

一种用于光网络故障恢复的网络分割策略

贺辉 范戈

(上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室 上海 200030)

摘要: 网络规模的增大和复杂程度的提高给现有的集中式故障恢复策略的实施带来了困难。本文提出了一种分布式子网分割策略, 这种方法可以将大型光网络分割成若干个具有中心节点的环形子网, 进而在每个子网中实施分布式管理和故障恢复。文中给出了具体的网络分割过程, 并给出了相应的子网恢复策略。最后通过一个实际的网络对这种网络分割策略进行了测试。实验结果验证了此策略的可行性和实用性。

关键词: 分布式恢复, 网络分割, 网络恢复

中图分类号: TN915 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2006)02-0286-04

A Network Partition Scheme for Restoration in Optical Networks

He Hui Fan Ge

(Nat. Lab on Local Fiber-Optical Comm. Networks & Advanced Optical Comm. System,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract Current centralized restoration schemes are bad match for the increasing of the scale and complexity of networks. A novel distributed network partition scheme is proposed in this paper. A large-scale network can be partitioned into several annular sub-networks with nuclear nodes in this scheme. In each sub-network, distributed management and distributed restoration is adopted. The detailed process of partition is provided and the relevant distributed restoration scheme is given. Finally, this scheme has been implemented through computer simulation, and it was tested on practical optical networks. The simulation results show that this scheme is practicable and effectual.

Key words Distributed restoration, Network partition, Network restoration

1 引言

网络业务的快速增长促使光网络技术分割快速发展, 同时随着各种新的交换技术和传输技术的引入, 光网络的规模和复杂性也在日益增大, 这给相应的光网络生存性技术提出了更高的要求。光网络的生存性一直是网络技术研究的热点之一, 网络生存性技术与网络自身的拓扑结构是密切相关的, 由于以往光网络规模较小, 相关的光网络生存性技术大多基于集中式的控制策略, 由主控中心对整个网络进行统一管理。光网络向更大规模发展的必然趋势, 使得集中式的生存性技术有些力不从心。分布式故障恢复技术针对故障的局部性, 在局部范围内实施网络资源的优化调配, 能实现快速的故障诊断和恢复, 从而成为大型复杂光网络生存性的主流技术^[1-3]。

在大型复杂网络中实施分布式恢复主要有两方面的工作: 一是利用光网络的拓扑关系将大型光网络分割成为便于分布式恢复的子网。二是在子网内或是子网间实施合理的故

障诊断和恢复算法^[4]。本文提出了一种新型的网络分割和子网恢复算法, 它将整个光网络分割成为一个个具有中心节点的子网, 如图1和图2所示, 各个子网可以通过子网内节点之间的信息交互来实现自主控制, 从而可以在子网内实现网络资源的调配和故障路由的恢复。很显然, 子网的分割是实现此类恢复策略的前提和基础, 在子网中可以灵活采用多种现有的恢复算法, 所以本文讨论的侧重点在于子网的分割算法。

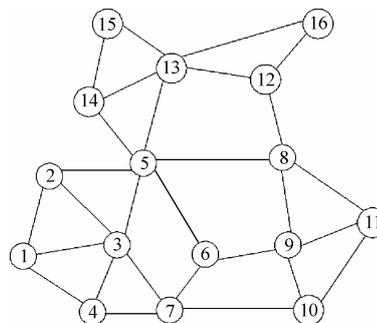


图1 示例网络

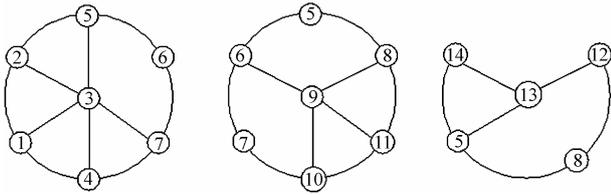


图2 示例网络的3个子网

2 网络分割方法

2.1 网络拓扑预处理

子网的连通性是子网实现自身故障恢复的一个根本条件。对于任何一种链路或是节点故障的恢复策略，它的工作路由必然会与故障恢复后的路由能构成一个闭合的环路，所以网络分割时，要尽量保证每个子网内的任意两个节点之间存在一条闭合的环路，这也就要求每一个子网的边连通度不能小于2。为了使本文中提出的方法能适用于各种网络，在网络分割之前需要对所研究的网络拓扑进行预处理，具体内容如下：

(1) 消除度为1的节点，即悬挂顶点，因为这种节点只能采用100%备份保护策略。

(2) 去除单边割集，即只有一条边的割集。因为这条单边也只能采用100%备份保护策略，去除的方法是将此单边及其两个相邻节点合并为一个新节点。

(3) 去除度为2的节点，用边将此类节点的两个相邻节点进行直连。因为要修复度为2的节点及其相连链路的故障，无论采用何种恢复路由都必须经由两个相邻节点，所以在拓扑分割时可以将度为2的节点及其相连链路简化为一条边，两个相邻节点记录有原网络的连接关系，若原相邻节点之间已有边相连，则处理后，此相邻节点之间相连的边为2条，这2条边在网络划分算法实施中被当成是一条边处理。

经过以上3种预处理，最终可以使所研究网络的拓扑成为一个边连通度是3的图。预处理的目的是保证每个子网的拓扑都是一个边连通度为2的图，即经过子网内任意两节点间都存在一个环路^[5]。下文中所研究的被分割的网络都是指经过预处理后的网络。

图1中的示例网络经过预处理，取消了原有的节点15和节点16，并在节点13与节点12、14之间分别增加了一条链路。

2.2 子网外环的生成算法

本文中，子网主要由中心节点和子网外环构成，如图2所示。子网根据外环是否闭合分为环形子网和扇形子网两种，图2中的前两个子网为环形子网，第3个子网就是扇形子网。对于本文中的任意一个子网而言，其中心节点确定之后，其子网外环是唯一的，所以子网划分的过程，其实也是

寻找中心节点的过程，中心节点根据子网的种类也分为环形子网中心节点和扇形子网中心节点。因此，在子网划分之前，应该首先解决子网外环的生成问题。

对于网络 G 中的任意一个节点 n ，其相邻节点的集合为 $S(n)$ ，其子网外环 $R(n)$ 的计算流程为

(1) 从 G 中去除 n ， $R = \emptyset$ ，任取一个节点 s_1 ， $s_1 \in S$ ， $t = s_1$ ， $R = R \cup t$ ， $S = S - s_1$ 。也就是将 s_1 作为转入节点 t 放入 R ，并在 S 中去除节点 s_1 。

(2) 将节点 t 和 S 中剩余的所有节点利用Dijkstra算法^[5]求最短路径(本文假设所研究网络的每条链路距离相同，且不考虑其它代价)，选出 S 中距离 t 最近的节点 s_s (最短距离相同时，取序号最小的一个节点)作为新的转入节点， $t = s_s$ ， $R = R \cup t$ ， $S = S - s_s$ 。

(3) 重复第2步，直至 $S = \emptyset$ ，这样 R 中的所有节点按顺序组成一条轨迹 $R_1(R_{11}, R_{12}, \dots, R_{1n})$ ，去除 R_1 中所有的边，再利用Dijkstra算法求 R_{11} 和 R_{1n} 之间的最短路径轨迹 R_2 ，如果 R_2 无解(即 R_{11} 和 R_{1n} 之间不连通)或是 R_2 中的元素个数大于 R_1 中的元素个数，则认为节点 n 没有合适的外环封闭回路，也就是此节点 n 只能作为一个扇形子网的中心节点， R_1 就是相应的扇形子网外环 $R_f(n)$ 。反之，若 R_2 有解且 R_2 中的元素个数不大于 R_1 中的元素个数，则 R_1 和 R_2 正好组成了节点 n 的外环封闭回路，也就是环形子网外环 $R_r(n)$ 。

2.3 子网划分算法

网络分割最理想的状况，是划分得到的每个子网都是环形子网，因为环形子网具有相对丰富的恢复资源和相对灵活的恢复策略，但在实际划分时，大多只能得到一部分环形子网，而另一部分则是扇形子网。为此，本文的分割算法在设计时，先尽可能的寻找环形子网，然后在剩余网络中划分扇形子网。具体步骤如下：

(1) 任意选取所研究的网络 G 中的一个节点作为根节点，利用广度优先遍历算法^[6](Breadth First Search, BFS)来构建 G 的BFS生成树。比如，选择图1中的示例网络的节点1为根节点，则示例网络相应的BFS生成树如图3所示。

(2) 利用2.2节中的判断方法，在图 G 中找到一个环形子网的中心节点 N_c ，搜索的顺序为从父节点至子节点，从

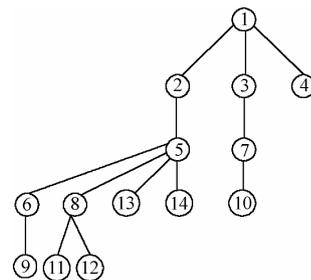


图3 示例网络的BFS生成树

左节点至右节点。这样， N_r 和 $R_r(N_r)$ 以及两者之间的链路就构成了一个环形子网。从 BFS 生成树中去掉 N_r 和树中所包括的 $R_r(N_r)$ 中的节点。

(3) 重复第 2 步，直至搜索完 BFS 树，至此，我们就得到了网络 G 中所有的环形子网。

(4) 在网络 G 中去掉所有完全使用节点。完全使用节点是指此节点的每一条相邻链路至少被一个环形子网使用，这样就是得到一个剩余网络。

(5) 在剩余网络中选择连接节点数目最多的一个节点作为一个扇形节点的中心节点 N_f ，这样 N_f 和 $R_f(N_f)$ 以及两者之间的链路就构成了一个扇形子网。

(6) 重复第 5 步，直至剩余网络为空。因为经过预处理的网络 G 的拓扑是一个连通度为 3 的图，这就保证了本文的分割算法可以将整个网络准确地分割成为若干个环形子网和若干个扇形子网，至此，整个网络分割完成。

进一步结合示例网络对子网划分算法说明如下。通过对图 3 中的示例网络的 BFS 生成树进行搜索可以得到示例网络中的所有环形子网的中心节点的集合 {3, 9}，然后在剩余网络中搜索出所有的扇形子网的中心节点的集合 {13}，相应的环形子网和扇形子网如图 2 所示。

2.4 子网故障恢复策略

每个子网内采用了外环链路和径向链路相互提供备用资源的故障恢复策略。如图 2 所示的子网中，如果工作通路 1-2-5 之间的链路或是节点出现故障，则可以通过 1-3-5 进行恢复，若 5-3-4 之间出现故障，则可以通过 5-2-1-4 恢复。在每个子网中，径向链路是子网独立拥有的，外环链路可能是子网独立拥有，也可能是两个子网共享的。如果子网独立拥有的径向链路和外环链路出现故障，则所属子网直接可以启动恢复过程。对于两个子网共享的外环链路，它的端节点可以在线实时地记录两个子网的信息，端节点可以根据两个相关子网的资源状况设置优先级，保证两个子网共享的外环链路出现故障时，能马上决定由那个子网优先启动恢复。

3 实验仿真

本文提出的网络分割算法已使用计算机编程实现，并选用了文献[7]中所采用的实验网络作为测试网络 NET1，如图 4 所示。仿真结果证明了此方法的可行性和有效性。图 4 是一个 28 节点的网络，经过预处理后变为一个 22 节点的网络如图 5 所示，相应的 BFS 生成树如图 6 所示。

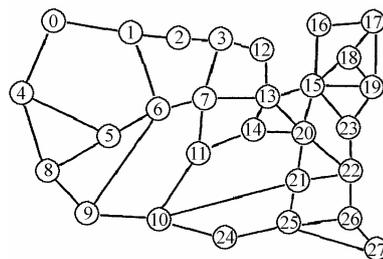


图 4 实验网络 NET1

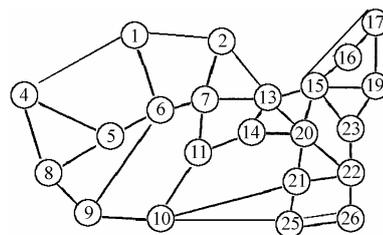


图 5 经过预处理后的实验网络

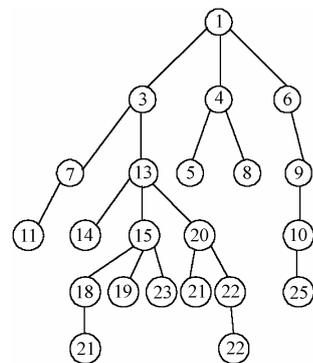


图 6 实验网络的 BFS 生成树

对实验网络的 BFS 生成树进行搜索，可得到实验网络的环形子网和扇形子网的中心节点集合，从而可以得到实验网络分割出的各个子网，如表 1 所示。

表 1 实验网络分割后得到的各个子网

子网类型	轴节点	子网外环节点序列
环形子网	5	(4, 8, 9, 6, 1, 4)
	7	(3, 13, 14, 11, 10, 9, 6, 1, 3)
	18	(15, 17, 19, 15)
	21	(10, 25, 26, 22, 20, 14, 11, 10)
扇形子网	15	(13, 20, 22, 23, 19)

由测试结果可以看出，本文所提出的子网分割策略能够有效地分割大型光网络，进而采用分布式智能恢复策略，可以灵活方便地解决大型复杂网络所面临的生存性问题，且在此分割算法基础之上，各子网可以同时并行处理多点故障，为故障恢复赢得了时间。

4 结束语

本文提出了一种便于采用分布式智能恢复技术来解决大型复杂光网络故障恢复的网络分割方法。仿真测试结果表明,该算法能够将给定的大型光网络成功地分割为一个个具有中心节点的子网,且各子网的边连通度都不少于2,从而保证了故障恢复的可操作性。同时,在这种子网拓扑结构的基础上,各个子网内部可以采用外环链路与径向链路相互提供备用资源的故障恢复策略,从而实现了快速故障恢复的有效性。本文意在给出了一种新的分布式故障恢复模式,着重描述了子网分割算法,有关子网内和子网间灵活的智能恢复算法值得进一步研究。

参 考 文 献

- [1] St Arnaud B, Jing W, Kalali B. Customer-controlled and managed optical networks [J]. *Lightwave Technology*, 2003, 21(11): 2804 – 2810.
- [2] Kodialam M, Lakshman T V. Dynamic routing of restorable bandwidth guaranteed tunnels using aggregated network resource usage information [J]. *IEEE Trans. on Networking*, 2003, 11(3): 399 – 410.
- [3] Guangzhi L, Dongmei W, Kalmanc K C, Doverspike R. Efficient distributed restoration path selection for shared mesh restoration [J]. *IEEE Trans. on Networking*, 2003, 11(5): 2761 – 771.
- [4] Bi Tian Shu, Ni Yi Xin, Shen C M, *et al.*. An efficient graph partition method for fault section estimation in large-scale power network [C]. Proc. of the IEEE Conf. on Power Engineering Society Transmission and Distribution, New York, US, Jan 2002: 1350 – 1353.
- [5] 徐俊明. 图论及其应用 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1998年1月: 56 – 120.
- [6] [美]Russell L.Shackelford 著, 章小莉, 孙厚琴, 汪永好等译. 计算与算法导论 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003年11月: 62 – 92.
- [7] Kim Sun-il, Lumetta S S. Restoration of all-optical mesh networks with path based flooding [J]. *Lightwave Technology*, 2003, 21(11): 2605 – 2616.

贺辉: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向为光网络的生存性和光接入网。

范戈: 男, 1946年生, 教授, 博士生导师, 目前主要的研究方向为数字光纤传输系统和光接入网系统。