

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.05.014

引用格式:贾伟,夏靖波.一种生存性军事虚拟网络映射新方法[J].电讯技术,2015,55(5):545-551.[JIA Wei,XIA Jingbo.A New Approach for Survivable Military Virtual Network Mapping[J].Telecommunication Engineering,2015,55(5):545-551.]

一种生存性军事虚拟网络映射新方法^{*}

贾伟^{**},夏靖波

(空军工程大学 信息与导航学院,西安 710077)

摘要:针对生存性的军事虚拟网络映射问题,提出了生存性的军事虚拟网络映射需要遵循的原则。构建了虚拟网络映射模型,并采用蝙蝠算法进行求解。针对故障情况,提出了区分服务的故障恢复策略,对于高优先级虚网请求提前构建保护路径,对于低优先级虚网请求则提出基于链路可靠性的故障迁移算法,为了减少带宽消耗适当考虑了节点迁移策略。最后通过仿真验证了算法在虚拟网络运行成功率、故障修复率和链路利用率方面相比其他算法具有更好的性能。

关键词:军事虚拟网络;生存性映射;区分服务;故障迁移

中图分类号:TN915.07 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2015)05-0545-07

A New Approach for Survivable Military Virtual Network Mapping

JIA Wei,XIA Jingbo

(Information and Navigation College,Air Force Engineering University,Xi'an 710077,China)

Abstract:For the survivable military virtual network mapping problem,the principle of the problem is presented. A virtual network mapping model is built,and it is solved by bat algorithm. In view to fault environment,a fault recovery policy based on differ-service is proposed. The failed link is replaced by a protect path for high priority virtual network request,and fault transfer algorithm based on link reliability for low priority virtual network request. In order to decrease bandwidth consumption,node transfer policy is properly considered. Finally the performance of the policy is evaluated by simulation experiments and the results demonstrate the policy has better performance in the aspect of virtual network success running ratio,failure repairing ratio,and link resource utilization.

Key words:military virtual network;survivable mapping;differ-service;failure transfer

1 引言

信息时代丰富多样的网络服务使得传统的军事通信网络在服务质量保障、安全性、资源的有效利用等方面都难以满足需求。网络虚拟化^[1]改变以往网络服务与资源紧密耦合的特性,实现了服务与资源动态、有效、灵活的匹配。虚拟网络之间相互隔离,保证了较高的安全性,同时允许虚拟网络共享底层物理网络资源,提高了资源的利用率。正是由于

这些天然的特性,使得基于网络虚拟化技术的军事通信网络转型成为可能^[2]。

本文正是着眼于网络虚拟化的军事应用,并针对虚拟网络映射问题展开研究。然而军事应用中,物理网络经常会由于自然灾害、设备故障或人为攻击等原因发生故障,从而导致承载的虚拟网络服务中断。因此,研究生存性的虚拟网络映射成为当务之急。

目前大量研究以提高资源利用率、满足负载均

^{*} 收稿日期:2015-01-30;修回日期:2015-04-08 Received date:2015-01-30;Revised date:2015-04-08
基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2012JZ8005)
Foundation Item:The Natural Science Foundation of Shaanxi Province(2012JZ8005)

^{**} 通讯作者:William-1282008@163.com Corresponding author:William-1282008@163.com

衡为目标实现虚拟网络映射,但它们大部分都是假设底层网络一直处于正常工作状态下的,较少有针对底层物理网络故障情况下的生存性映射研究。在已有的一些研究中,文献[3]为每条物理链路预留了备份的资源,这带来了较大的开销,导致较低的网络资源利用率;文献[4]基于分布式 Agent 监控服务承载网是否发生故障,提出了愈合的概念,但没有具体的方法;文献[5]为了降低网络链路故障损失并提高服务承载网的运行效率,在主路径构建算法的基础上提出了一种保护链路构建算法,用于构建链路的保护路径;文献[6]提出了基于多商品流问题思想的服务承载网快速愈合方法,提高了愈合能力,加快了愈合速率;文献[7]在构建工作路径时以提高资源利用率、保证负载均衡为原则,在构建保护路径时尽量避免占用紧迫程度高的资源,从而提高保护路径的可靠性;文献[8]针对传统恢复方法恢复成本高、效率低的问题,提出一种故障链路整体迁移的思想,提高了恢复效率,但是基于多商品流实现的路径迁移需要复杂的流量管理,增加了恢复后网络运行成本;文献[9]基于 Openflow 网络提出了一种高可靠性的虚拟网络算法,对用户的优先级进行区分,并基于 k-shrotest 算法对备份链路故障情况进行了重映射,但是没有充分考虑备份链路的选择问题。

本文遵循生存性军事虚拟网络映射的原则,在借鉴前人相关工作的基础上,展开生存性军事虚拟网络映射,保证在网络发生故障的情况下仍然保持服务的不间断性。

2 生存性军事虚拟网络映射遵循的原则

在军事应用中,底层物理网络是统一建设的,并且都以保障高质量的应用服务为目的,不需要去考虑基础设施提供者之间的竞争。因此,生存性军事虚拟网络映射相比民用领域侧重点有所不同,主要表现为如下:

- (1)区分服务原则。军事应用中不同的应用服务可能具有不同的优先级,因此必须予以区分保障,如给予高优先级的应用服务更加可靠的恢复策略;
- (2)快速恢复原则。军事应用服务不需要过多的去考虑映射的成本,而是更加注重服务的可靠性。因此,在发生故障时需要采取高效的恢复策略来保证服务的不间断;
- (3)负载均衡原则。底层物理网络是为不同的虚拟网络提供服务的,而且虚拟网络服务具有一定

的生命周期。因此,恢复机制不能以牺牲其他虚拟网络服务为代价,必须保证底层网络的负载均衡性,为服务的承载提供可持续的网络资源。

3 生存性军事虚拟网络映射模型

生存性虚拟网络映射与基本的虚拟网络映射类似,都是包括虚拟网络请求、底层物理网络和一定的映射规则。区别在于生存性虚拟网络映射要能够提供底层物理网络节点或链路故障情况下的容错机制(如提供节点和链路保护、高效地节点和链路迁移机制),从而保证虚拟网络服务的不间断性。

3.1 网络模型

3.1.1 物理网络模型

底层物理网络用加权无向图 $G_s = (N_s, L_s, C_s)$ 表示, N_s 代表物理网络节点集合, L_s 代表物理链路集合, C_s 表示物理网络能够提供的承载能力,如节点计算、内存能力、链路的带宽、时延等。本文重点关注节点的计算能力和链路的带宽能力,节点计算能力用 $CPU(N_s)$ 表示,链路带宽能力用 $B(L_s)$ 表示。

3.1.2 虚拟网络请求模型

虚拟网络请求用加权无向图 $G_v = (N_v, L_v, C_v)$ 表示, N_v 代表虚拟网络节点集合, L_v 代表虚拟链路集合, C_v 表示虚拟网络的资源能力需求。 $CPU(N_v)$ 表示虚拟节点的计算能力需求, $B(L_v)$ 表示虚拟链路的带宽需求。

3.2 映射问题描述

生存性军事虚拟网络映射本质上与一般的虚拟网络映射^[10-11]类似,只是在映射过程中加入了故障时的恢复策略。虚拟网络请求到物理网络的映射定义如下:

$$M:G_v \mapsto G_s = (N_s, L_s)。(1)$$

该映射要满足同一个虚拟网络中的节点被映射到不同的物理节点上,虚拟链路被映射到底层无环路物理路径上。同时,在映射的过程中还要满足虚拟节点和链路的能力需求以及各种映射目标(负载均衡、收益最大化等)。

3.2.1 节点映射

节点映射形式化表示如下:

$$M_N:N_v \mapsto N_s。(2)$$

二进制的 $m \times n$ 矩阵 H_N 表示节点的映射关系,每一个行向量和列向量分别代表一个虚拟节点和底层物理节点。当虚拟节点 $n_v^i \rightarrow n_s^j$ 时, $H_N(i, j) = 1$, 否则为 0。节点映射的约束条件如下所示:

(1) 同一个虚拟节点只能被映射到一个物理节点上:

$$\sum_{i \in m} H_N(i, j) \leq 1, j \in \{1, 2, \dots, n\}; \quad (3)$$

(2) 同一个虚拟网络请求中的节点不能被映射到同一个物理节点上:

$$\sum_{j \in n} H_N(i, j) = 1, i \in \{1, 2, \dots, m\}; \quad (4)$$

(3) 底层物理节点的剩余计算资源要满足虚拟节点的请求:

$$H_N(i, j) \times \text{RCPU}(n_s^j) - \text{CPU}(n_v^i) \geq 0. \quad (5)$$

3.2.2 链路映射

链路映射形式化表示如下:

$$M_L: L_V \mapsto L_S. \quad (6)$$

约束条件:二进制的 $p \times q$ 矩阵 H_L 表示链路的映射关系,每一个行向量和列向量分别代表虚拟链路和底层物理链路。虚拟链路 l_v^α 映射的所有底层物理链路 l_s^β 可以形成物理节点 i 和 j 之间的一条路径。当虚拟链路 $l_v^\alpha \rightarrow l_s^\beta$, 则 $H_L(\alpha, \beta) = 1$, 否则为 0。

物理路径 $p_s(i, j)$ 上可用带宽必须满足虚拟链路的带宽请求, 如式(7)所示:

$$H_L(\alpha, \beta) \times B(p_s(i, j)) - B(l_v) \geq 0. \quad (7)$$

式中, $B(p_s(i, j)) = \min_{l_s \in p_s(i, j)} RB(l_s)$ 表示路径 p_s 上的可用带宽。

3.2.3 映射目标

不同虚拟网络映射决策中节点的开销都是相同的,带宽开销会因为承载路径的不同而有所区别,因此本文遵循负载均衡原则以及实现使用尽可能少的资源承载更多的虚拟网络请求。定义的目标函数如下式所示:

$$S(G_S) = (\theta N_\sigma + \mu L_\sigma) \& \sum_{\alpha=1}^p \sum_{\beta=1}^q H_L(\alpha, \beta) B(l_v^\alpha). \quad (8)$$

式中,

$$N_\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\text{Load}(n_s^i) - \overline{\text{Load}})^2}{m}},$$
$$L_\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{l_s \in L_s} (\text{Load}(l_s) - \overline{\text{Load}})^2}{|L_s|}},$$

分别表示节点和链路的负载强度标准差; θ 和 μ 用来调整整个底层物理网络节点和链路负载均衡的重要度参数。 $S(G_S)$ 越小,网络的负载均衡度越好,可用网络资源越多。因此,优化目标为 $\min(S(G_S))$ 。

4 区分服务的虚拟网络故障恢复策略

底层物理网络是一组节点和链路的集合,因此

可能发生两种类型故障:节点故障和链路故障。链路故障一般只会影响承载于其上的虚拟链路,而节点故障不但影响承载的虚拟节点,还会影响与其相连的物理链路,进而影响虚拟链路。由于骨干网中单链路故障的概率最高,约为 70%^[12],所以本文关注单链路故障下的容错策略。

目前故障恢复策略大致分为主动式和反应式两种。主动式恢复策略在工作路径建立的同时建立保护路径,但相应地带来了较大的资源开销。反应式恢复策略在发生故障时进行链路迁移,但相应地带来了较大的时间开销,导致恢复过慢,从而影响其他虚拟服务。

本文遵循区分服务原则,提出区分服务的虚拟网络故障恢复策略。该策略对高优先级虚网请求提供保护路径,以确保工作链路发生故障时可以迅速迁移至保护路径,对低优先级虚网请求采取迁移的方法予以恢复,这样在保证故障快速恢复的同时兼顾了资源开销和时间开销,如图 1 所示。

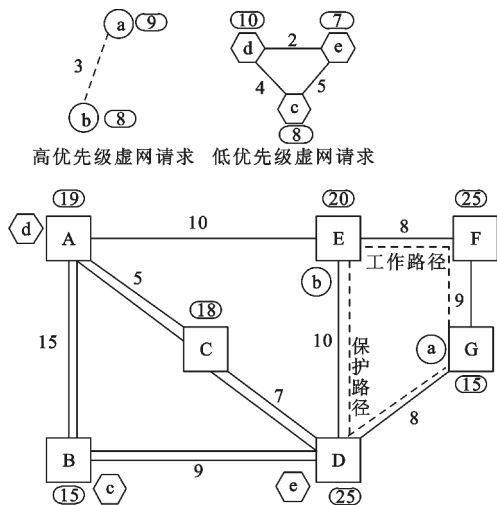


图 1 生存性虚拟网络映射示意图
Fig.1 Survivable virtual network mapping

该策略包括两个子算法,子算法 1 完成高优先级虚拟网络请求的保护路径构建,子算法 2 完成低优先级虚拟网络请求的故障恢复。整个策略的流程描述如下:

输入:虚拟网络请求 G_V ,物理网络 G_S ,故障的物理链路 l_s^f ;

输出:迁移后的工作路径 P_w :

(1)判断故障链路承载虚拟网络请求的优先级;

(2)若为高优先级,则将故障链路迁移至保护路径,若保护路径不可用,则以抢占的方式插入到低优先级请求之前,并运行子算法 2 完成故障恢复;若

为低优先级,则直接运行子算法 2 进行故障恢复;

(3)输出结果。

4.1 子算法 1

保护路径与工作路径在虚拟网络映射时同时构建,并确保同工作路径相分离(两条路径没有经过相同的物理链路)。保护路径的带宽可以通过服务等级协定(SLA)进行设置,这里设为故障链路所承载虚拟链路的最大带宽需求。本文提出基于蝙蝠算法的虚拟网络映射方法。

蝙蝠算法是模拟蝙蝠利用超声波进行探测、定位、扑食猎物等一系列行为的智能启发算法^[13],它具有模型简单、收敛速度快等特点。利用蝙蝠算法进行虚拟网络映射求解的工作流程如下:

(1)根据节点和链路约束条件生成 n 只蝙蝠,初始化蝙蝠的初始位置 X_i^k 、速度 V_i^k 、脉冲速率 R_i^k ,脉冲响度为 A_i^k ,脉冲频率为 f_i^k ;

(2)根据虚拟网络映射问题的目标函数计算蝙蝠初始位置的适应度值,记录蝙蝠个体的历史最佳位置 $X_{bb}^k(t)$ 、种群中蝙蝠最佳位置 X_{lb}^k ;

(3)生成随机数 rand1,如果 $\text{rand1} < r_i$,则对处在最佳位置的蝙蝠进行高斯扰动,生成新位置并代替当前蝙蝠的位置;否则,随机飞行产生一个新解;

(4)生成随机数 rand2,如果 $(\text{rand2} > A_i^k \& \text{fit}(X_i^k) < \text{fit}(X_{\text{new}}^k))$,则飞行至更新后的位置;

(5)子群中每只蝙蝠实时更新记录自己的历史最佳位置,同时,计算更新之后的蝙蝠的适应度,如果大于 X_{lb} ,则 $X_{lb} = X_{\text{new}}$,并更新脉冲速率 r 和脉冲响度 A ;

(6)当达到最大迭代次数 NI 时转到步骤 7,否则转至步骤 4;

(7)根据确定的虚拟节点映射结果,运行 k-shortest 算法找出一条具有最小带宽开销的保护路径,若找不到这样的路径,则返回 NULL;

(8)输出结果。

根据映射目标,基于蝙蝠算法不断迭代获得全局近似最优解。蝙蝠位置的适应度值为

$$\text{fit}_k(X_i) = \frac{1}{1 + (\theta N_\sigma + \mu L_\sigma) \& \sum_{\alpha=1}^p \sum_{\beta=1}^q H_L(\alpha, \beta) B(l_v^\alpha)} \tag{9}$$

蝙蝠搜寻猎物的飞行速度和位置更新公式为

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \pi, \tag{10}$$

$$V_i(t+1) = V_i(t) + (X_i(t) - X_{\text{best}}(t)) \times f_i, \tag{11}$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1)。 \tag{12}$$

式中, $X_i(t)$ 表示第 i 个蝙蝠当前的位置; $V_i(t)$ 表示其当前速度; $X_{lb}(t)$ 为当前搜索空间中全局蝙蝠最优的位置; f_i 表示搜寻猎物时的脉冲频率, $f_i \in [f_{\min}, f_{\max}]$; $\pi \in [0, 1]$ 的随机数。

4.2 子算法 2

对于低优先级虚网请求采用故障迁移的方法。针对发生故障的链路,将其承载的虚拟链路迁移至正常工作的物理路径上,从而确保服务的不间断。本文提出基于链路可靠性的迁移算法,避免迁移至可靠性较低的链路上。

4.2.1 链路可靠性定义

这里借鉴文献[6]的思想,设置链路容器来记录整个底层网络发生过故障的链路。文献中网络可靠性的评估是根据最近最少故障来进行的,但是在实际中不一定最近发生故障的链路可靠性低。本文则根据链路发生故障的次数来评估网络的可靠性。发生故障的次数越多,相应的可靠性就越低。如图 2 所示,初始故障次数为 0。

链路	故障次数	链路	故障次数
l_1	0	l_1	1
l_2	0	l_2	3
...	0	...	0
l_n	0	l_n	2

图 2 链路容器
Fig. 2 Link container

链路的可靠性定义如下:

$$r_{l_s} = 1 - \frac{\text{time}(l_s)}{\text{time}(G_s)}。 \tag{13}$$

式中, $\text{time}(l_s)$ 表示任意一条物理链路发生故障的次数, $\text{time}(G_s) = \sum_{\forall l_s \in G_s} \text{time}(l_s)$ 表示物理网络链路发生故障的总次数。图 1 中根据定义在 t_1 时刻, $r_{l_1} = 0.8, r_{l_2} = 0.4, r_{l_n} = 0.6$, 其他链路由于未发生故障,因此可靠性为 1。

4.2.2 工作流程

将虚拟网络请求划分为多个元需求,由四元组 (s, t, b, p) 表示, s, t 表示相邻的两个节点, b 表示连接两个节点的链路的带宽需求, p 表示虚拟网络请求的优先级。当虚拟链路映射在一条底层物理链路上时,则运行 k-shortest 算法选择一条满足带宽需求的可工作路径,如图 3(a) 所示;当虚拟链路映射

在一条底层物理路径上时,原物理路径上的部分物理链路仍然可用,因此可以考虑进行节点迁移,从而充分利用为受影响的链路,减小带宽开销,如图 3 (b)所示。

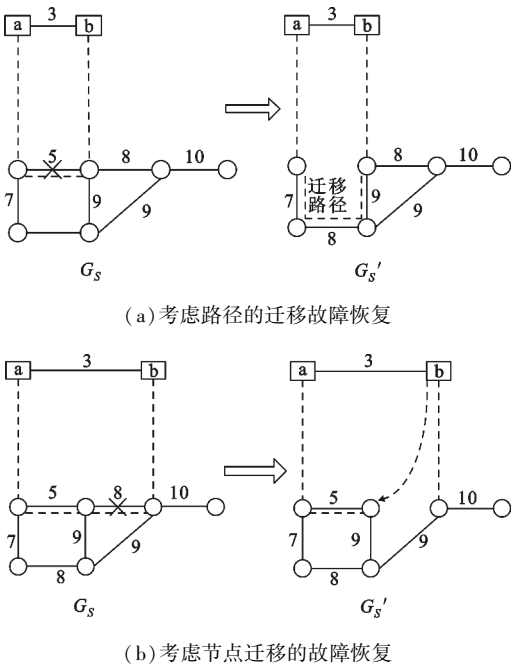


图 3 虚拟网络故障迁移示意图
Fig. 3 Fault migration of virtual network

- 算法的具体工作流程如下:
- (1)判断故障链路承载的虚拟链路,构建故障链路集合 $\text{FailureLink}\{\}$;
 - (2)根据优先级进行排序,优先迁移属于高优先级虚拟网络请求的链路;
 - (3)在图 G_s 中去除故障链路。在子图 G'_s 中根据实际情况进行节点或者链路迁移,并保证满足虚拟链路的带宽需求,同时避免占用可靠性低的物理链路;
 - (4)完成故障恢复,并更新物理节点和链路的能力值。

5 实验分析

仿真实验环境,配置在 Pentium (R) Dual - Core CPU E5400 @ 2.70 GHz 和 2.69 GHz 3 GB 内存的 PC 机上进行。为了方便对比,本文参照文献[9]的参数设置。用 BRITE^[14] 拓扑生成工具生成物理网络拓扑,拓扑由 50 个节点组成,节点之间的连接概率为 0.5,节点计算资源和链路带宽资源服从 50 ~ 100 的均匀分布。虚拟网络请求到达率服从时间单

位为 1、强度 $\lambda_r=4$ 的泊松分布,虚网请求的生存时间服从 $\theta=10$ 指数分布。每个虚网请求中虚拟节点的数目服从 2 ~ 10 的均匀分布,平均节点连接度为 0.5。虚拟节点的 CPU 资源需求服从 0 ~ 20 的均匀分布,链路带宽需求服从 0 ~ 50 的均匀分布。链路故障发生过程服从强度为 λ_f 的泊松过程。链路故障恢复时间服从 $\theta=1$ 的指数分布。对于蝙蝠优化算法,种群规模设为 20(表示有 20 只蝙蝠),最大迭代次数 NI 为 500。初始频度和响度均设为 0.5, α 和 γ 的值设为 0.9,最大频率为 2,最小频率为 0。

本文从虚拟网络平均成功运行率、故障修复率和物理链路的利用率三方面来评估算法的性能,并和 Basic-VNA^[10] 算法(基本的映射算法,未采取任何保护机制)、SVNE-Hybrid^[3](采取备份链路)、Remap^[8](故障链路重映射算法)进行对比。仿真在 $\psi=\lambda_f/\lambda_r=0.1$ (低故障概率)和 $\psi=\lambda_f/\lambda_r=0.5$ (高故障概率)两种情况下运行。

5.1 虚拟网络平均成功运行率

虚拟网络平均成功运行率是指成功运行的虚拟网络个数与虚拟网络构建请求个数的比值,反映了虚拟网络构建和故障恢复策略的有效性,仿真结果如图 4 和图 5 所示。

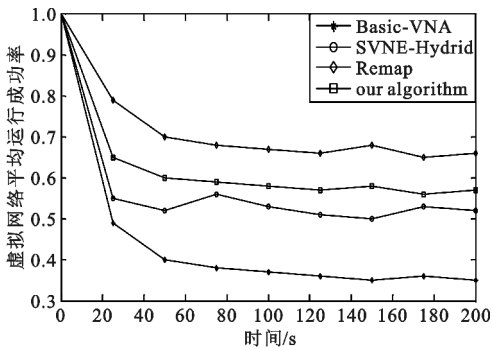


图 4 $\psi=0.1$ 时的平均成功运行率
Fig. 4 Average success working rate at $\psi=0.1$

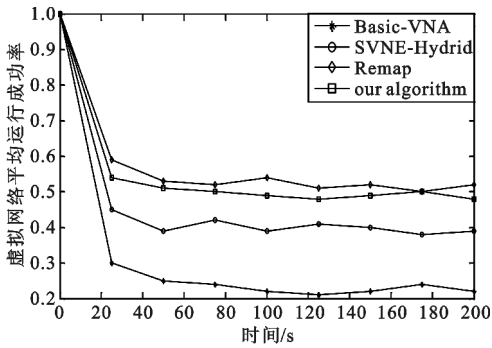


图 5 $\psi=0.5$ 时的平均成功运行率
Fig. 5 Average success working rate at $\psi=0.5$

从图中可以看出,在低故障概率情况下,由于链路故障概率远小于虚网请求的到达率,因此刚开始几种算法都具有较高的平均成功运行率。随着虚网请求的不断到达以及故障的产生,Basic-VNA 算法采用最短路径进行选路,并未采取任何保护机制,在链路故障时会影响虚拟网络的运行,导致最低的运行成功率。SVNE-Hybrid 算法为每条链路计算了备份路径,但是造成了较大的带宽消耗,因此运行成功率较低。本文算法运行成功率仅次于 Remap 算法,这是因为算法采取了区分服务的故障恢复策略,可以看作是 SVNE-Hybrid 算法和 Remap 算法的折衷。此后随着虚网生存时间的到达以及链路故障的修复,几种算法运行成功率最终趋于平稳。在高故障概率的情况下,几种算法的平均成功运行率都相应下降,但本文算法下降最少。总体看来,本文算法在保证高优先级虚网请求的同时又保持了较高的运行成功率。

5.2 虚拟网络故障修复率

虚拟网络故障修复率是指故障发生后能正常运行的虚拟网络个数与故障发生前正常运行的虚拟网络个数的比值,仿真结果如图 6 和图 7 所示。

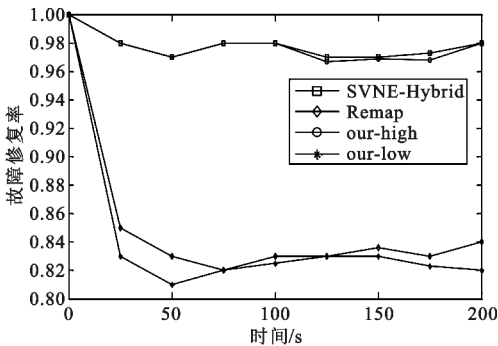


图 6 $\psi=0.1$ 时的故障修复率
Fig. 6 Fault repair rate at $\psi=0.1$

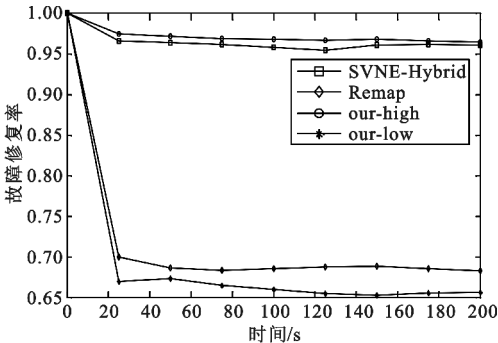


图 7 $\psi=0.5$ 时的故障修复率
Fig. 7 Fault repair rate at $\psi=0.5$

BASIC-VNA 算法由于没有采取任何恢复机制,因此这里与 SV 算法以及 Remap 算法进行对比。从图中可以看出,在低故障概率情况下,本文算法的高优先级虚网请求故障修复率与 SVNE-Hybrid 算法较为接近,稳定在 98% 左右;低优先级虚网请求的修复率与 Remap 算法相当,稳定在 82% 左右。在高故障概率情况下,几种算法的故障修复率都有所下降,但本文算法的高优先级虚网请求故障修复率要高于 SVNE-Hybrid 算法,这是因为当备份路径不可用时,高优先级虚网请求仍然可以插入低优先级虚网请求队列进行故障恢复;低优先级虚网请求故障修复率稳定在 66% 左右,这得益于算法采取灵活的迁移策略,并避免占用可靠性较低的物理链路。

5.3 物理链路利用率

物理链路利用率是指构建虚拟网络所占的物理链路带宽之和与物理网络链路资源带宽之和的比值,仿真结果如图 8 所示。

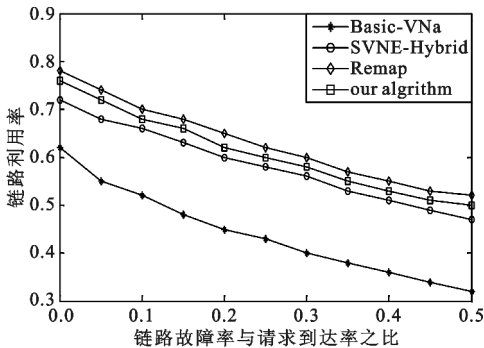


图 8 物理链路利用率
Fig. 8 Utilization of substrate network link

从图中可以看出,随着故障概率的增高,几种算法的链路利用率都有所下降。BASIC-VNA 算法链路利用率下降最为明显,这是因为该算法没有采用任何保护机制,物理链路故障将会导致虚拟网络服务中断,随着故障概率增加,链路利用率持续恶化。SVNE-Hybrid 算法由于提供了保护路径,占用了大量带宽资源,因此性能略好于 BASIC-VNA 算法。Remap 算法链路利用率最高。而本文算法性能仅次于 Remap 算法,这是因为算法为了保证高优先级虚网请求做出了一定牺牲,但对于低优先级虚网请求采用了较为灵活的故障恢复机制,在最短的时间保证故障的实时恢复,同时避免占用可靠性较低的物理链路,从而保证了虚网请求的可靠运行,综合看来获得了较高的链路利用率。

6 结束语

本文研究了生存性的军事虚拟网络映射问题,为了确保底层物理网络发生故障时服务的不间断,提出了一种区分服务的虚拟网络故障恢复策略,对高优先级虚网请求预先提供保护路径,对低优先级虚网请求采用基于链路可靠性的实时迁移算法,避免了全部计算保护路径带来的巨大带宽开销以及进行全局重映射带来的繁琐。大量的仿真实验表明,本文算法有效提高了虚拟网络平均成功运行率、故障修复率以及物理链路利用率。下一步考虑针对多链路失效以及节点失效情况下的生存性虚拟网络映射问题展开研究。

参考文献:

- [1] Wang A, Iyer M, Dutta R, et al. Rouskas, Baldine I. Network Virtualization: Technologies, Perspectives, and Frontiers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 523-547.
- [2] Kerdari J, Wipusitwarkun K. Network virtualization for military application: review and initial development of conceptual design[C]//Proceedings of 2012 International Conference on ACT. PyeongChang: IEEE, 2012: 19-22.
- [3] Rahman M R, Boutaba R. SVNE: Survivable Virtual Network Embedding Algorithms for Network Virtualization[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2013, 10(2): 105-118.
- [4] Fajjari I, Aiari M, Braham O. Towards an automatic piloting virtual network architecture[C]//Proceedings of IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security. Paris, France: IEEE, 2011: 1-5.
- [5] Guo T, Wang N, Moessner K, et al. Shared backup network provision for virtual network embedding[C]//Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 2011: 1-5.
- [6] 缪宇霆, 吴春明, 杨强, 等. 可重构服务承载网愈合机理研究[J]. 通信学报, 2013, 33(8): 52-61.
MIAO Yuting, WU Chunming, YANG Qiang, et al. Self-healing mechanism for reconfigurable service overlay networks[J]. Journal on Communications, 2013, 33(8): 52-61. (in Chinese)
- [7] 齐宁, 汪斌强, 王志明. 可重构服务承载网主动保护算法研究[J]. 通信学报, 2012, 33(8): 171-179.
QI Ning, WANG Binqiang, WANG Zhiming. Research on reconfigurable service carrying network active protection algorithms[J]. Journal on Communications, 2012, 33(8): 171-179. (in Chinese)
- [8] 齐宁, 汪斌强, 王志明. 可重构服务承载网容错构建算

法研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 468-473.

QI Ning, WANG Binqiang, WANG Zhiming. Research on reconfigurable service carrying network resilient construction algorithms[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(2): 468-473. (in Chinese)

- [9] 蔡进科, 顾华玺, 卢冀. 基于 Openflow 网络的高可靠性虚拟网络映射算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(2): 396-402.
CAI Jinke, GU Huaxi, LU Ji. Highly reliable virtual network mapping algorithm based on openflow network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(2): 396-402. (in Chinese)
- [10] Zhu Y, Ammar M. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components[C]//Proceeding of 2006 IEEE International Conference on Computer Communications. Barcelona, Spain: IEEE, 2006: 1-12.
- [11] Chowdhury M, Rahman M R, Boutaba R. ViNEYard: virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(1): 206-219.
- [12] Iannaccone G, Chuah C, Mortie R R, et al. Analysis of link failures in an IP backbone[C]//Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement. New York: ACM, 2002: 237-242.
- [13] Yang X S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm[C]//Proceedings of 2010 Conference on Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010: 65-74.
- [14] Alerto M, Ibrahim M, John B. On the origin of power laws in internet topologies[J]. ACM Computer Communication Review, 2000, 30(2): 18-28.

作者简介:



贾伟(1986—),男,陕西西安人,2012年于空军工程大学获硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为网络虚拟化;

JIA Wei was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1986. He received the M. S. degree from Air Force Engineering University in 2007.

He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns network virtualization.

Email: William-1282008@163.com

夏靖波(1963—),男,河北秦皇岛人,教授,主要研究方向为网络管理。

XIA Jingbo was born in Qinhuangdao, Hebei Province, in 1963. He is now a professor. His research concerns network management.

Email: jbxia@sina.com