中  $b(e)$  表示连接链路带宽。

对于每个 RSCN 构建元需求，可能存在多条满足需求的候选路径，此时应选择构建代价最小的路径作为备选路径。

为了得到连接两个节点  $s$  和  $t$  之间的代价最小路，首先需要将  $G^p$  的权值矩阵  $\mathbf{W}(G^p)$  做如下改进：

$$w_{i,j} = \begin{cases} \infty, & a_{i,j} \neq 1 \text{ 或 } b(e_{i,j}) < d_{e_{i,j}} \\ \Psi(e_{i,j}^p)c(e_{i,j}^p) + (\Psi(n_i^p)c(n_i^p) + \Psi(n_j^p)c(n_j^p))/2, & a_{i,j} = 1 \end{cases} \quad (7)$$

然后利用最短路算法，找出代价最小路径。资源紧迫度感知的构建算法(RSF-Aware Construction Algorithm, RSF-ACA)如表 1 所示。

表 1 RSF-ACA 算法

**算法 1** RSF-ACA( $G^p, G^r, G^s$ )

输入： $G^p, G^r$

输出： $G^s$

(1)初始化  $G^s \leftarrow \text{NULL}$ ；

(2)分解 RSCN 构建需求  $G^r$ ；

对每一个 RSCN 构建元需求  $(s, t, d)$ ，执行第(3)到第(5)步：

(3)初始化  $P_{s,t}^{\min w} \leftarrow \text{NULL}$ ；

(4)按照式(7)更新  $\mathbf{W}(G^p)$ ，利用最短路算法寻找  $s, t$  之间的最小代价  $P_{s,t}^{\min w}$ ，若不存在这样的路径，则  $G^s \leftarrow \text{NULL}$ ，跳转到(6)；

(5)  $G^s \leftarrow G^s + P_{s,t}^{\min w}$ ，更新  $P_{s,t}^{\min w}$  路径上的网络服务承载能力；

(6)若  $G^s \neq \text{NULL}$ ，则返回映射结果  $G^s$ ；若  $G^s == \text{NULL}$ ，无法构建 RSCN。

算法第(3)到第(5)步计算  $s, t$  间的最短路径并从中选出代价最小路  $P_{s,t}^{\min w}$ ；第(4)步更新权值矩阵，并且基于新的权值矩阵计算  $s, t$  间的最短路；第(5)步在得到连接  $s$  和  $t$  的代价最小路  $P_{s,t}^{\min w}$  后，将  $P_{s,t}^{\min w}$  加入到  $G^s$  中，并且更新链路映射后剩余网络能力。对于分解后的每个元需求，如果找不到最小代价路，则 RSCN 构建失败。

### 3.2 RSCN 故障恢复机制

由于骨干网中单链路故障的发生概率最高,约为70%<sup>[3,4]</sup>,本文首先考虑单链路故障的RSCN恢复机制。传统的思路是对故障涉及的RSCN在剩余链路中按照构建方法进行重映射,这样会涉及众多链路,恢复成本太高。为此,本文的思路是首先对所涉及的RSCN在故障链路处进行整体迁移,找到替代链路,如果迁移成功,即能够找到一条满足带宽需求的链路,则能够在最少的时间完成所有涉及的RSCN重映射;如果找不到这样的替代链路,则按照链路占用大小进行排序,然后选择带宽需求最大的RSCN,对剩余RSCN进行整体迁移,若迁移成功,再对带宽需求最大的RSCN故障链路进行重映射,若不成功,则重复进行这一步操作。本文提出的链路恢复机制不是对整个RSCN进行调整,而是对故障发生链路进行重映射,尽量减小调整代价。RSCN单链路故障恢复算法(RSCN Single Link Failure Recovery Algorithm, RSLFRA)如表2所示。

表2 RSLFCA 算法

算法2 RSLFRA( $G^p, l$ )

输入:  $G^p, l$

输出:  $G^p$

- (1)按照链路占用从大到小的顺序对映射到 $l$ 上的RSCN进行排序,记排序后的集合记为 $M_l$ ,其中 $M_l(i)$ 表示第 $i$ 个RSCN;初始化集合 $\bar{M}_l$ 为空;
- (2)计算映射到 $l$ 上的所有RSCN链路带宽之和,记为 $B(l)$ ;
- (3)令 $d_{v_i, v_j} = B(l)$ ,按照式(7)更新 $\mathbf{W}(G^p)$ ,利用最短路算法计算连接 $l$ 两个端点之间的最小代价路 $P_i^{\min}$ ,如果不存在这样的路径,则转到(4);否则,跳转到(5);
- (4) $\bar{M}_l \leftarrow M_l(1)$ ,将 $M_l(1)$ 从 $M_l$ 中删除,令 $B(l) = \sum_{i=1}^{|\bar{M}_l|} b(M_l(i))$ ,跳转到(3);
- (5)若 $\bar{M}_l$ 不为空,对 $\bar{M}_l$ 中每一个RSCN的故障链路,更新 $\mathbf{W}(G^p)$ 后执行最短路算法寻找连接故障链路两端点之间的最小代价路,若能找到这样的一条路,则进行链路重映射,否则按照RSF-ACA算法(3)-(5)步计算虚链路两个端点间的恢复路径,若仍无法找到恢复路径,此RSCN的故障恢复失败;
- (6)若 $\bar{M}_l$ 为空,跳转到(7);
- (7)更新 $G^p$ 中所有RSCN的映射关系,返回 $G^p$ 。

本文提出的RSLFRA算法主要考虑单链路故障,对于节点故障和多链路故障可以在此基础上进行扩展,如多链路故障可以多次执行RSLFRA算法,节点故障可以看作与该节点邻接的所有链路的多链路故障。

## 4 算法分析

### 4.1 算法复杂度分析

对于RSF-ACA算法,假设 $G^p$ 中有 $n$ 个节点,

$G^r$ 中有 $m$ 个节点,则进行RSCN构建需求分解的最坏时间复杂度是 $O(m^2)$ ;假设分解后的元需求共有 $k$ 个,则对每个元需求进行权值矩阵更新和最短路算法的最坏时间复杂度都是 $O(n^2)$ ;因此RSF-ACA算法的最坏时间复杂度为 $O(m^2 + kn^2)$ 。算法消耗的存储空间主要用于存储元需求、最短路径,因此空间复杂度为 $O(k + n)$ 。

对于RSLFRA算法,假设映射到 $l$ 上的RSCN个数为 $h$ ,算法第(1)步排序的最坏时间复杂度为 $O(h^2)$ ;算法第(3)步进行权值矩阵更新和最短路算法的最坏时间复杂度都是 $O(n^2)$ ,最坏情况下第(3)步需要循环执行 $h$ 次,所以第(3)到第(4)步的最坏时间复杂度为 $O(hn^2)$ ;第(5)步执行最短路算法和RSF-ACA算法(3)-(5)步的最坏时间复杂度都为 $O(n^2)$ ,且最多执行 $h$ 次,所以第(5)步的最坏时间复杂度为 $O(hn^2)$ ;因此RSLFRA算法的最坏时间复杂度为 $O(hn^2)$ 。算法消耗的存储空间主要用于存储排序集合和最短路径,因此空间复杂度为 $O(h + n)$ 。

### 4.2 实验设定

仿真实验在配置Pentium 4 3.06 G CPU和1 G内存的普通PC上进行,实验利用BRITE工具随机产生由100个节点组成的物理网络拓扑,BRITE参数设置如下:HS=LS=100, N=100, Model=WaxMan, Node Placement=Random,  $\alpha = 0.15$ ,  $\beta = 0.2$ ,  $m=2$ , Growth Type=Incremental, BWdist=Unif, MaxBW=100, MinBW=50。因此,节点的连接概率是0.02,带宽资源在50到100间均匀分布。RSCN构建请求的到达过程服从时间单位为100,强度 $\lambda_r = 5$ 的泊松过程,链路故障发生过程服从强度为 $\lambda_f$ 的泊松过程;链路故障平均恢复时间为300单位时间;每个RSCN的生存时间服从 $\theta = 400$ 的指数分布。RSCN节点需求个数在5到10之间均匀分布,带宽需求在0到50之间均匀分布。实验过程中 $\alpha$ 和 $\beta$ 均取0.5,节点初始价值设为1,链路初始价值设为连接链路两端点的欧式距离。算法比较Basic VNA<sup>[10]</sup>, BACA<sup>[8]</sup>, RSF-ACA和具有RSLFRA的RSF-ACA(简称为RSLFRA)4个算法在RSCN成功运行率、资源紧迫度和物理链路利用率3个方面的差异。鉴于Matlab具有强大的函数库,仿真实用Matlab编写完成,为了使结果更准确,仿真共进行10次,取所有实验结果的平均值。

### 4.3 RSCN 成功运行率

RSCN成功运行率是仿真长期运行后RSCN构建成功且正常运行的个数占构建请求数的百分比,即

$$C_{\text{accept}} = C_{\text{success}} / C_{\text{all}} \quad (8)$$

仿真长期运行后的 RSCN 成功运行率可以反映构建方法的有效性和构建的 RSCN 的容错性, 成功运行率越高表明构建方法越有效且容错性越高, 图 2 是在  $\lambda_f/\lambda_r$  取不同值的情况下, 仿真运行时间为 10000 单位时间时的平均成功运行率结果。

从实验数据可知, 当  $\lambda_f/\lambda_r$  值较小时, 链路故障概率远小于请求到达率, 几种算法的成功运行率都相对较高; 随着  $\lambda_f/\lambda_r$  值增大, 链路故障概率逐渐升高, RSCN 的成功运行率均出现下降, 但下降趋势各异。其中, Basic VNA 虽然考虑了节点及链路的最大负载强度, 但仅采用最短路径算法进行选路, 且没有考虑资源紧迫度, 容易产生瓶颈资源, 成功运行率较低; BACA 在资源分配过程中考虑了整个网络的负载均衡情况, 较好地优化利用了网络资源, 为构建更多的 RSCN 提供了保证, 成功运行率较前者明显要高, 但由于没有考虑资源紧迫度, 容易占用关键资源, 在故障发生时 RSCN 受影响数量较多, 因此成功运行率相对较低; RSF-ACA 没有对故障 RSCN 的恢复机制, 只能等待故障链路自动恢复, 成功运行率较前者较高; RSLFRA 由于在故障发生时能够恢复部分 RSCN 的故障链路, 且构建 RSCN 时充分考虑了资源的紧迫程度, 因此成功运行率最高。

#### 4.4 资源紧迫度

RSF 可以反映出资源成为瓶颈资源的可能性, 图 3 是仿真运行时间为 10000 单位时间,  $\lambda_f/\lambda_r = 0.1$  时的不同 RSF 资源的分布情况。

由实验数据可知, Basic VNA 仅采用最短路径算法进行选路, 且没有考虑资源紧迫度, 容易产生瓶颈资源, 具有较高 RSF 的资源比例较大; BACA 在资源分配过程中考虑了整个网络的负载均衡情况, 较好地优化利用了网络资源, 高 RSF 资源比例较少; RSLFRA 由于在故障发生时能够恢复部分 RSCN 的故障链路, 且构建 RSCN 时充分考虑了资源的紧迫程度, 因此成功运行率有所提高, 资源利用率有所提高, 致使高 RSF 资源较无恢复机制的

RSF-ACA 略高; RSF-ACA 充分考虑了资源的紧迫程度, 且没有对故障 RSCN 的恢复机制, 资源占用率较小, 高 RSF 资源比例最小。

#### 4.5 物理链路利用率

物理链路平均利用率是利用算法所构建的 RSCN 所占链路带宽之和与物理网络所有链路资源带宽之和的比值, 即

$$\bar{U}_e = \frac{\sum_{e^s \in E^s} b(e^s)}{\sum_{e^p \in E^p} b(e^p)} \quad (9)$$

在完成 RSCN 构建后, 平均网络链路利用率可以反映 RSCN 构建中网络资源利用的有效性, 图 4 是仿真运行时间为 10000 单位时间时的平均链路利用率实验结果。

由实验结果可知, 链路故障率较低时, 几种算法的链路利用率相差不大, 其中 RSLFRA 利用率最高, RSF-ACA 和 BACA 次之, Basic VNA 利用率最低; 随着链路故障率的增大, 各算法的链路利用率都呈现下降趋势, 其中 Basic VNA 和 BACA 最为明显, 这是由于算法构建 RSCN 时没有考虑关键资源, 链路故障影响较大; RSLFRA 的链路利用率下降最慢, 这与该算法在故障发生时能够恢复部分 RSCN 的故障链路, 且构建 RSCN 时充分考虑了资源的紧迫程度有关。

从上述实验数据可知, 具有 RSLFRA 的 RSF-ACA 算法在构建 RSCN 时充分考虑了资源的紧迫程度, 在故障发生时能够恢复部分 RSCN 的故障链路, RSCN 成功运行率和物理链路利用率明显优于其他 3 种构建方法, 长期运行后高 RSF 资源比例较低, 有效降低了瓶颈资源产生的几率。

## 5 结束语

可重构柔性网络体系架构能够快速、灵活和高效率地为用户业务提供多样化的网络服务, 推动传统互联网技术向新一代网络体系平滑演进。本文在可重构柔性网络物理链路易发故障的前提下针对

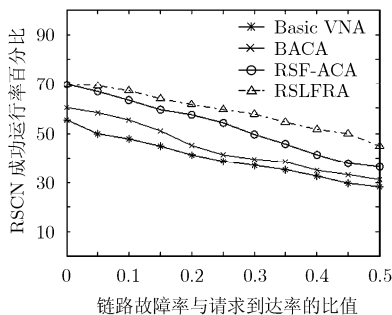


图 2 RSCN 平均成功运行率

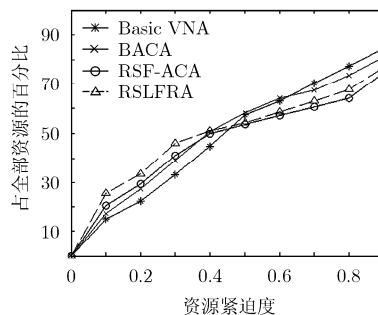


图 3 网络资源紧迫度分布情况

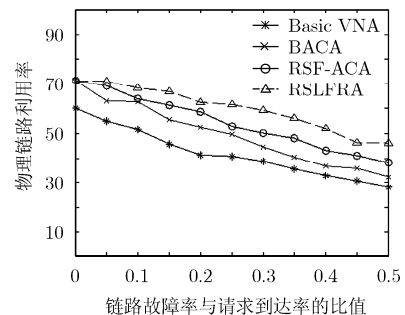


图 4 物理网络链路利用率

RSCN 容错构建问题进行了数学建模和理论分析。基于网络资源发生故障时对网络造成的影响程度,提出了资源紧迫度的概念,对不同资源的重要性进行刻画。为了尽量避免重要资源故障给网络带来的影响,设计了资源紧迫度感知的 RSCN 构建算法 RSF-ACA;为了提高 RSCN 的运行成功率,设计了发生单链路故障时的 RSCN 恢复算法 RSLFRA,该算法可以扩展用于多链路故障和节点故障的恢复机制。最后,分析了算法的复杂度,从 RSCN 成功运行率、资源紧迫度和物理链路利用率 3 个方面验证了本文提出的算法的优越性。

RSCN 的生存性还有很多问题有待研究与探索,需进一步研究多链路、多节点故障时的恢复机制。

### 参考文献

- [1] Turner J and Taylor D. Diversifying the internet[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Global Telecommunications, St. Louis, USA, 2005: 755-760.
  - [2] 王浩学,汪斌强,于婧,等.一体化承载网络体系架构研究[J].计算机学报,2009,32(3):371-376.  
Wang Hao-xue, Wang Bin-qiang, Yu Jing, et al. Research on architecture of universal carrying network [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2009, 32(3): 371-376.
  - [3] Iannaccone G, Chuah C, Mortier R, et al. Analysis of link failures in an IP backbone. Proceedings of ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop 2002, Marseille, France, 2002: 237-242.
  - [4] Markopolou A, Iannaccone G, and Bhattacharyya S. Characterization of failures in an IP backbone. Proceedings of INFOCOM 2004, Hong Kong, China, 2004: 2307-2317.
  - [5] Mosharaf N M, Rahman Muntasir Raihan, and Boutaba R. Virtual network embedding with coordinated node and link mapping[C]. Proceedings of the 28th Conference on Computer Communications, Rio de Janeiro, USA, IEEE, 2009: 783-791.
  - [6] Yu Minlan, Yi Yung, Rexford J, et al. Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration[C]. Proceedings of ACM SIGCOMM on Computer Communication, Seattle, WA, USA, 2008: 17-29.
  - [7] Capone A, Elias J, and Martignon F. Routing and resource optimization in service overlay networks[J]. *Computer Networks*, 2009, 53(2): 180-190.
  - [8] 齐宁,王保进,汪斌强,等.均衡虚拟网构建算法研究[J].电子与信息学报,2011,33(6):1301-1306.  
Qi Ning, Wang Bao-jin, Wang Bin-qiang, et al. Research on balanced construction algorithm of virtual network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1301-1306.
  - [9] 齐宁,汪斌强,郭佳.逻辑承载网构建方法的研究[J].计算机学报,2010,33(9):1533-1540.  
Qi Ning, Wang Bin-qiang, and Guo Jia. Research on construction methods of logical carrying network[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2010, 33(9): 1533-1540.
  - [10] Zhu Y and Ammar M. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components[C]. Proceedings of IEEE INFOCOM, Barcelona, Catalunya, Spain, 2006: 1-12.
  - [11] Nabeel B, Chowdhury N M, and Boutaba R. Topology-awareness and reoptimization mechanism for virtual network embedding[C]. Proceedings of the 9th International Networking Conference, Chennai, India, 2010: 27-39.
  - [12] Raihan M, Issam A, and Boutaba R. Survivable virtual network embedding[C]. Proceedings of the 9th International Networking Conference, Chennai, India, 2010: 40-52.
- 齐宁:男,1983年生,博士生,研究方向为新一代网络、网络虚拟化。  
汪斌强:男,1963年生,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带信息网络。  
王志明:男,1986年生,硕士生,研究方向为网络虚拟化、分布式应用。