

采用网络分割的OBS网络故障监测机制

王汝言, 刘兰英, 吴大鹏

(重庆邮电大学光互联网及无线信息网络研究中心 重庆 南岸区 400065)

【摘要】提出了一种基于网络分割策略的圈覆盖光突发交换网络的故障监测机制,采用网络分割策略,大型的光突发交换网络被分割成便于故障管理的带有中心节点的环形子网或扇形子网,在每个子网内分别执行圈覆盖算法进行故障监测。计算和统计结果表明,该故障监测机制对于节点平均连通度大于3的网络具备网络开销小、故障定位率低等特点。

关键词 故障监测; 故障定位; 网络分割; 光突发交换

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.01.007

Fault Detection Mechanism Based on Network Partition for Optical Burst Switching Networks

WANG Ru-yan, LIU Lan-ying, and WU Da-peng

(Special Research Centre for Optical Internet and Wireless Information Networks,

Chongqing University of Posts and Telecommunications of China Nan'an Chongqing 400065)

Abstract The fault detection mechanism based on network partition strategy is proposed in this paper. Firstly, the large-scale optical burst switching (OBS) network is partitioned into several subnet by network partition method, thus the fault monitoring can be achieved by the core nodes in each subnet respectively. Furthermore, with the probe module assigned in each subnet, the network fault can be detected by our cycle cover method. Numerical results show that the fault localization ratio can be improved significantly by our fault detection mechanism for the case of average node degree higher than 3.0; at the same time, the monitor cost can be reduced effectively.

Key words fault detection; fault location; network partition; optical burst switching

光突发交换(OBS)结合了粗粒度的光电路交换OCS(optical circuit switching)和精细粒度的光分组交换OPS(optical packet switching)的优点,解决了因电子瓶颈而导致的带宽扩展困难的问题,被认为是全光网络快速有效的交换技术之一,已经成为下一代光网络的研究热点^[1]。然而,由于OBS的复杂性,故障监测成为OBS网络的难点之一。

在OBS网状网中,采用逐跳探测的故障监测机制监测成本过高。文献[2]提出的基于探测圈覆盖的故障监测机制能有效地降低监测成本,它利用启发式深度优先搜索(heuristic depth first searching, HDFS)、最短路欧拉匹配(shortest path eulerian matching, SPEM)和启发式生成树圈覆盖(heuristic spanning-tree, HST)3种典型的圈发现算法搜索OBS网状网的圈覆盖,为每个圈配置一个故障探测模块。3个算法中HST算法比其他算法有相对高的故障定位率,但是它的监测成本和网络资源开销要高于其他算

法^[3]。为实现在保证较低故障定位率的同时进一步减小网络开销和监测成本,本文提出了基于网络分割策略^[4]的圈覆盖故障监测与定位机制。

1 基于网络分割的圈发现算法

圈覆盖发现算法指把网络分解为圈的集合,使得网络中的所有节点和所有链路至少被集合中的一个圈所覆盖,在每个圈配置一套探测模块等监测设备^[2],本文定义这些圈为“探测圈”。

将网络 G 按照某种规则分为若干部分,每部分都可以作为网络 G 的一个子网。

基于网络分割策略的探测圈算法将网络分割成为带有中心节点的环形子网或扇形子网,各个子网利用圈覆盖算法寻找相应的探测圈。

1.1 子网划分算法

由于环形拓扑网络的故障监测定位相对容易,并便于重新建立路由,因此,网络分割最优结果经

收稿日期: 2009-07-31; 修回日期: 2010-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(60972069, 61071117, 2008BB2414)

作者简介: 王汝言(1969-),男,博士,教授,主要从事全光网络理论与技术、下一代光网络故障管理机制、多媒体信息处理等方面的研究。

过划分所得到的子网均为环形子网。但在实际划分时, 网络通常被分割为一部分环形子网和一部分扇形子网。所以, 本文在设计网络分割算法时, 先尽可能地寻找环形子网, 然后在剩余网络中再进一步划分扇形子网^[4]。

子网由中心节点和外环构成。在网络分割算法中, 判断节点 N 是否为环形子网的中心节点, 并生成其相应的外环 $R(N)$ 的计算步骤如下。

令网络 G 中任意节点 N 的相邻节点集合为 S (节点 N 的连通度不小于3)。

1) 从 G 中去除 N , $R = \emptyset$ (R 是遍历集合 S 中的所有节点轨迹上的节点集合), 取集合 S 中的第一个节点 s_1 , 将 s_1 作为转入节点 p_i 放入 R , 并在 S 中去除节点 s_1 。

2) 将节点 p_i 和 S 中剩余的所有节点利用 Dijkstra 算法计算最短路径 (假设只考虑跳数, 不计其他代价), 选出集合 S 中距离 p_i 最小跳数的节点 s_i (最短距离相同时, 取节点编号最小的一个节点) 作为新的转入节点。将 (p_i, s_i) 之间的所有节点放入到集合 R 中, 并从集合 S 中去除 s_i , 并将 s_i 作为转入节点 p_i 放入 R 。

3) 重复步骤2), 直至 $S = \emptyset$ 。将集合 R 中的所有节点按顺序 $(R_{11}, R_{12}, \dots, R_{1n})$ 形成一条轨迹 R_1 。再利用 Dijkstra 算法计算 R_{11} 和 R_{1n} 之间的 (一条与 R_1 完全不同) 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, 也就是该节点 N 只能作为一个扇形子网的中心节点, R_1 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 正好组成节点 N 的外环封闭回路, 也就是环形子网外环 $R_r(N)$ 。

在网络 G 中划分子网的步骤如下:

1) 将网络 G 中连通度不小于3的节点放到集合 Q 中。利用上面所述的节点 N 为环形子网的中心节点的判断条件和其相应的外环 $R_r(N)$ 的计算流程的方法, 按照集合 Q 中节点编号从小到大的顺序进行搜索, 找到网络 G 中第一个环形子网的中心节点 N_r 和其相应的外环 $R_r(N_r)$ 。因此, N_r 和 $R_r(N_r)$ 以及两者之间的链路就构成第一个环形子网。从集合 Q 中去除 N_r 和 $R_r(N_r)$ 中所包括的集合 Q 中的节点。

2) 重复步骤1), 直至搜索完集合 Q , 得到网络 G 中所有的环形子网。

3) 在网络 G 中去除所有完全使用节点 (完全使用节点指该节点的每一条相邻链路至少被一个环形子网使用), 得到的一个剩余网络。

4) 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子网的中心节点 N_f , N_f 和 $R_f(N_f)$ 以及两者之间的链路就构成一个扇形子网。

5) 重复步骤4), 直至剩余网络为空。

下面结合 CERNET 网络对子网划分算法进行说明, 网络拓扑如图1所示。

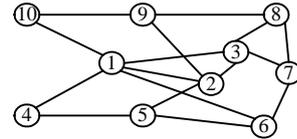


图1 CERNET

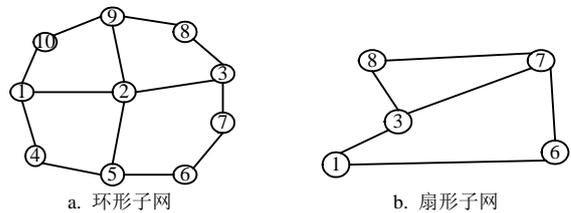


图2 子网

利用子网划分算法依次对图中节点度数不小于3的集合 $Q = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ 中的节点进行判断, 图中的所有环形子网的中心节点的集合为 $\{2\}$, 扇形的中心节点为 $\{3\}$, 相应的环形子网和扇形子网如图2所示。

1.2 子网内圈覆盖发现算法

对于一个无桥接的、简单的连通图 $G(V, E)$, 一定存在一棵生成树 T 。对于任何一条链路 $e \notin T$ (e 被称为弦), 如果 e 的两个端点是 n_1 和 n_2 , $n_1, n_2 \in T$, 则一定存在一条路径 $p \in T$ 连接 n_1, n_2 。从而, 链路 e 和路径 p 形成一个圈。可见, 该圈是由链路 e 产生的。每一个这样的弦会形成一个唯一的圈, 本文引用文献[5]中的圈覆盖存在引理: 至少存在一个圈覆盖一个无桥接的连通图 G 。

文献[6]提出并证明了: 对于一个有一棵给定的生成树的无桥接的、简单的连通图 G , 由所有弦产生的圈构成连通图 G 的覆盖圈。

在找到连通图 $G(V, E)$ 中所有的环形子网和扇形子网后, 探测圈覆盖发现算法^[7]的步骤如下:

1) 初始化生成树 $T = \text{null}$, 以每个子网的中心节点为根, 添加与根节点关联的所有边, 在这个阶段添加的新顶点成为生成树 T 中第一层上的顶点, 并将其按节点编号从小到大从左至右排序。

2) 从左至右访问第一层上的每一个顶点, 只要不产生回路, 就添加与该顶点相关联的每条边, 产生树中第二层上的顶点。

3) 遵循同样的原则继续下去, 经有限的步骤遍历每个子网的所有节点, 产生每个子网生成树 T 。

4) 在 T 上, 为每条弦链路构建圈, 形成图 $G(V, E)$ 的圈覆盖。

2 故障监测性能的衡量指标

对于一个有限的无向连通图 $G(V, E)$, V 为节点集合, E 为链路集合。其中, $V(G)$ 表示图 $G(V, E)$ 中节点的总数; $E(G)$ 表示图 $G(V, E)$ 中链路的总数。下面介绍衡量圈覆盖发现算法的主要指标^[9-12]。

$C = \{C_1, C_2, \dots, C_M\}$ 表示图 $G(V, E)$ 中的圈集合, 其中 M 为 C 中元素的个数。

本文定义 $L(C_i)$ 表示圈 C_i 包含的边数, 它等于探测突发 PB (probe burst) 以跳数计算的生命周期。为了确保 PB 不与数据突发 DB (data burst) 竞争信道, 圈的总长度应尽可能的短。圈集合 C 的总长度表示

$$L(C) = \sum_{i=1}^M L(C_i)。$$

$\max_length(C) = \max\{L(C_i) | i=1, 2, \dots, M\}$ 表示圈集合 C 中所有圈的最大长度。

$cost(p) = M/V(G)$ 为当发现一个圈覆盖时, 图 $G(V, E)$ 中平均每个节点需要配置的监测设备的数量, 减少 $cost(p)$ 是优化网络故障监测方案^[3]的主要目标之一。

在每条链路中, 一些被 M 个圈预留的波长信道不能用于业务传输, 因此成为一种额外的开销。被圈预留的波长信道数目等于一条链路被圈覆盖的次数。 $T(e_i)$ 表示链路 e_i 被覆盖的次数。一条链路被覆盖的次数越多, 被预留的波长信道就越多, 开销就越大。一条链路被覆盖的平均次数为:

$$avg_T(E) = \sum_{i=1}^{E(G)} T(e_i) / E(G) = L(C) / E(G)$$

为了更好地分析基于 M 个圈的相对开销, 本文定义每条链路上的平均波长开销为:

$$WOH_{avg} = avg_T(E) / W$$

式中, W 为每条链路上可用的波长数目。最小化每条链路上的平均波长开销即最小化 M 个圈的总长度 $L(C)$ 是本文的目标之一。

在图 $G(V, E)$ 中, 将链路 $e_i \in E (i=1, 2, \dots, E(G))$ 和圈 C_j 两者的关系定义为一个二进制编码 a_{ij} 。如果 e_i 出现在圈 C_j 中, $a_{ij} = 1$; 否则 $a_{ij} = 0$ 。由每一条链

路 e_i 对应的所有圈, 得到相关联的编码 $a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{iM})$ 。对于发生故障时所触发的告警 m_j 与圈 C_j 也可以得到以下关系: 如果圈 C_j 产生告警, $m_j = 1$; 否则 $m_j = 0$ 。因此所有圈的告警编码可表示为 $m = (m_1, m_2, \dots, m_M)$ 。

本文预先列举出每条链路 e_i 可能的告警编码 m , 建立相应的故障告警矩阵 F (F 的行数为图 $G(V, E)$ 的链路总数)。一旦接收到圈中的告警, 告警编码 m 就随即产生。本文将告警编码 m 和故障告警矩阵 F 按照逐行逐位的方式进行比较, 如果 m 和 F 中的某行(某条链路)的故障告警代码相同, 则可以判断出该链路发生了故障。因为一些链路的故障告警代码不是唯一的, 为了定量测量故障定位的百分度, 本文引入故障定位率^[6]概念:

$$I = \frac{|F|}{|U|}$$

式中, $|F|$ 为矩阵 F 的行数; $|U|$ 为矩阵 U 的行数, U 为合并矩阵 F 中相同故障代码链路后的矩阵。最理想的情况是达到完全精确定位, 即 $I = 1$ 。最小化故障定位的程度, 使它接近于 1 是本文的主要目标之一。

文献[8]提到在一个给定的拓扑中, 对于在连通度为 2 的路径上的链路, 利用圈覆盖故障监测与定位算法是无法达到完全定位的。为了达到完全定位, 必须增加额外的监视器。为了衡量增加监视器后的损耗减少率, 本文定义监视器损耗减少率为 $D = (E(G) - (M + M')) / E(G)$, 其中 M 为原始监视器的数目, M' 为达到完全定位需要的额外监视器数目。

3 算法的性能分析

本文采用如图 3 所示的 4 种网络拓扑 (CERNET、NSFNET、BELLCORE、SMALLNET), 根据第 2 节的衡量指标, 分别对 4 种圈覆盖发现算法进行性能比较。本文定义基于网络分割策略的探测圈算法为 NPS (network partition strategy), 其结果如表 1~表 5 所示。

从表 1 中可以看出, NPS 算法和 HST 算法在监测成本方面要优于其他两种算法, 但是 NPS 算法比 HST 算法节约了监测成本。表 3 中给出了 4 种不同圈覆盖发现算法在 4 种典型拓扑中圈的最大长度。从表 2 中可以看出, NPS 算法在圈的最大长度方面优于其他 3 种算法, 但是在 4 种典型网络中, 4 种算法的 PB 跳数都在可接受范围内。

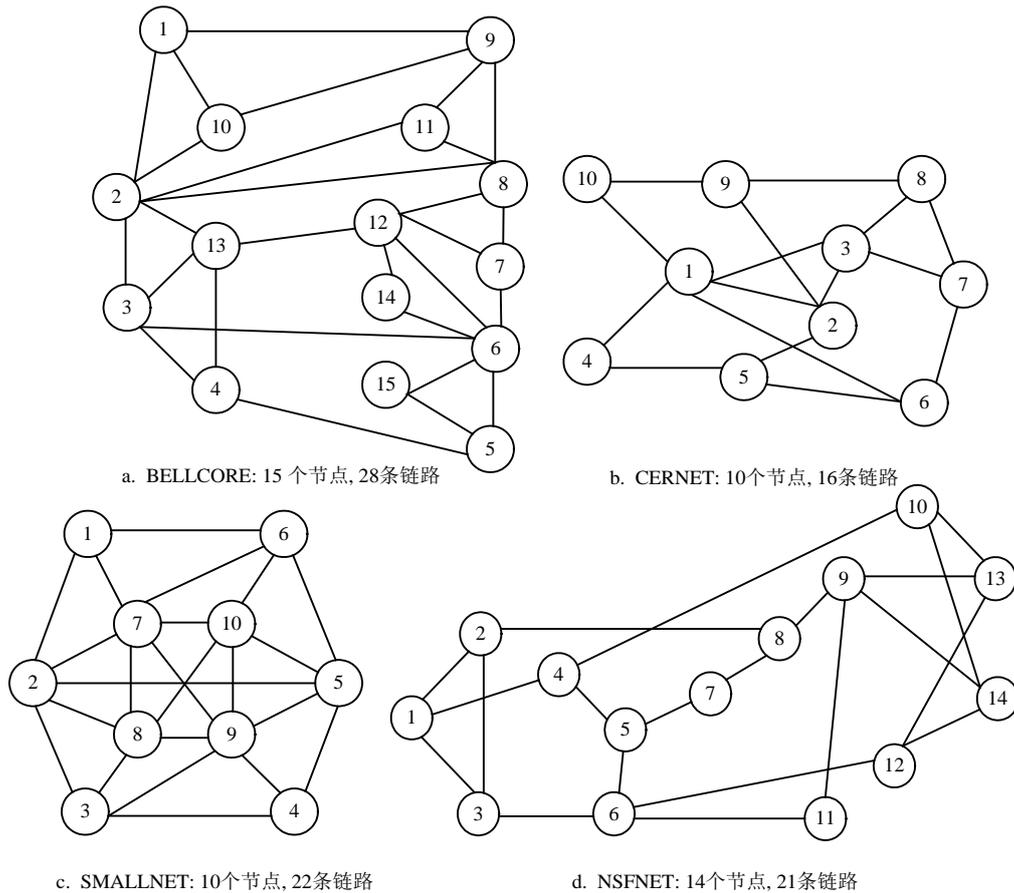


图3 典型的4种MESH网络拓扑

表1 圈覆盖发现算法在不同拓扑中的cost(p)

算法	CERNET	NSFNET	BELLCORE	SMALLNET
SPEM	0.5	0.287 5	0.533 3	0.4
HST	0.7	0.571 4	0.933 3	1.3
HDFS	0.4	0.357 1	0.333	0.8
NPS	0.6	0.428 6	0.933 3	1.2

表2 圈覆盖发现算法在不同拓扑中的max_length(C)

算法	CERNET	NSFNET	BELLCORE	SMALLNET
SPEM	6	11	9	4
HST	5	7	6	4
HDFS	7	7	11	7
NPS	5	7	5	4

表3 4种圈覆盖发现算法在不同拓扑中的WOH_{avg} %

算法	CERNET	NSFNET	BELLCORE	SMALLNET
SPEM	1.95	1.94	1.78	1.84
HST	2.55	2.97	3.06	3.05
HDFS	1.95	2.45	2.23	2.42
NPS	2.34	2.38	2.23	2.41

在表3中比较了4种不同圈覆盖发现算法在4种典型拓扑中圈覆盖的平均波长开销(本文取波长信道数目为64)。从表中可以看出NPS算法比HST算法的平均波长开销要低很多,可以有效地降低PB与DB之间的数据信道竞争。

表4 圈覆盖发现算法在不同拓扑中的D

算法	CERNET	NSFNET	BELLCORE	SMALLNET
SPEM	9.2	9.5	7.1	9.1
HST	43.75	52.4	42.9	40.9
HDFS	31.8	38.1	25	31.8
NPS	43.75	47.6	42.9	45.4

从表4中可以看出, NPS算法的监视器损耗减少率为42.9%~47.5%,对于节点平均连通度大于3的网络, NPS算法优于其他3种算法。从表5中可以看出, NPS算法和HST算法的故障定位率优于其他两种算法。虽然在网络CERNET和NSFNET中, NPS算法的故障定位率高于HST算法,然而在监测成本方面, NPS算法优于HST算法,平衡了监测成本和故障定位率。

表5 4种圈覆盖发现算法在不同拓扑中的I

算法	CERNET	NSFNET	BELLCORE	SMALLNET
SPEM	2.81	3.0	4.67	3.67
HST	1.15	1.105	1.077	1.0
HDFS	1.41	1.5	2.15	1.47
NPS	1.23	1.4	1.077	1.0

由表1~表5可以得出结论: 圈覆盖算法可以有

效地降低监测成本；圈覆盖发现算法对不同的网络拓扑有一定的选择性；对于节点平均连通度大于3的网络，相对于其他3种算法，NPS算法不仅有较低的故障定位率，且最长圈长度最小；NPS算法比HST算法，在保障较低故障定位率的同时，进一步降低了监测成本和平均波长开销。

4 结 论

提出了一种新的基于网络分割策略的探测圈覆盖的OBS网络的故障监测方案，在给定的4种典型网络拓扑中，从监测成本、平均波长开销、故障定位率等方面与其他3种圈覆盖算法进行了比较。仿真结果表明，本文的圈覆盖算法相对于HST圈算法，在保障相对低的故障定位率的同时能够进一步减少监测成本和平均波长开销。

参 考 文 献

- [1] 纪越峰, 王宏祥, 仇英辉, 等. 光突发交换网络[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.
JI Yue-feng, WANG Hong-xiang, CHOU ying-hui, et al. Optical burst swiching network[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005.
- [2] 王汝言, 常交法, 隆克平, 等. 基于圈覆盖的光突发交换网状网故障监测方案[J]. 北京邮电大学学报, 2007, 30(4): 111-115.
WANG R, CHANG J, et al. Fault detection mechanism based on probe cycle cover in meshed optical burst switching networks[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007, 30(4): 111-115.
- [3] ZENG H, HUANG C, VUKOVIC A. Spanning-tree based monitoring-cycle construction for fault detection and localization in mesh AONs[C]//IEEE International Conference on Communications. Seoul, Korea: IEEE, 2005: 1726-1730.
- [4] 贺辉, 范戈. 一种用于光网络故障恢复的网络分割策略[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(2): 286-289.
HE Hui, FAN Ge. A network partition scheme for restoration in optical networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(2): 286-289.
- [5] FAN G. Covering graphs by cycles[J]. DiscreteMathe, 1992, 5(4): 491-496.
- [6] ZENG H, HUANG C, VUKOVIC A. A novel fault detection and localization scheme for mesh all-optical networks based on monitoring-cycles[J]. Photonic Network Communications, 2006, 11(3), 277-286.
- [7] 殷剑宏, 吴开亚. 图论及其算法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005.
YIN Jian-hong, WU Kai-ya. Graph theory and its algorithm[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2005.
- [8] ZENG H, VUKOVIC A. The variant cycle-cover problem in fault detection and localization for mesh all-optical networks [J]. Photonic Network Communications, 2007, 14: 111-122.
- [9] ZENG H, HUANG C, VUKOVIC A, et al. Fault detection and path performance monitoring in meshed all-optical networks[C]//Proc of IEEE Globecom'04. Dallas, TX, USA: IEEE, 2004: 2014-2018.
- [10] WANG Ru-yan, CHANG Jiao-fa, LONG Ke-ping. A fault detection and location mechanism for optical burst switching networks[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2006, 17(12): 1477-1481.
- [11] WANG Jian-quan, GU Wan-yi. Failure location method based case database[J]. Acta Photonic Sinica, 2005, 34(12): 1858-1861.
- [12] Stanic S, Subramaniam S. Distributed hierarchical monitoring and alarm management in transparent optical networks[C]//IEEE International Conference on Communications. Beijing, China: IEEE, 2008: 5281-5285.

编辑 张俊