

基于无环替代重路由优化的网络可生存性增强方法

王明鸣, 孟相如, 庄绪春, 康巧燕
(空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

摘 要: 为了提高网络单链路(节点)故障的快速恢复能力以增强网络可生存性, 提出一种基于模拟退火粒子群优化及二分图最小点集覆盖算法的无环替代重路由技术优化方法. 无环替代快速重路由技术很难实现故障完全覆盖, 因此在原始拓扑基础上首先利用模拟退火粒子群算法对无环替代路径(LFA)数量基于权值进行最大寻优, 对经过权值优化无法实现故障完全覆盖的网络, 再通过两次链路增补过程以达到 LFA 全备份的目的. 实验结果表明该方法不仅能实现网络所有单链路(节点)的无环替代, 增强了网络可生存性, 同时相较原始拓扑能有效地减少增补链路数.

关键词: 可生存性; 无环替代; 模拟退火粒子群; 二分图

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)10-0048-04

An Approach of Enhancing Network Survivability by Optimization Based on LFA Re-routing

WANG Ming-ming, MENG Xiang-ru, ZHUANG Xu-chun, KANG Qiao-yan

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

Abstract: Aiming at improving network single link (node) failure fast recovery capability to enhance network survivability, a optimization methods is proposed based on LFA re-routing technology integrating the optimization of links weights on the base of PSO algorithm based on Simulated Annealing with minimal set cover algorithm based on bipartite graph. As LFA is hard to promise full coverage for all possible failure cases, PSO algorithm based on Simulated Annealing is used to optimize link weights for maximizing the numbers of LFA on the basis of original topology. Considering some networks is not also achieved full LFA failure full coverage after the optimization of link weights, then, the twice processes of supplement links is used to attain failure full backups. The experiment results show that this method proposed can not only keep all single link (node) failure with full LFA and enhance network survivability, but also effectively reduce the numbers of supplement links compared with the original topology.

Key words: survivability; Loop-Free Alternates; PSO based on Simulated Annealing; bipartite graph

1 引言

近年来,随着网络规模的不断扩大,恶意攻击、软硬件故障等问题对 IP 网络造成很大威胁,提高网络系统在发生链路及节点故障的情况下的快速恢复能力成为了增强网络可生存性的重要方式之一. IP 网络快速故障恢复技术包括主动性策略和被动性策略两种方式,主动性快速恢复策略由于故障处理时

间短,切换备份路径迅速应用较为广泛.

基于备份路径的主动性快速恢复策略,文献[1]中提出一种故障非敏感路由技术(failure insensitive routing, FIR),文献[2]中提出偏转路由技术(deflection routing, DR),该技术算法的复杂度较高,同时需要隧道技术支持. 文献[3]中提出一种无环替代(Loop-Free Alternates, LFA)快速重路由技术,针对 LFA 故障覆盖率无法达到要求的问题,文献

收稿日期: 2013-12-17; 修回日期: 2014-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(61201209); 陕西省自然科学基金(2013JQ8013)

[4]中通过对原始拓扑增补链路实现完全备份,但增加过多的冗余链路一方面破坏了原始拓扑的完整性,另一方面也加大网络运营成本。

本文在原始拓扑基础上首先利用模拟退火粒子群算法对无环备份链路数基于权值进行最大寻优,对经过权值优化无法实现故障完全覆盖的网络,利用二分图模型求解链路增补数目以实现故障全覆盖。全文主要围绕权值优化及链路增补两方面工作展开。

2 无环替代重路由技术

无环替代重路由技术是一种快速重路由技术,下面举例说明其工作原理。

给定 LFA 基本网络拓扑图如图 1 所示。假设节点 b 为源节点, c 为目的节点,正常情况下,通过最短路算法计算可知 b 的寻址路径为 $b \rightarrow c$,当下一跳链路 $b \rightarrow c$ 失效时, b 需要一个备用邻居接口来继续传输数据包。如图 1 所示, a 节点可作为备用接口,即当 b 检测到失效后,便可以立即将流量切换至 a 从而实现快速重路由。但对于路径 (c, b) , c 节点却没有备用接口。保证无环替代需满足以下方程:

$$d(n, d) < d(n, s) + d(s, d) \quad (1)$$

式中, s 为源节点, d 为目的节点, n 为无环替代备用接口, $d(x, y)$ 表示节点 x, y 的最短路径长度。此时称链路 $s \rightarrow n \rightarrow d$ 为一条基于链路保护的无环替代备份路径(LFA)。

同理,针对某节点对 (x, y) 下一跳节点受损情况,无环替代路径需要满足以下方程:

$$\begin{aligned} d(n, y) &< d(n, x) + d(x, y) \\ d(n, y) &< d(n, z) + d(z, y) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, z 为最短路下一跳节点, n 为无环替代备用接口,此时称链路 $x \rightarrow n \rightarrow y$ 为一条基于节点保护的无环替代备份链路。文献[5]中提出当源节点、目的节点对(源目节点对)相邻时,在快速重路由技术中通常将节点保护问题转化为链路保护问题来处理。

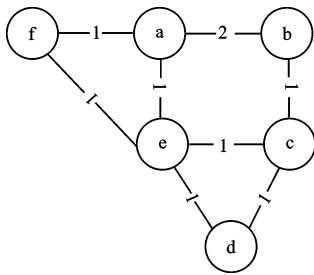


图 1 基本网络拓扑

为了反映 LFA 的故障恢复性能,这里引入基于

源目节点对的 LFA 故障覆盖率(LFA 备份率) $\eta(G)$, G 表示某给定拓扑。

$$\eta(G) = \frac{LFA_{protected}(s, d) \text{ pairs}}{all(s, d) \text{ pairs}} \quad (3)$$

即 $\eta(G)$ 表示具有 LFA 备份路径的源目节点对数目与所有源目节点对数目的比值。

3 无环替代技术的性能优化

无环替代重路由技术发展态势良好,但是其 LFA 备份率不高的问题依然亟待解决。本文提出一种基于模拟退火粒子群的权值优化方案,同时结合改进的链路增补算法对 LFA 进行优化。优化流程如图 2 所示。

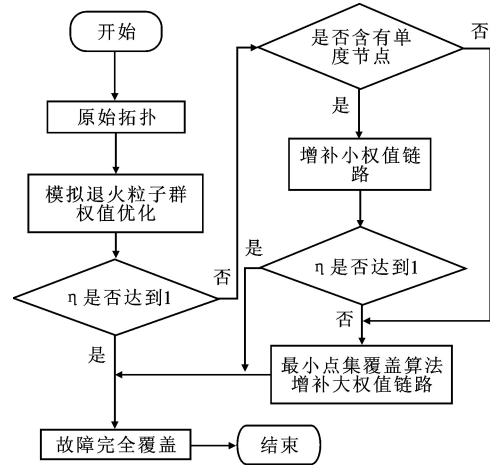


图 2 性能优化流程图

3.1 权值优化模型建立

给定无向加权网络拓扑 $G(V, E)$, V 为拓扑节点集, E 为链路集, S 为所有源目节点对集合, $|N_s|$ 表示源节点 s 的邻居节点个数。用二进制数 ∂_s^d 表示源目节点对 (s, d) 是否存在(链路/节点保护)无环替代路径 LFA, 如果该节点对存在恢复链路则值置 1, 否则置 0。为此可以将问题转换为以下优化模型:

$$\max \sum_{(s, d) \in S} \partial_s^d \quad (4)$$

$$s. t. u_{ij}^d + s_{ij}^d = u_i^d + c_{ij}, 0 \leq s_{ij}^d \leq C y_{ij}^d \quad (5)$$

$$\forall (s, d) \in S, \forall (i, j) \in E \quad (6)$$

$$\sum_{v \in N_s} y_{sv}^d \leq |N_s| - 1 \quad \forall (s, d) \in S \quad (7)$$

$$z_{sv}^d, y_{sv}^d \in \{0, 1\} \quad \forall (s, d) \in S, \forall v \in N_s \quad (8)$$

$$u_v^s - u_v^s + u_v^s - u_v^s + z_{sv}^d \leq 0, 0 \leq z_{sv}^d \leq 1 \quad (9)$$

$$\sum_{v \in N_s} z_{sv}^d \geq \partial_s^d, \forall (s, d) \in S$$

$$c_{ij} = c_{ji}, c_{ij} \in \{1, \dots, C_{\max}\} \forall (i, j) \in E \quad (10)$$

目标函数表示在某组链路设置 c 下, 拓扑无环替代路径最大值. u_s^d 表示节点 s 到节点 d 的最短路径长度. (5) ~ (10) 为约束条件, 其中 (5) ~ (7) 为文献[6] 中提出的最短路径优化准则, 可理解为对任意链路 (i, j) , 有 $u_j^d \leq u_i^d + c_{ij}$ 且节点 i 至少有一个邻居节点使之取等, 二进制变量 y_{sv}^d 用来保证取等条件. (8) ~ (9) 为式(1) 的对应约束条件, 其中 z_{sv}^d 为标记变量, 当且仅当节点 v 为节点 s 到节点 d 的 LFA 时置 1. (10) 为链路权值范围. 上述问题本质上为链路权值优化问题, 文献[7] 中已证明此为一个 NP 难问题, 本文拟采用基于模拟退火粒子群的启发式算法进行寻优.

3.2 基于模拟退火粒子群算法的权值优化策略

传统粒子群算法实现方便、收敛速度快, 具有较好的全局搜寻能力, 但易陷入局部最优, 而模拟退火算法却具有较强的跳出局部最优的能力, 基于此在优化链路权值时将两者结合以提高寻优精度, 同时在粒子群寻优过程中引入惯性权重和粒子杂交方法以进一步提高全局寻优能力、加快收敛速度.

3.2.1 模拟退火算法

模拟退火算法退火过程可以表述为: 在一个给定的温度下, 搜索从一个状态随机变化到另一个状态. 每一个状态到达的次数服从一个概率分布. 当温度很低时, 以概率为 1 停留于最优解. 在此退火过程中, 优解接受, 否则就以一定概率接受非优解.

3.2.2 改进的粒子群优化算法

粒子群算法于 1995 年提出, 该算法具有较强的全局寻优能力. 每一次迭代粒子的速度和位置都会根据以往个体和群体的飞行经验进行更新. 假设一个 N 维粒子搜索空间, 初始种群的个数为 M , 第 k 个粒子在空间中的位置为 x_k , 此时认为该位置为一个潜在解, 将此解带入给定的适应函数中即可得到该粒子下的适应值, 通过适应值的比较来判断粒子的优劣性. 设 v_k 为第 k 个粒子的飞行速度. x_k, v_k 均为 N 维向量, 它们在粒子群算法的更新过程如下:

$$\begin{cases} v_k^{t+1} \leftarrow \omega v_k^t + c_1 r_1 (p_k^t - x_k^t) + c_2 r_2 (p_g^t - x_k^t) \\ x_k^{t+1} \leftarrow x_k^t + v_k^{t+1} \end{cases} \quad (11)$$

式中, t 为迭代次数, $\omega > 0$ 是惯性权重, c_1, c_2 为非负的学习因子, r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, p_k 是第 k 个粒子的个体最优位置, p_g 是整个种群的全局最优位置. 粒子的个体最优位置通过比较当前最优位置和更新位置的适应值获得, 群体最优位置通过比较所有粒子个体最优位置的适应值获得.

为了避免算法早熟、改进其收敛性能, 引入线性递减的惯性权重, 函数表达式为

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{t * (\omega_{\max} - \omega_{\min})}{t_{\max}} \quad (12)$$

为了提高寻优精度, 加快收敛速度, 引入粒子杂交算法, 此方法源于遗传算法, 具体操作为在每次迭代过程中, 按照一定的杂交概率选择一定数量粒子进入杂交池从而形成新的子粒子群, 再从中随机两两选择母粒子, 对其进行杂交产生子粒子, 公式如下:

$$\begin{aligned} x_i^* &= px_i + (1 - p)x_j \\ x_j^* &= px_j + (1 - p)x_i \end{aligned} \quad (13)$$

式中, x_i^*, x_j^* 为子粒子, x_i, x_j 为母粒子. 根据杂交算法可得子粒子速度公式:

$$v_i^* = \frac{v_i + v_j}{|v_i + v_j|} |v_i| \quad v_j^* = \frac{v_i + v_j}{|v_i + v_j|} |v_j| \quad (14)$$

3.2.3 算法步骤

Step1 在 $\{1, \dots, C_{\max}\}$ 范围内初始化链路权值组作为算法初始种群, 并设置算法参数;

Step2 随机产生初始粒子群 A_1 , 遍历每个种群对应的拓扑源目节点对, 在优化条件 (5) ~ (7) 约束下利用 (8), (9) 判决条件计算目标函数 (4), 比较得出个体及全局最优适应值, 即当前最大数量 LFA;

Step3 利用 (11) 进行状态更新, 通过比较适应值得到粒子群 A_2 ;

Step4 对粒子群 A_2 进行杂交操作, 根据 (13) 可得到 x_i^*, x_j^*, x_i, x_j , 比较其适应值做判决: 若 $\min\{1, \exp(f(x_i) - f(x_i^*)/T)\} > rand$, 其中 $rand$ 为 $[0, 1]$ 之间随机数, 则 x_i^* 代替 x_i ; x_j^* 代替 x_j 的条件同理可得. 得出个体最优、全局最优解, 一组解即为一组权值设置;

Step5 若迭代次数小于预定最大迭代次数, 则修改退火温度, 即 $T = CT$, 跳至 Step3; 否则停止搜索, 输出全局最优权值及适应值.

3.3 增补链路以实现完全备份

前文所提的权值优化方法虽然能有效的提高 LFA 备份率, 但很难为每一对源目节点找到 LFA 备份路径, 下面通过增补链路对剩余无 LFA 备份源目节点对进行备份以实现故障完全覆盖.

3.3.1 增补小权值链路

设无向加权网络 $G(V, E)$ 含有单节点度节点 Q , 此时需通过增补小权值链路实现 LFA 备份, 其核心算法^[4] 如下所示.

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
- 3.3.2 基于二分图的大权值链路增补算法

为了使已具有 LFA 备份路径的节点对不受影响,达到进一步减小增补规模的目的,采用增加若干条权值足够大的链路的方法,在增加 LFA 故障覆盖率的同时不改变各源目节点对间的最短路径。此处的“足够大”可理解为大于所有源目节点对最短路径的最大值。文献[4]中利用贪婪算法求解,为了进一步优化增补链路数,本文利用二分图模型进行优化。建立二分图 $H(X, Y, Z)$, 令 $(s_i, d_i), i = 1, 2, \dots, k$ 为无 LFA 的源目节点对, $l_j, j = 1, 2, \dots, t$ 为有效的增补链路,模型中点集为 $X \cup Y$, 边集为 Z , 其中 $x_i \in X$ 与 (s_i, d_i) 相对应, $y_j \in Y$ 与 l_j 相对应, Z 包含了 X 与 Y 所有可能的保护组合,二分图建立节点保护二分图如图 3 所示。

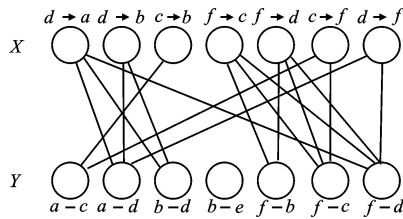


图 3 链路增补二分图模型

为了求取最小增补链路数,本文将问题等价于二分图最小节点集覆盖问题,可描述为:对 $H(X, Y, Z)$, 设点集 $Y' \subseteq Y$, 满足 X 中任意节点总能在 Y' 中找到与之关联的节点,此时称 Y' 为一个节点覆盖集,最小优化问题转化为求取 $|Y'|$ 最小值。为解决最小覆盖问题,提出一种启发寻优方案,核心算法如下所示。

算法 2:

1. $Y' \leftarrow \varnothing$
2. While $X \neq \varnothing$
3. $m \leftarrow \arg \min_{y \in Y} dg(y)$ // 将 Y 中度数最小的节点赋给 m
4. if $\exists k \in \text{neighbor}(m)$ and $dg(k) = 1$ then
5. $Y' \leftarrow Y' \cup \{m\}$
6. $X \leftarrow X \setminus \text{neighbor}(m)$
7. else
8. for each $p \in \text{neighbor}(m)$ and $dg(p) = 2$
9. $z \leftarrow n \in \text{neighbor}(p) \setminus \{m\}$
10. $Y' \leftarrow Y' \cup \{z\}$
11. $X \leftarrow X \setminus \text{neighbor}(z)$

12. end for
13. end if
14. $Y \leftarrow Y \setminus \{m\}$
15. end While

4 结束语

针对无环替代快速重路由技术很难实现 LFA 全覆盖的问题,本文提出一种基于模拟退火粒子群算法的权值优化方法,提高其故障覆盖率,对于优化后无法达到完全覆盖的网络,利用二分图模型求解链路增补数目以实现故障全覆盖。实验结果表明该方案不仅能实现网络所有链路的无环替代,增强了网络可生存性,同时也为减小增补的链路数量提供了可行性。在后续工作中,将利用流量工程对基于 LFA 的网络负载均衡进行研究,以进一步扩大其适用范围。

参考文献:

- [1] Wang Nelakuditi S. IP fast reroute with failure inferencing[C]//Proceeding of INM'07, The 5-9's Workshop at ACM SIGCOMM, Japan: Kyoto, 2007.
- [2] Yer 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.
- [3] Zinin A A. Basic specification for IP fast-reroute; loop-free alternate [EB/OL]. [2014-04-20]. <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-rtgwg-ipfrr-spec-base-05.txt>.
- [4] Retvari G, Tapolcai J, Enyedi G, et al. IP fast reroute; loop free alternates revisited[C]// INFOCOM 2011. China: Shanghai, 2011: 2948-2956.
- [5] Bryant S, Shand M, Previdi S. IP fast reroute using Not-via addresses[R]. Internet Draft, 2010.
- [6] Ahuja R, Magnanti T, Orlin J. Network flows: theory, algorithms and applications [M]. New Jersey, Prentice-Hall, 1993.
- [7] Fortz B, Thorup M. Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights[C]//Proceedings of IEEE info-com 2000. Teaviv, Israel, 2000: 519-528.

作者简介:

- 王明鸣 男, (1989-), 硕士研究生。研究方向为网络可生存性。
 孟相如 男, (1963-), 教授, 博士生导师。研究方向为宽带通信网络。
 庄绪春 男, (1980-), 讲师。研究方向为宽带通信网络。
 康巧燕 女, (1980-), 讲师。研究方向为宽带网络和光通信技术。