

基于着色树扩展的 IP 网络双链路故障恢复技术

赵甜甜, 孟相如, 庄绪春, 赵志远

(空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

摘 要: 为了实现 IP 网络双链路故障快速恢复, 提出一种基于果蝇优化算法扩展着色树技术的网络双链路故障恢复方法. 在介绍基于 3-着色树的故障恢复策略的基础上, 利用改进的果蝇优化算法对传统着色树概念进行扩展, 生成三个链路不相交的着色树来实现网络双链路故障恢复. 仿真验证了该方案能够有效缩短恢复路径的长度.

关键词: 双链路故障; 3-着色树; 恢复策略; 果蝇优化算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)11-0006-05

Recovery From Dual Link Failures Based on Colored Trees Expanding

ZHAO Tian-tian, MENG Xiang-ru, ZHUANG Xu-chun, ZHAO Zhi-yuan

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

Abstract: In order to achieve the recovery from dual link failures, a method is proposed based on colored trees expanding using fruit fly optimization algorithm. By introducing dual link failures recovery schemes based on three-colored trees, it is created that three link disjoint trees to achieve dual link failures recovery by utilizing modified fruit fly optimization algorithm to expand the traditional colored trees building method. The experimental results show that this strategy can shorten the length of rerouting paths.

Key words: dual link failures; three-colored trees; recovery strategy; fruit fly optimization algorithm

1 引言

随着网络规模的不断扩大, 网络新技术高速发展, 诸如电子商务、远程医疗、在线教学等网络实时业务带给人们生活极大的便利, 但是因攻击、故障、自然灾害等带来的网络中断时有发生, 此时依靠传统路由协议很难保证在故障环境下数据转发的可达性, 针对网络故障的快速恢复技术成为网络抗毁性研究的热点之一.

针对 Spring 网络进行长达 10 个月观察得到各类故障的统计规律, 其中多链路故障约占所有故障的 25%^[1], 而现有网络故障恢复技术研究多集中在单故障恢复, 诸如快速重路由^[2]、故障非敏感路由^[3]、偏转路由^[4]等较为成熟的单故障恢复技术很

难应用到解决网络多故障问题中. 网络多故障恢复技术研究处于起步阶段, 文献[5-7]中涉及的弹性路由层(RRL)和多路由配置(MRC)通过预先将网络拓扑抽象为若干备份子层, 各个子层作为部分链路的保护层, 当网络发生故障时, 路由器将数据切换至相应的保护子层实现流量无中断传输, 这虽然为解决网络多故障开创了新途径, 但是相关方案在恢复性能和实际应用中均需要不断完善. 文献[8]中利用免疫算法对 MRC 进行性能优化, 虽然具有较优的多故障恢复能力, 但其故障覆盖率及恢复路径问题亟待解决. 基于业务恢复能力和路径恢复长度的考虑, 本文提出一种基于着色树扩展的 IP 网络双链路故障恢复技术, 并采用群智能优化算法进行着色树生成.

收稿日期: 2015-01-12; 修回日期: 2015-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(61201209)

2 基于着色树扩展的双链路故障恢复技术

2.1 着色树技术扩展

着色树技术^[9]以网络中任意点为出发点生成到目的节点的两条链路或节点不重叠的备份路径,称之为红树和蓝树,数据流量通过在着色树之间切换达到链路或节点保护的目的.将该技术进行扩展,在网络中各点生成到目的节点的链路或节点不相关的三条备份路径,记为红树(Red tree)、蓝树(Blue tree)、绿树(Green tree),通过在数据包头增加识别位(SF)进行故障状态下流量切换实现网络多故障恢复,称之为3-着色树技术.

3-着色树技术根据生成算法不同可分为链路不相交路径(Colored trees link-disjoint, CT-LD)和节点不相交路径(Colored trees node-disjoint, CT-ND).

给定网络拓扑 $G(N, L)$, 其中 N 代表节点集合, L 代表链路集合, $s, d, i, j \in N$, s 为源节点, d 为目的节点, i, j 为网络中其他任意节点. R, B, G 分别代表3-着色树中的红树、蓝树、绿树. 用 P_{sd}^R 、 P_{sd}^B 、 P_{sd}^G 表示从节点 s 到节点 d 在红树、蓝树、绿树上的链路集合.

CT-LD 条件: 若路径 $s \rightarrow d$ 的红树包含链路 $i \rightarrow j$, 则路径 $s \rightarrow d$ 的蓝树和绿树都不包含 $i \rightarrow j$, 也不包含 $j \rightarrow i$. 对 $\forall s \in N \setminus \{d\}, \forall i, j \in N$, 表达式为

$$\begin{aligned} i \rightarrow j \in P_{sd}^R &\Rightarrow \\ (i \rightarrow j \notin P_{sd}^B) \cap (j \rightarrow i \notin P_{sd}^B) \cap & \\ (i \rightarrow j \notin P_{sd}^G) \cap (j \rightarrow i \notin P_{sd}^G) & \end{aligned} \quad (1)$$

CT-ND 条件: 若路径 $s \rightarrow d$ 的红树包含节点 i , 则路径 $s \rightarrow d$ 的蓝树和绿树不包含节点 i . 对 $\forall s \in N \setminus \{d\}, \forall i \in N \setminus \{s, d\}$, 表达式为

$$i \in P_{sd}^R \Rightarrow (i \notin P_{sd}^B) \cap (i \notin P_{sd}^G) \quad (2)$$

以目的节点 B 为根的 3-着色树示意拓扑如图 1 所示.

2.2 基于 3-着色树的双链路故障恢复技术

在基于 3-着色树的双链路故障恢复技术中, 数据流量转发分为 3 个不同的状态: 无故障状态、单故障状态、双故障状态. 路由器通过查询数据包头识别位(SF)和入口链路所在着色树颜色标识(C)信息判断数据所处状态并对故障进行进一步响应. 数据包头识别位 SF 为 2 bit, 二进制编码可得 4 种情况, 分别如下: 00—网络无故障状态; 01/10/11—网络出现单链路故障后切换流量至相应颜色的着色树, 对应关系为红树/蓝树/绿树. 着色树颜色标识 C 为 1

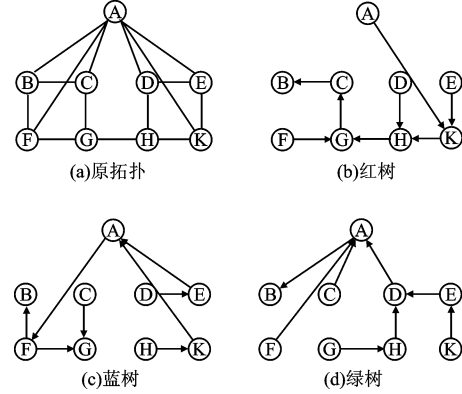


图 1 示意拓扑以及 3-着色树

bit, 字符编码结果: R, B, G 分别代表当前数据所在着色树为红树, 蓝树, 绿树.

基于最短路径优先考虑, 当 3-着色树生成后, 从不同节点出发的数据到目的节点选择不同的路径, 即数据优先选择在路径最短的着色树上进行转发. 路由器收到数据后处理流程如图 2 所示.

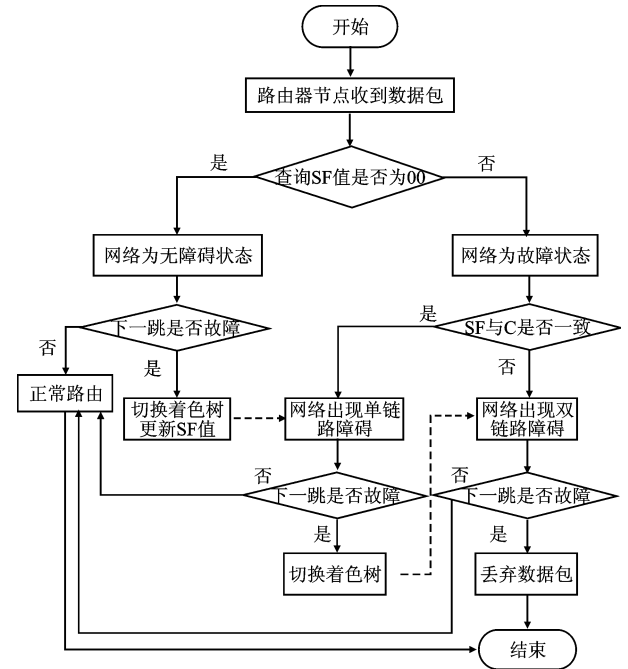


图 2 网络双链路故障恢复流程

当路由器节点收到数据包后, 提取数据包头识别位 SF 值, 当 $SF=00$ 时, 将忽略颜色标识 C 值, 判定网络处于无故障状态. 此时, 若后续没有检测到网络故障, 则根据路由器目的地址将数据包从入口链路所在着色树的直连出口链路转发出去, 进行一次正常路由; 若后续检测到网络故障, 切换数据包所在着色树后进行路由, 并更新 SF 值, 此时网络所处状态为单链路故障.

当检测到 $SF \neq 00$ 时,可以判定网络处于故障状态,根据 SF 值与 C 值是否一致可以判定网络处于单链路故障状态还是双链路故障状态.当指示着色树一致时,网络处于单故障状态,检查数据下一跳是否故障,若没有出现故障,则进行正常路由;如出现故障,则再一次切换着色树,但是不更新 SF 值,表示网络出现双链路故障.此时,在检测数据包头标识信息时, SF 值与 C 值不一致,数据转发如前所述,下一跳可用时进行正常路由;下一跳故障时丢弃数据包.

3 改进果蝇优化算法的着色树生成算法

着色树生成算法是基于着色树扩展网络故障恢复技术的重要环节,文献[10]中提出基于路径扩充生成着色树,文献[11]中提出基于深度优先搜索生成着色树,上述方法算法步骤复杂,存在生成路径次优问题.本文提出一种基于智能优化的算法进行 3-着色树生成.

果蝇优化算法^[12-13](Fruit Fly Optimization Algorithm, FOA)模拟果蝇觅食过程,依据果蝇个体强大的嗅觉和视觉灵敏度,可以迅速锁定食物及其同伴的位置.该算法具有参数调节少、程序实现简单的优点,但算法也存在后期收敛速度慢,易于陷入局部最优的问题.引入被动更新机制改进果蝇优化算法,设立公告板记录比较更新幅度对算法搜索范围进行调整,可以有效解决算法早熟问题.同时,依据 3-着色树特点,将算法中变量扩展到三维空间,最终找到一个最优的位置,即食物所在位置 X_{best} 、 Y_{best} 、 Z_{best} ,可以用这个位置表征三个不同的着色树.

3.1 编码和解码设计

网络拓扑 $G(N, L)$ 中共 l 条链路,选定正方向编号为 $1 \sim l$,反方向编号为 $l+1 \sim 2l$,编码过程为给定长度为 $2l$ 的二进制字符串,相应位置的 1 代表某着色树包含网络中该链路的这个方向,反之,0 代表某着色树不包含网络中该链路的这个方向.长度为 $2l$ 的二进制字符串和网络拓扑中的链路一一对应,因此解码过程为将相应位置的字符串还原到网络拓扑中,可以唯一确定着色树中的路径.

3.2 被动更新机制

由于果蝇个体依据全局最优个体更新,当全局最优个体并不理想时,果蝇优化算法易于陷入局部最优解,引入被动更新机制,设立公告板记录每次果蝇更新的距离 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ ,若连续三次更新距离的

均值 $\bar{\Delta}$ 小于给定阈值 Δ ,则引入随机因子 β 调整更新参数.

3.3 改进的果蝇优化算法步骤

改进果蝇优化算法生成 3-着色树主要步骤如下所示.

step1 初始化果蝇位置 X_0 、 Y_0 、 Z_0 ,代表三个着色树,设定种群规模 Popsizes 及最大迭代次数 T .

step2 更新果蝇位置 X_i 、 Y_i 、 Z_i ,果蝇个体利用其灵敏的嗅觉,可以找到食物的大致位置,因此赋予果蝇个体位置更新的方向和距离,更新公式如下:

$$X_i = X_{i-1} + RX \quad (3)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + RY \quad (4)$$

$$Z_i = Z_{i-1} + RZ \quad (5)$$

式中, RX 、 RY 、 RZ 为果蝇个体移动的随机距离.

step3 计算味道浓度判定值 S_i .在一般情况下将果蝇个体与原点之间距离 $Dist_i$ 的倒数作为判定值,如式(7)所示;在被动更新机制中,引入随机因子调整判定值,如式(8)所示.

$$Dist = \sqrt[3]{X_i^3 + Y_i^3 + Z_i^3} \quad (6)$$

$$S_i = \frac{1}{Dist_i} \quad (7)$$

$$S_i = \frac{1}{Dist_i} + \beta \quad (8)$$

式中,随机因子 β 可以是固定值,也可以是具有某种统计规律的参量.

step4 计算味道浓度 $Smell_i$.依据味道判定函数 Function(),综合考虑路径长度和着色树相交概率,设定每个味道浓度判定值对应的味道浓度:

$$Smell_i = \gamma \cdot \frac{2}{S_i} + (1 - \gamma) \cdot (\gamma |X_i - Y_i| + |Y_i - Z_i| + |Z_i - X_i|) \quad (9)$$

式中, γ 为路径长度和相交概率的调节度,调节范围 $\gamma \in [0, 1]$.

step5 筛选种群中味道浓度最佳的果蝇,选择味道浓度最小值为最佳果蝇位置:

$$[bestSmell_bestindex] = \min(Smell_i) \quad (10)$$

step6 记录最佳味道浓度值及其位置坐标,此时,果蝇群体利用其独特的视觉功能向最佳位置飞去:

$$Smellbest = bestSmell \quad (11)$$

$$X_{best} = X(bestindex) \quad (12)$$

$$Y_{best} = Y(bestindex) \quad (13)$$

$$Z_{best} = Z(bestindex) \quad (14)$$

step7 公告板计算更新幅度,若连续三次更新

幅度均值 $\bar{\Delta}$ 均小于给定阈值 Δ ,则利用式(8)执行被动更新操作;否则利用式(7)进行正常更新操作.更新幅度均值计算公式为

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{3} (|X_{\text{best}} - X_i| + |Y_{\text{best}} - Y_i| + |Z_{\text{best}} - Z_i|) \quad (15)$$

step8 循环执行 step2 ~ step6,直至当前执行次数 t 达到最大迭代次数 T ;输出果蝇个体的最佳位置 X_{best} 、 Y_{best} 、 Z_{best} .

4 性能分析与仿真

4.1 生成算法正确性验证

生成 3-着色树的前提条件是:网络拓扑的节点度数需至少大于 3,即网络链路和节点比值至少为 1.5.为了验证生成算法的正确性,随机生成符合条件的网络拓扑如图 3(a)所示,共包含 8 个节点,14 条链路,链路和节点比值为 1.75.对链路设定正方向并进行编号,图中箭头所示方向为标识的正方向.目的节点拟设定为节点 A,应用改进的果蝇优化算法进行 3-着色树求解时, $l = 14$,Popsiz = 20, $T = 10$.

采用 2.3 节中的算法步骤求解,得到果蝇最佳位置分别如下:

$$X_{\text{best}} = 00000000000000011001110101000;$$

$$Y_{\text{best}} = 0000101010010000100000000011;$$

$$Z_{\text{best}} = 0100010000001000010001010100.$$

还原字符串在网络中的位置,并进行着色树分配后如图 3(b)、(c)、(d)所示.

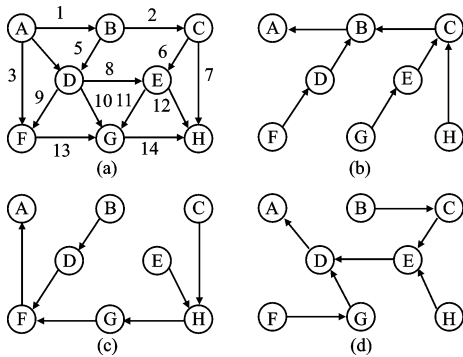


图3 简单网络拓扑

4.2 恢复技术有效性验证

为验证本文恢复技术的性能,将本文方法、文献[8]中优化的 MRC 方法、文献[10]中路径扩充着色树方法、文献[11]中 DFS 着色树方法等 4 种方案进

行比较,顺序编号为 1、2、3、4,比较不同方案业务恢复能力和恢复路径长度的性能.

业务恢复能力用故障恢复率来表征,故障恢复率定义为恢复业务流量与总受损业务流量的比值.分别对骨干网络 Germany(含有 17 个节点,25 条链路,链路和节点比值为 1.47)及 AT&T(含有 22 个节点,38 条链路,链路和节点比值为 1.72)拓扑设置单故障、双故障进行恢复,不同方案业务恢复能力如图 4 所示.

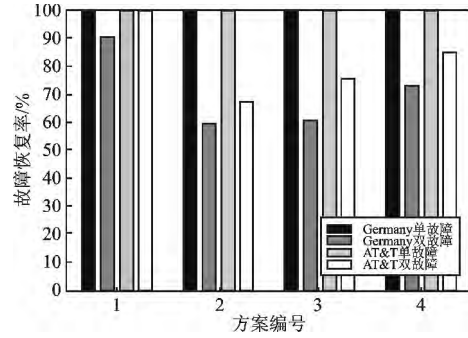


图4 业务恢复能力对比

由图 4 可知,本文方案可以保证网络单链路故障恢复,对于 Germany 网络由于节点度数不都大于 3,生成的着色树存在部分链路相交的情况,因此双链路故障覆盖率不能达到 100%,但是对于 AT&T 网络节点度数至少为 3,可以生成链路不相关的 3-着色树,对网络双链路故障的覆盖率达到 100%.与文献[10-11]相比,本文采用果蝇优化算法生成 3-着色树有助于提高网络业务恢复能力.

恢复路径长度用随机设置的链路故障时重路由路径长度来表征,实验中在 AT&T 网络随机设置 6 种情况的单链路故障和 $C_6^2 = 15$ 种情况的双链路故障.假定每条链路长度均为 1,用 P^1 、 P^2 表示网络单故障、双故障时从源节点 s 到目的节点 d 总路径长度,计算公式如式(16)、式(17)所示.

$$P^1 = \sum_{l \in s-t} x_l + \sum_{l \in t-d} x_l, x_l \in \{0,1\} \quad (16)$$

$$P^2 = \sum_{l \in s-t} x_l + \sum_{l \in t-t'} x_l + \sum_{l \in t'-d} x_l, x_l \in \{0,1\} \quad (17)$$

式中, t, t' 为故障链路的起始节点, x_l 为二值函数,当链路 l 包含在路由路径之内时为 1,否则为 0.不同方案恢复路径长度如图 5 和图 6 所示.

分析图 5 和图 6 可知,与文献[8]中的优化 MRC 方案相比,本文方案在单故障恢复时路径更优,原因在于本文方案在生成的 3-着色树中优先选择路径最短的着色树进行转发,而 MRC 目标是用

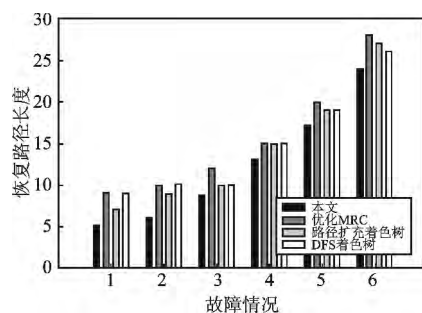


图5 AT&T 单链路故障恢复路径长度对比

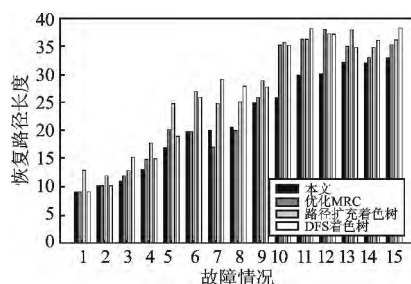


图6 AT&T 双链路故障恢复路径长度对比

较少的备份拓扑子层容忍较多的多故障。在双链路故障恢复时,本文方案与文献[8]中的方案相比优势降低,但是与文献[10-11]中的方案相比优势明显,可见用果蝇优化算法生成的3-着色树具有较优的故障恢复路径。

5 结束语

本文基于着色树扩展提出利用3-着色树技术实现IP网络双链路故障恢复方法,通过分析数据包头识别位和颜色标识信息切换故障流量,并采用改进的果蝇优化算法进行着色树生成。结合3-着色树特点,将果蝇优化算法进行三维扩展,并引入被动更新机制,避免算法陷入局部最优。通过与多故障恢复算法的对比分析,可知该方法具有良好的故障恢复能力,在单故障和双故障情况下提高故障覆盖率,且恢复路径较优。

参考文献:

- [1] Markopoulou A, Iannaccone G. Characterization of failures in an operational IP backbone[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(4): 749-762.
- [2] Xu Mingwei, Li Qing, Pan Lingtao, et al. Minimum protection cost tree: a tunnel-based IP fast reroute scheme [J]. Computer Communications, 2012, 35(17):2082-2092.
- [3] Hong Z, Nelakuditi S, Yu Y, et al. Failure inferen-

cing based fast rerouting for handling transient link and node failures[C]// Proc of IEEE INFOCOM, USA, Miami, 2005:2859-2863.

- [4] Xiaowei Y, David W. Source selectable path diversity via routing deflections[C]// Proceedings of the ACM SIGCOMM 2006. Pisa, ACM Press, 2006:159-170.
- [5] Cicic T, Kvalbein A, Hansena F, et al. Resilient routing layers and p-cycles tradeoffs in network fault tolerance[C]// High Performance Switching and Routing, HRSR 2005. Hong Kong, IEEE Press, 2005: 278-282.
- [6] Kvalbein A, Hansen A F, Cicic T, et al. Multiple routing configurations for fast IP network recovery [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(2): 473-485.
- [7] Li Q, Xu M, Wu J, et al. A unified approach to routing protection in IP networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2012, 9(3): 306-319.
- [8] 陈锋龙,孟相如,梁霄,等. 基于免疫原理的多拓扑路由生成算法[J]. 计算机科学,2014,41(1):212-216.
- [9] Srinivasan R, Mithun Harkara, Marwan Kunz. Linear time distributed construction of colored trees for disjoint multiple routing[J]. Computer Networks, 2007, 51(10):2854-2866.
- [10] Jayavelu G, Ramasubramanian S, Younis O. Maintaining colored trees for disjoint multipath routing under node failures[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009,17(1):346-359.
- [11] Jiuqi Han, Peng Wang, Xin Yang. Tuning of PID controller based on fruit fly optimization algorithm[C]// International Conference on Mechatronics and Automation, China, Chengdu, 2012(8):5-8.
- [12] 韩俊英,刘成忠. 基于细菌趋化的果蝇优化算法[J]. 计算机应用,2013,33(4):964-966.
- [13] 刘志雄,王雅芳,张煜. 多种群果蝇优化算法求解自动化仓库拣选作业调度问题[J]. 武汉理工大学学报, 2014,36(3):71-77.

作者简介:

赵甜甜 女,(1990-),硕士研究生.研究方向为网络抗毁性. E-mail:15991276145@163.com

孟相如 男,(1963-),教授,博士生导师.研究方向为宽带通信网络技术.

庄绪春 男,(1980-),讲师.研究方向为宽带通信网络技术.

赵志远 男,(1989-),博士研究生.研究方向为网络可生存性.