

基于 rLFA 技术的性能优化及重路由选择算法研究

王明鸣 孟相如 徐 有 崔文岩

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘 要 为进一步提高网络单故障快速恢复能力,基于改进的 Remote Loop-Free Alternates(rLFA)重路由技术,提出一种采用混沌粒子群并考虑网络物理传输代价和拥塞代价的重路由选择算法。首先基于 rLFA 的隧道建立方法对其进行改进,结合引入隧道技术的链路增补方法来实现故障全覆盖,通过设置权重因子来保证在不同业务量下的重路由选择针对性。实验表明,改进的 rLFA 能进一步提高网络单故障覆盖率,同时结合链路增补方法在保证故障完全覆盖的情况下能够大幅度减少链路增补数量;路由选择算法能够动态选择不同业务量下的重路由路径,在提高网络单故障环境下的传输效率的同时也实现了负载均衡。

关键词 单故障, rLFA, 混沌粒子群, 重路由选择算法

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.1.025

Research of Performance Optimization and Re-routing Selection Algorithm Based on Improved rLFA

WANG Ming-ming MENG Xiang-ru XU You CUI Wen-yan

(Institute of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract Aiming at improving network single link (node) failure fast recovery capability further, a method based on improved rLFA was proposed by utilizing Chaos PSO and considering both transmission and congestion cost. Firstly, a method based on rLFA was proposed by improving the creation of tunnels, which was integrated with the supplement links in order to achieve full coverage for failures. The weight factor was set to keep the pertinence of re-routing selection under the different traffic demands. The experimental result shows that the improved rLFA can improve network single failure fast recovery capability further and reduce the numbers of supplement links sharply. The re-routing algorithm can achieve the dynamic selection of re-route to adapt the different traffic demands, meanwhile, it can improve the transmission efficiency and balance the load in single failure network.

Keywords Single failure, rLFA, Chaos PSO, Re-routing selection algorithm

1 引言

针对网络中频发的链路及节点故障,传统路由协议的收敛方法已很难满足其实时性要求,因此如何实现故障的快速恢复成为了网络可生存性技术的研究热点。

基于上述问题,IETF 工作小组提出快速重路由技术,其主要思想是上游节点检测到链路或节点故障时,无需向全网洪泛信息,而是将业务流量直接偏射到备份路径中继续传输,这将大大缩减故障恢复时间,同时也避免了路由的频繁收敛。目前快速重路由技术主要包括无环替代(Loop-Free Alternates, LFA)^[1]、U-turn alternates^[2]、Tunnel^[3]、Not-via address^[4]、偏转路由(Deflection Routing, DR)^[5]、故障非敏感路由(Failure Insensitive Routing, FIR)^[6]等众多技术,其中 LFA 技术因算法简单且易于实现而得到了有效利用,但其故障覆盖率很难达到 100%。

针对单故障恢复问题,文献[7]提出一种优化权值的方法来提高其故障覆盖率,但此方法为 NP 难问题,很难实现故障的全覆盖,文献[8]同样存在此问题;文献[9]提出一种增补链

路权值的方法来实现故障的完全覆盖,虽然达到效果,但增加冗余链路不仅破坏拓扑结构,也会增加网络运营成本;文献[10-13]分别从不同的侧重点对单故障重路由问题进行研究,但并未综合考虑覆盖率、路径传输及流量工程等问题。

文献[14]提出一种基于 Tunnel 技术的 Remote LFA(rLFA)重路由技术,该技术通过建立本地节点间的隧道来大幅度提高其故障覆盖率;文献[15]基于无权网络实验证明了其有效性,但上述文献均未涉及性能优化及重路由的选择优化问题。基于此,本文提出一种基于混沌粒子群并考虑传输代价和负载均衡的路由选择算法,该算法在不同流量环境下通过设定权重因子动态选择路由,保证了传输效率,同时也实现了负载均衡;为了解决性能优化问题,在 rLFA 基础上利用邻居节点建立隧道,并结合引入隧道技术的链路增补方法不仅保证故障全覆盖,也减少了链路增补数量,从而实现了性能提升。

2 rLFA 重路由技术的性能优化

rLFA 技术在 LFA 基础上扩大了备份下一跳节点的集合容量,通过建立隧道实现了多跳备份节点传输。

到稿日期:2014-01-03 返修日期:2014-04-03 本文受国家自然科学基金(61201209)资助。

王明鸣(1989-),男,硕士生,主要研究方向为网络可生存性,E-mail:wmmdouble@163.com;孟相如(1963-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带通信网络;徐 有(1980-),男,硕士,主要研究方向为宽带通信网络;崔文岩(1987-),男,博士生,主要研究方向为网络可生存性。

定义 1 对于 $\forall x \in V$, 若源节点 s 与 x 最短路径不包含故障链路, 则 $x \in P\text{-space}$ 。

定义 2 对 $\forall x \in V$, 若目的节点 d 与 x 最短路径不包含故障链路, 则 $x \in Q\text{-space}$ 。

实现无环替代需要备份接口节点 p 满足: $p \in P\text{-space} \cap Q\text{-space}$ 。 $P\text{-space}$ 、 $Q\text{-space}$ 备份接口判决公式如下:

$$P\text{-space}: d(s, n) < d(s, t) + d(t, n) \quad (1)$$

式中, s 表示源节点, t 表示 s 的下一跳节点, n 表示 $P\text{-space}$ 的可用备份接口。

$$Q\text{-space}: d(n, d) < d(n, s) + d(s, d) \quad (2)$$

式中, s 表示源节点, d 表示目的节点, n 表示 $Q\text{-space}$ 的可用备份接口。

2.1 改进的 rLFA 重路由技术

如图 1 所示, 此时源节点 3 向目的节点 5 发送数据包, 若下一跳链路 3→4 发生故障, 根据 LFA、rLFA 判决条件可知节点 3 不存在无环替代备份节点, 因此需要进一步扩大备份节点集合容量。此处采用将邻居节点作为隧道入口节点的改进方法来实现 $P\text{-space}$ 的扩充, 扩充后的 $P\text{-space}$ 用 $P'\text{-space}$ 表示。工作过程如下: 节点 3 检测到链路故障时, 将流量切换至邻居节点 2, 此时在节点 2 处封装数据包并建立与备份节点 p ($p \in P'\text{-space} \cap Q\text{-space}$) 之间的隧道进行流量传输, 最后在节点 p 处解封数据包并最短路由至节点 5, 从而实现了无环替代。图 2、图 3 分别反映了改进前后的节点集合变化过程。改进方法的 $P'\text{-space}$ 备份接口满足如下条件:

$$P'\text{-space}: d(k, n) < d(k, s) + d(s, t) + d(t, n) \quad (3)$$

式中, s 表示源节点, t 表示 s 的下一跳节点, k 为源节点的某邻居节点, n 表示 $P'\text{-space}$ 的可用备份接口。

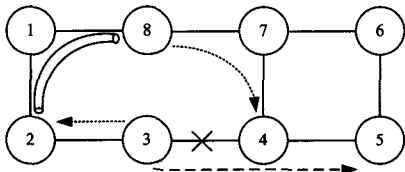


图 1 实验拓扑

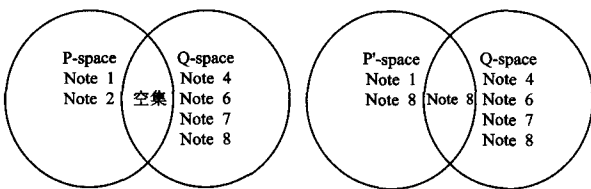


图 2 rLFA 节点集合

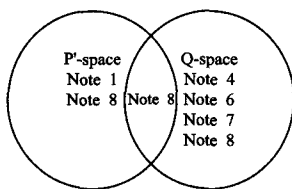


图 3 改进 rLFA 节点集合

2.2 增补链路方案

为了实现单链路故障全覆盖以保护所有业务路径, 在改进 rLFA 技术的基础上引出链路增补方案。针对改进 rLFA 技术无法完成故障覆盖的链路, 通过增补大权值、小权值链路来实现 rLFA 备份。

增补大权值链路: 文献[9]提出一种增补链路方案, 本文在此基础上引入隧道技术, 即通过增补大权值链路来扩充邻居节点数量, 从而扩大 $P'\text{-space}$ 的空间以实现故障覆盖率的增加。

增补小权值链路: 针对含有单节点度节点网络, 还需增补小权值链路来实现故障覆盖。设无向加权网络 $G(V, E)$ 含有单节点度节点 Q , 其唯一邻居节点为 P , 此时通过增补小权值链路实现备份。其核心算法如下, 图 4 为优化过程示意图。

算法 1

1. for $q \in Q$
2. choose some $m \in \text{leaf}(q)$
3. if $(m, q) \notin E$ then $E \leftarrow E \cup \{(m, q)\}$
4. $C_{mq} \leftarrow d(m, q) - k // k$ 为小于任意链路权值整数
5. recompute Q
6. end for

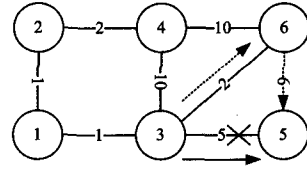


图 4 优化过程示意图

3 重路由选择优化算法

3.1 问题描述

对于给定网络拓扑, 通过改进的 rLFA 技术并结合链路增补优化方案可实现故障完全覆盖, 但该技术各下一跳故障链路均有多个可用备份节点, 合理地选择备份路由有利于优化网络性能。首先, 为了进一步提高数据包转发效率, 需要寻找链路物理代价较小的备份节点集合, 同时, 当网络承载大流量数据时, 需要考虑各链路负载均衡问题。基于上述两个问题, 可建立数学规划模型并通过设定相应权重系数进行求解, 为了保证其针对大规模网络的适用性, 此处采用混沌粒子群的启发算法进行最小寻优。

3.2 模型建立

给定网络 $G(V, E)$, 其中节点数 $n = |V|$, 链路数 $m = |E|$, 网络拓扑矩阵为 A , 网络业务量矩阵为 B , 同时结合模型需要定义以下变量:

(1) $X_{ij, l}$, ij 表示拓扑中某链路, I, J 表示源节点为 I 、目的节点为 J 的最短路径, 当且仅当链路 ij 包含于路径 $I \rightarrow J$ 时, $X_{ij, l}$ 置 1, 否则置 0。

(2) $\Delta l_e, \Delta l_e$ 表示在链路故障 e 情况下的网络重路由物理代价平均增加量。

$$\Delta l_e = \frac{\sum_P [l(e_0^i, e_1^i) + l(e_1^i, k_i) + l(k_i, J_i)]}{\sum_P \sum_T l(t)} \quad (4)$$

式中, 源目节点对集合 P 表示包含故障链路的源目节点路径集合; 链路集合 T 表示在 P 集合某源目节点路径内上游故障节点至目的节点所包含的链路集合; e_0^i 为 P 中某源目节点对路径 (I_i, J_i) 的上游故障节点; e_1^i 为上游故障节点作为隧道起点的邻居节点; k_i 为 (I_i, J_i) 中路径 (e_0^i, J_i) 的某 rLFA 备份接口; $\sum_P \sum_T l(t)$ 表示 P 集中所有上游故障节点至目的节点路径故障前的物理长度之和。

(3) f_e, f_e 表示在链路故障 e 情况下的网络拥塞代价函数。

$$f_e = \sum_{z \in E} \varphi_z(z) / m \quad (5)$$

式中, $\varphi_z(z)$ 定义为链路 z 关于链路利用率 v_z 的费用函数, 此函数对不同负载链路赋予不同代价以表征网络拥塞情况。文献[17]给出了一种费用函数模型:

$$\varphi(z) = \begin{cases} v(z), & 0 \leq v(z) < 1/3 \\ 3v(z) - 2/3, & 1/3 \leq v(z) < 2/3 \\ 10v(z) - 16/3, & 2/3 \leq v(z) < 9/10 \\ 70v(z) - 178/3, & 9/10 \leq v(z) < 1 \\ 500v(z) - 1468/3, & 1 \leq v(z) < 11/10 \\ 5000v(z) - 19468/3, & 11/10 \leq v(z) < \infty \end{cases} \quad (6)$$

其中,在链路故障 e 情况下,重路由由链路利用率为:

$$v_e = \frac{\sum_Q X_{xy, I_i' J_i'} b_{I_i' J_i'}(B) + \sum_P (X_{xy, I_i e_0^i} + X_{xy, e_0^i I_i} + X_{xy, e_1^i k_i} + X_{xy, k_i I_i}) b_{I_i' J_i'}(B)}{C_{xy}} \quad (7)$$

式中,源目节点对集合 Q 表示不包含故障链路的源目节点路径集合, $b_{ij}(B)$ 表示路径 $I \rightarrow J$ 之间的业务量, C_{ij} 表示链路容量。

数学模型可描述如下:

$$\min w_1 \sum_{e=1}^{|E|} \theta_e \Delta l_e + \mu w_2 \sum_{e=1}^{|E|} \theta_e f_e \quad (8)$$

$$\text{s. t. } w_1 + w_2 = 1 \quad (9)$$

$$X_{e, I_i J_i} = 1, I_i, J_i \in V \quad (10)$$

$$X_{e, I_i' J_i'} = 0, I_i', J_i' \in V \quad (11)$$

$$X_{e, I_i e_0^i} = 0, X_{e, e_0^i J_i} = 1, e_0^i \in \{e_1, e_2\} \quad (12)$$

$$X_{t, e_1^i J_i} = 1, t \in E \quad (13)$$

$$W = |(e_0^i, J_i)^n| \quad (14)$$

$$X_{e, e_1^i k_i} = 0 \cap X_{e, k_i J_i} = 0, k_i \in V \quad (15)$$

$$\sum_P (X_{ij, I_i e_0^i} + X_{ij, e_0^i I_i} + X_{ij, e_0^i k_i} + X_{ij, k_i J_i}) b_{I_i' J_i'}(B) + \sum_Q X_{ij, I_i' J_i'} b_{I_i' J_i'}(B) \leq C_{ij} \quad (16)$$

在优化模型中,式(8)的目标函数为网络重路由由物理代价增加量与拥塞代价函数加权和的最小值,其中参数 μ 为调节因子,其作用是保证 Δl_e 与 f_e 在同一数量级,参数 θ_e 表示故障链路 e 的重要度;式(9)权值因子 w_1 、 w_2 分别表示传输效率与负载均衡权值,可根据不同的网络业务需求调节权值因子;式(10)、式(11)分别作为源目节点对集合 P 和 Q 的约束条件;式(12)用以确定 P 集中路径的上游故障节点;式(13)用以确定 P 集中上游故障节点与目的节点路径的链路集合 T ;式(14)约束寻优过程中解的维度, $|(e_0^i, J_i)^n|$ 表示不同上游故障节点与目的节点的路径组合数目;式(15)限制了改进 rLFA 的节点范围,同时确定了目标函数的解空间;式(16)约束链路业务量以防止链路过载。

3.3 混沌粒子群算法求解

针对上述组合优化问题,本文采用混沌粒子群优化算法进行最小化寻优,粒子群算法的思想源于鸟群捕食行为,通过在迭代过程中对粒子的位置及速度进行不断更新来搜索全局最优解,整个寻优过程可看作粒子以一定速度向最优位置不断逼近的动态飞行过程。但传统粒子群易出现粒子早熟,从而使函数陷入局部最优。为了解决此问题,引出混沌优化思想,其改进方法是对当前最优粒子进行混沌优化,并在产生的混沌序列中选出最优粒子随机替换某现有粒子并继续进行迭代。

混沌是一种普遍的非线性现象,具有伪随机性、对初始值的敏感性和遍历性等精致的内在规律^[16]。典型的混沌系统式 Logistic 方程为:

$$y_{n+1} = \mu y_n (1 - y_n), 0 \leq \mu \leq 4 \quad (17)$$

式中, μ 为控制参数, n 为迭代次数。

结合重路由选择问题,混沌粒子群优化算法步骤如下:

步骤 1 确定算法维度,并对各维解空间进行编码。理论上对于给定网络 $G(V, E)$, 节点数 $n = |V|$, 链路数 $m = |E|$, 其备份源目节点对数量为 $n \times (n-1)$, 所以算法维度也为 $n \times (n-1)$, 但对于大规模网络来说,这显然是不可取的,因此考

虑到各备份源目节点对仅受到某条故障链路影响,将式(8)函数等价价:

$$\min \theta_e \sum_{e=1}^{|E|} (\tau w_1 \Delta l_e + \mu \tau w_2 f_e) = \sum_{e=1}^{|E|} \min(\tau w_1 \theta_e \Delta l_e + \mu \tau w_2 \theta_e f_e) \quad (18)$$

即只需针对性地求取单链路情况下的最小加权和,再将各故障状态下的最小加权和相加即为式(8)最小化函数。根据式(14)确定各链路故障状态下的算法维度,利用式(15)得到各维解空间,并对各维节点空间进行顺序编码以确定算法寻优范围,同时舍弃个别物理代价较大备份节点以方便运算。

步骤 2 确定算法参数,随机产生 N 个种群,初始化经过编码的粒子群。

步骤 3 按照传统粒子群公式对粒子群位置和速度进行更新。

步骤 4 进行子程序译码计算并比较式(8)目标函数即适应值,筛选出最优粒子群并对其进行混沌优化。

(1)将 p_k 映射到 Logistic 方程定义域 $[0, 1]$ 上,得到映射值 q_k 。

(2)通过 Logistic 方程对映射值 q_k 进行 M 次迭代,得到混沌序列。

(3)将混沌序列逆映射回原解空间,产生一组混沌变量解序列,并通过比较每个粒子适应值选出最优解 p_k^* 。

步骤 5 用混沌优化解 p_k^* 随机替换一个当前粒子。

步骤 6 转至步骤 2 直至算法达到迭代次数,最后得到最优备份节点。

4 仿真实验

4.1 性能优化分析

实验采用美国 Abilene 骨干网络^[16],该网络由 12 节点和 15 条链路组成,其中含有一个单节点度节点。

仿真中采用思科推荐权值设置方法分别对 LFA、rLFA、改进 rLFA 进行故障覆盖率及链路增补优化的比较,其中 LFA 采用文献[9]的原始大权值增补方案,结果如图 5 所示。

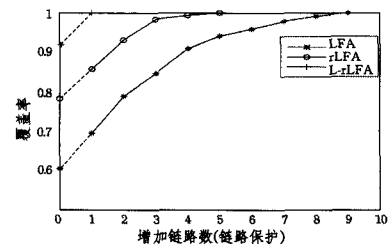


图 5 性能优化结果

图 5 的起点坐标为 3 种方案链路故障覆盖率结果,可以看出扩大 P -space 集合之后,故障覆盖率得到了有效提升且相对原始 LFA 性能优化效果明显。同时图 5 反映了 3 种方案的链路增补过程,虚线部分表示增补小权值链路,实线部分表示增补大权值链路,从仿真结果可以看出改进后的 rLFA 技术增补链路最少、性能最佳,同时 rLFA 技术较原始 LFA 链路增补数量也显著减少。通过上述理论及实验分析得出,改进 rLFA 不仅可以实现故障覆盖率的进一步提高,同时也能有效减少链路增补数量以保证故障完全覆盖。

4.2 路由选择结果分析

采用 NSFNet 网络^[19]进行仿真实现,该网络包含 14 个节

点、21 条双向链路,节点平均度数为 0.23,拓扑如图 6 所示。

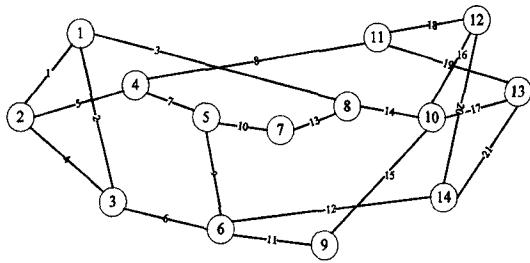


图 6 NSFNet 网络拓扑

网络业务量矩阵及链路物理长度均采用文献[20]拓扑数据,全网承载总业务量 13253Gbit/s,链路容量均为 5Tbit/s。为了充分考虑无故障状态下网络传输代价及拥塞代价,本文采用文献[21]方法设置链路权值,由于业务量较小,权值因子取 0.3。

假设实验网络拓扑链路相互对称,且不含广播局域网。实验过程中算法学习因子 $c_1=c_2=2$,种群规模为 30,惯性权值最大值为 0.9,最小值为 0.4,迭代次数为 50,混沌寻优次数为 $M=500$ 。

从网络中抽取 10 条重要度较高、发生故障概率较大的链路作为实验故障链路,分别进行编号并设定链路重要度。1—10 号链路分别为(1,2)、(4,5)、(3,6)、(7,8)、(8,1)、(4,11)、(9,10)、(10,12)、(6,14)、(10,13),其重要度分别置为 0.075、0.025、0.1、0.15、0.18、0.07、0.15、0.05、0.082、0.118,其余链路重要度置 0。

实验 1 针对业务量较小情况进行仿真,实验中分别将权重组合 w_1, w_2 置为 0.8、0.2 和 0.2、0.8,其解分别用 *opt1*、*opt2* 表示,同时与随机抽取的两组解 *rand1*、*rand2* 进行比较。考虑单链路故障情况下备用节点路由器的发送效率及拥塞控制,引入备份节点路由器处理 rLFA 阈值 m ,其表示单故障下备用接口最多处理的重路由由路径数量,本实验将其设置为 4,用以对比分析,仿真结果如图 7—图 9 所示。

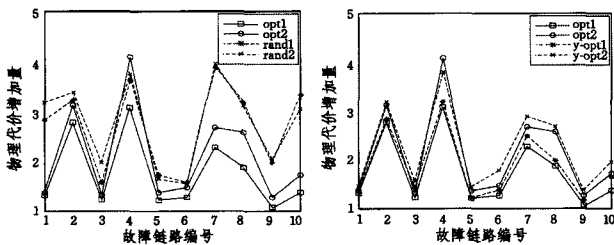


图 7 优化方案与随机方案物理代价 图 8 优化方案与阈值方案物理代价

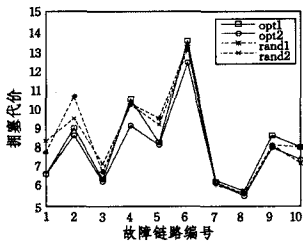


图 9 优化方案与随机方案拥塞代价

图 7、图 9 分别反映了优化方案与随机方案的物理代价增加量及拥塞代价对比关系。由图 7 可以看出,两种不同权值的优化方案能有效地减小物理代价增加值以提高业务传输

效率,同时 $w_1=0.8, w_2=0.2$ 的配置方案物理代价优化效果优于 $w_1=0.2, w_2=0.8$ 的配置方案,各个方案物理代价增加量差异度较大;由图 9 可以看出, $w_1=0.2, w_2=0.8$ 的配置方案拥塞代价小于随机方案及另一组配置方案,但各个方案整体拥塞代价较小且方案之间代价值差异度较小。纵向对比两图结果可得出,在业务量较小的情况下,改进 rLFA 重路由方案对网络的影响主要为物理代价,由于此时针对不同方案物理代价波动较大,因此在优化时其权值可尽量取大一些,这样可以在较低程度影响链路负载的情况下尽可能地保证数据包的传输效率。

图 8 反映了优化方案与设定阈值优化方案的物理代价增加量对比关系。从图中可以看出,通过对优化方案设定一定的接口,阈值会在一定程度上降低优化效果,阈值越小优化效果可能越差,但针对大规模网络此方法具有一定的使用价值,此时需要折中考虑两方面的影响。

实验 2 针对业务量较大情况进行仿真,分别对各路径业务量随机增加 1~2 倍,动态权值设置因子取 0.7,考虑到大流量对拥塞代价的影响, μ 取 0.1,实验中分别将权重组合 w_1, w_2 置为 0.8、0.2 和 0.2、0.8,其解分别用 *opt1*、*opt2* 表示,同时与随机抽取的两组解 *rand1*、*rand2* 进行比较。仿真结果如图 10—12 所示。

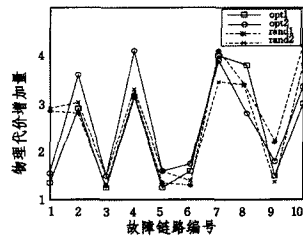
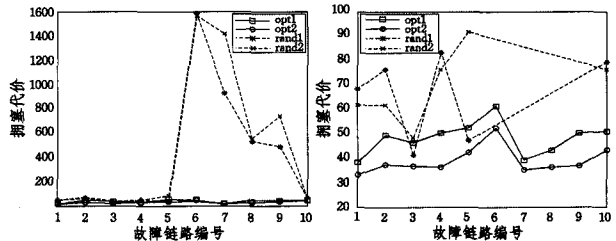


图 10 优化方案与随机方案物理代价



(a)完整拥塞代价对比图 (b)剥离后的拥塞代价对比图

图 11 优化方案与随机方案拥塞代价

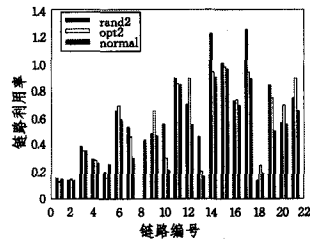


图 12 (4,11)故障情况下的链路利用率

图 10、图 11 分别反映了优化方案与随机方案在大业务量条件下的物理代价增加量及拥塞代价对比关系,图 11(b)为图 11(a)剥离拥塞代价超过 100 的随机方案的放大图。通过对比可以得出,在业务量较大的情况下,网络拥塞代价显著

(下转第 118 页)

- [17] Xiong L, Liu L. PeerTrust: supporting reputation-based trust for peer-to-peer electronic communities [J]. IEEE Trans. Knowl. Data Eng. (TKDE), 2004, 16(7): 843-857
- [18] Uchegger S, LeBoudec J-Y. A robust reputation system for p2p and mobile ad-hoc networks [C] // Proceedings of the Second Workshop on the Economics of Peer-to-Peer Systems. 2004: 213-225
- [19] Motallebi M R, Ishikawa F, Honiden S. Trust Computation in Web Service Compositions Using Bayesian Networks [C] // International Conference on Web Services. 2012: 623-626
- [20] Yang Nian-hua, Chen Xin, Yu Hui-qun. A Reputation Evaluation Technique for Web Services [J]. Security and Its Applications, 2012, 6(2): 329-334
- [21] Malik Z, Bouguettaya A. Reputation Bootstrapping for Trust Establishment among Web Services [J]. IEEE Internet Computing, 2009, 13(1): 40-47
- [22] 李治军, 姜守旭, 李晓义. 采用排名反馈的 P2P 名誉评价模型 [J]. 软件学报, 2011, 22(4): 745-760
- [23] 杨超, 刘念祖. RepTrust: P2P 环境下基于声誉的信任模型 [J]. 计算机科学, 2011, 38(3): 126-132
- [24] 王勇, 侯洁, 白杨, 等. 基于反馈相关性的 P2P 网络信任模型 [J]. 计算机科学, 2013(2): 67-74
- [25] 于坤. P2P 网络激励兼容的声誉评价及服务分配 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29(6): 78-84
- [26] 杨旭东. 一种从 Web 日志中挖掘用户浏览偏爱路径的算法 [J]. 重庆理工大学学报, 2012, 26(10)

(上接第 109 页)

增加,且不同方案之间的代价波动较大,特别是一些高负载链路,若重路由方案不经优化,一旦其发生故障,很容易导致网络拥塞代价急剧升高,如图 11 的 6、7、8 及 9 号故障链路,所以此时优化方案应当尽量考虑减小拥塞代价,在计算过程中可通过增大拥塞代价的权值来实现。

图 12 为 6 号故障链路即链路(4,11)故障情况下,网络各链路的链路利用率量化结果。实验抽取了故障前网络链路利用率 normal、改进 rLFA 重路由随机方案 rand2 以及改进 rLFA 重路由优化选择方案 opt2 等 3 组方案进行比较。从图中可以看出,两种重路由方案的链路利用率整体上大于无故障网络,这是符合实际情况的。随机方案负载不均衡,部分链路出现严重过载现象,导致拥塞阻碍业务传输。经过重路由选择优化后的方案能有效地控制拥塞,实现负载均衡。

结束语 本文在改进后的 rLFA 技术基础上提出一种基于混沌粒子群并考虑传输代价和负载均衡的路由选择算法,该算法在保证传输效率的同时实现了动态流量下的负载均衡。通过改进 rLFA 并结合引入隧道技术的链路增补方法不仅保证故障全覆盖,也减少了链路增补数量,从而实现了性能优化。在后续工作中,将针对不同的动态流量模型进行研究,以进一步扩大其适用范围。

参 考 文 献

- [1] Zinin A A. Basic specification for IP fast-reroute; loop-free alternate [EB/OL]. <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-rtgwg-ip-frr-spec-base-05.txt>, 2006
- [2] Atlas A. U-turn alternates for IP/LDP fast-reroute [EB/OL]. IETF Internet Draft, draft-atlas-ip-local-protect-uturn-02.txt, 2005
- [3] Bryant S, Filfils C, Previdi S. IP fast reroute using tunnels [EB/OL]. <http://tools.ietf.org/html/draft-bryant-ipfrr-tunnels-00.txt>, 2004
- [4] Bryant S, Shand M, Previdi S. IP fast reroute using Not-via addresses [S]. IETF Draft, 2010
- [5] Iyer S, Bhattacharyya S, Taft N, et al. An approach to alleviate link overload as observed on an IP backbone [C] // Proceedings of IEEE INFOCOMM'03, San Francisco, USA, 2003: 406-416
- [6] Wang, Nelakuditi S. IP fast reroute with failure inferencing [C] // Proceeding of INM'07, The 5-9's Workshop at ACM SIGCOMM, 2007: 268-273
- [7] Csikor L, Tapolcai J, Rétvári G. Optimizing IGP link costs for improving IP-level resilience with Loop-Free Alternates [J]. Computer Communications, 2013, 36(6): 645-655
- [8] Su Hui-kai. A Local Fast-Reroute mechanism for single node or link protection in hop-by-hop routed networks [J]. Computer Communications, 2012, 35(8): 970-979
- [9] Retvari G, Tapolcai J, Enyedi G, et al. IP Fast ReRoute: Loop Free Alternates revisited [C] // INFOCOM. 2011: 2948-2956
- [10] Menth M, Hartmann M, Martin R, et al. Loop-free alternates and not-via addresses: A proper combination for IP fast reroute? [J]. Computer Networks, 2010, 54(8): 1300-1315
- [11] Tseng Po-kai, Chung Wei-ho. Joint coverage and link utilization for fast IP local protection [J]. Computer Networks, 2012, 56(15): 3385-3400
- [12] Xu Ming-wei, Li Qing, Pan Ling-tao, et al. Minimum Protection Cost Tree: A tunnel-based IP Fast Reroute Scheme [J]. Computer Communications, 2012, 35(17): 2082-2092
- [13] Xu Ming-wei, Yang Yuan, Li Qi. Selecting shorter alternate paths for tunnel-based IP Fast ReRoute in linear time [J]. Computer Networks, 2012, 56(2): 845-857
- [14] Bryant S, Filfils C, Shand M, et al. Remote LFA FRR [S]. IETF draft, 2013
- [15] Csikor L, Retvari G. IP Fast Reroute with Remote Loop-Free Alternates; the Unit Link Cost Case [C] // ICUMT. 2012: 663-669
- [16] Survivable fixed telecommunication Network Design library (SNDlib) [EB/OL]. <http://sndlib.zib.de>
- [17] Fortz B, Thorup M. Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights [C] // Proceedings of IEEE infocom 2000. Tel-Aviv, Israel, 2000: 519-528
- [18] 刘洪波, 王秀坤, 谭国真. 粒子群优化算法的收敛性分析及其混沌改进算法 [J]. 控制与决策, 2006, 21(6): 636-640
- [19] Mérindol P, Francois P, Bonaventure O, et al. An efficient algorithm to enable path diversity in link state routing networks [J]. Computer Networks, 2011, 55(5): 1132-1149
- [20] Betker A, Gerlach C, Hulsermann R, et al. Reference transport network scenarios [R]. MultiTera Project, Tech. Rep. 2004
- [21] 陈铎龙, 孟相如, 梁霄, 等. 基于动态流量的多拓扑链路权值优化算法 [J]. 计算机科学, 2013, 40(4): 86-90