

# 一种适合多域 WDM 光网络的拓扑聚合算法

肖尚德, 朱娜, 陈祖平

(江苏大学计算机科学与通信工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 根据多域波分复用光网络的特点提出一种以波长为压缩参数的拓扑聚合算法。该算法根据原拓扑资源图构造边界节点的全连通拓扑, 在其基础上进一步压缩为非对称星型图。用随机产生的网络拓扑仿真表明, 算法能在很小的精度损失情况下有效地压缩信息。相对于全连通拓扑, 其压缩后的复杂度可降低到  $O(N)$ 。

**关键词:** 多域波分复用光网络; 拓扑聚合; 非对称星型; 压缩

## Topology Aggregation Algorithm Suitable for Multi-domain WDM Optical Network

XIAO Shang-de, ZHU Na, CHEN Zu-ping

(School of Computer Science and Telecommunications Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

**【Abstract】** A kind of topology aggregation algorithm suitable for multi-domain Wavelength Division Multiplex(WDM) optical network is proposed according to its characteristics. The algorithm constructs full-mesh topology with original topological graph. Full-mesh topology is furtherly compressed into asymmetric star. Simulation with randomly generated networks shows that the algorithm can effectively compress information with a little loss of accuracy. The complexity after compression can be lowed to  $O(N)$  compared with full-mesh topology.

**【Key words】** multi-domain Wavelength Division Multiplex(WDM) optical network; topology aggregation; asymmetric star; compression

### 1 概述

智能光网络(ASON)标准<sup>[1]</sup>建议把大规模网络分成由多个路由域组成的分层结构<sup>[2]</sup>。在这种网络结构中, 每个域的内部拓扑和状态参数被压缩后再被广播到其他域。由于网络设备的兼容性以及网络管理和安全性的需要, 一个子网向其他子网广播其内部拓扑信息时需要通过压缩来屏蔽一些细节信息。将本域的拓扑信息进行压缩的过程就是拓扑聚合<sup>[2]</sup>。经过拓扑聚合后, 扩散的信息量将会减少, 在一定程度上减轻了信令网的负担。但同时信息量的减少会使其精确度降低, 造成可能利用不准确的信息进行路由选择, 从而增加阻塞率。因此, 拓扑聚合算法的目标是在两者之间达到最好的折中。

目前的拓扑聚合算法<sup>[3]</sup>如对称点算法、生成树算法都是把限制型参数(带宽)或者叠加型参数(时延)作为链路属性和压缩参数, 而在多域波分复用(multi-domain Wavelength Division Multiplex, WDM)光网络中, 链路属性主要为波长, 它的状态只有空闲和被占用 2 种, 不像限制型参数和叠加型参数存在大小等关系。由于目前全波长转换器还不能使用, 波长路由存在波长连续性限制<sup>[4]</sup>, 根据这个特性, 波长属性既不是限制型也不是叠加型参数, 因此以上算法并不能直接运用到以波长作为链路属性的 WDM 光网络中。

### 2 多域 WDM 光网络的拓扑聚合算法

对算法做如下假设: 仅考虑链路资源, 即波长作为链路属性, 忽略其他属性, 因为在波分复用光网络中, 这些被忽略的参数对 QoS 的影响很小。每条链路上共有  $K$  个波长, 且节点均不具备波长转换能力。因此, 在选择可用波长时需满足波长连续性限制。分别用二进制 1 和 0 代表波长空闲和被占用。此外, 假设网络中建立的是双向光通道。

假设  $G(V, E, B, W)$  表示一个网络拓扑图( $V, E, B$  和  $W$  分别表示网络中节点、链路、边界节点集合和链路上的波长集及其使用情况)。  $V$  中节点数为  $M$ , 编号分别为  $1, 2, \dots, M$ ;  $B$  中节点数为  $N$ ;  $W$  中波长数为  $K$ , 编号分别为  $1, 2, \dots, K$ 。

#### 2.1 原始全连通图的构造

全连通图是一个由所有边界节点组成的拓扑图。在这个图中, 每个节点都与其他节点直接相连, 图中任何 2 个节点之间的链路属性值是根据实际网络中 2 个边界节点间所有链路的属性值按一定规则计算出来的。对于 WDM 光网络, 如果 2 个边界节点之间至少存在一条某个波长可用的路径, 则在构造全连通图时, 这 2 个边界节点链路上的波长值为 1, 否则为 0。以一个波长为例, 具体的构造规则如下:

假设  $M$  个节点组成的非连通图  $T=(V, \{\})$ 。图中每个顶点自成一个连通分量, 初始时共有  $M$  个连通分量, 编号分别为顶点本身编号  $1, 2, \dots, M$ , 然后通过添加连接顶点的边逐步合并非连通图。

(1) 从  $E$  中取一条链路, 在  $W$  中查看该链路当前波长的属性值, 如果为 1, 转下一步, 否则继续查看下一条链路。若所有链路已查看完, 转至(3)。

(2) 如果该链路依附的顶点所在的连通子图编号不相等, 则将 2 个连通子图合并为一个连通子图, 合并后的连通子图编号较小。否则, 忽略此边, 转至(1)。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60702056); 镇江市科技计划基金资助项目(SH2007070)

**作者简介:** 肖尚德(1984 -), 男, 硕士研究生, 主研方向: 智能光网络路由技术; 朱娜, 教授; 陈祖平, 硕士研究生

**收稿日期:** 2009-03-20 **E-mail:** ujs\_1984@126.com

(3)所有链路查看完后,  $T$  被分为  $L$  个连通子图( $1 \leq L \leq M$ )。然后构造边界节点组成的全连通图:对  $B$  中的每个节点, 分别判断其与  $B$  中其他  $N-1$  个节点是否在同一连通子图中, 即 2 个节点所在的连通子图编号是否相等。如果相等, 则这 2 个边界节点间存在一条当前波长可用的路径, 那么全连通拓扑图中这 2 个边界节点的链路属性值为 1, 否则为 0。

对  $W$  中的每个波长都按照以上规则逐个添加到正在构造的全连通图上。最终, 全连通图中的每条链路上都有  $K$  个波长。

## 2.2 非对称星型图的构造

对有  $N$  个边界节点的域, 其全连通图共有  $N(N-1)/2$  条链路, 如果将其作为压缩后的最终拓扑广播出去, 则需要广播的链路数为  $N(N-1)/2$  条, 复杂度为  $O(N^2)$ 。因此, 在其基础上进一步压缩。压缩规则如下:

(1)按编号从小到大的顺序从  $W$  中取一个波长, 如果所有波长都处理完毕, 则转(6)。

(2)对于边界节点集  $B$  中每个节点, 选取其到其他  $N-1$  个节点的链路属性值为 1 的数目最多的节点。如果存在多个这样的节点, 则保留这些节点, 假设这些节点的集合为  $D$ 。

(3)构造单个波长的星型图: 对集合  $D$  中的每个节点, 按照其与其他  $N-1$  个节点之间的链路属性值分别构造星型图: 假设  $D$  中的一个节点  $A$  到另外一个节点  $C$  的链路为  $A-C$ , 如果该链路当前波长值为 1, 那么  $C$  到虚拟核心节点的链路属性值为 1, 否则为 0。而  $A$  节点本身到虚拟核心节点的属性值为 1。

(4)将(3)中构造的每个星型图还原为全连通图(对比压缩后再还原的信息与未压缩前是否存在偏差)。还原规则为: 2 个节点的链路属性值为这 2 个节点到虚拟核心节点的属性值相与, 如果 2 个属性值都为 1, 则还原后 2 个节点之间的链路属性值为  $1 \& 1 = 1$ , 否则为 0。

(5)分别对比星型图还原后各个全连通图与原始全连通图之间各条链路上的当前波长值。如果存在一个星型图, 其还原后的全连通图中每条链路上的波长值都与还原前一致, 即无偏差, 则将该星型图作为当前波长的最终压缩结果, 保存, 其他还未进行偏差对比的全连通图也不需要再对比(因为选择的是还原后偏差尽可能小的星型图)。否则, 保存所有构造星型拓扑所选择的节点和有偏差的节点对。然后, 对下一个波长构造星型图, 即转(1)。

(6)构造  $K$  个波长的星型图: 根据(5)中所保存的节点和有偏差的节点对, 选择  $K$  个波长所产生的最小偏差节点对的那些星型图作为压缩标准。按波长编号, 把  $K$  个单个波长星型图(包括还原后无偏差的星型图)中每条链路上的波长值逐一添加到正在构造的  $K$  个波长星型图的相应链路上。最后, 构造的星型图中每条链路都有  $K$  个波长。

(7)构造非对称星型图<sup>[5]</sup>: 对(6)中产生的最少偏差节点对, 在星型图上添加连接这些节点对的旁路, 并把其链路属性设为原始全连通图上该节点对的链路属性值。

将以上构造的非对称星型图广播到其他域, 在把这个拓扑图还原为全连通图时, 如果某 2 个节点间有旁路直接相连, 那么以此旁路上的波长值作为还原后的链路属性值, 否则, 以这 2 个节点到虚拟核心节点的  $K$  个二进制波长值相与所得结果作为还原后的链路属性值。

## 2.3 实例

以NSFnet作为网络拓扑来描述算法步骤。假设每条链路

上的波长数目为 16, 编号为 1, 2, ..., 16。14 个节点分为 14 个连通子图, 编号分别为 1, 2, ..., 14。边界节点随机选取, 假设这里为 1, 3, 5, 7, 9。表 1 为网络运行某时刻的资源状态表。

表 1 资源状态表

链路	资源使用情况	链路	资源使用情况
1-2	1001100011111101	1-3	0000110111110100
1-4	0110111100000001	2-3	1010001101100010
2-5	0110010010001000	3-6	0101110001111101
4-7	1001100011100010	4-8	0110101100000001
5-9	1101110010111101	5-12	1101111011000001
6-7	0101011111010111	6-10	1001001001100000
6-11	1110100000100011	7-9	1001001110011000
8-13	0111011011110010	8-14	1011111001010000
10-13	1010000110000011	10-14	1000110111011111
11-12	1011011111011111	12-13	0011100011111101
12-14	0101100011100001		

### 2.3.1 原始全连通图的构造

以 1 号波长为例。首先选取链路 1-2, 其属性值为 1, 依附的节点 1 和 2 所属的连通子图分别为 1 和 2, 即属于不同的连通子图。因此, 将节点 2 和节点 1 所在的子图合并为一个连通子图, 合并后的子图编号为 1。继续查看下一条链路 1-4, 依此类推。所有链路都查看完后, 合并后的非连通图如图 1 所示。此时, 节点 1~节点 3 在 1 号子图中, 其他节点在 4 号子图中。

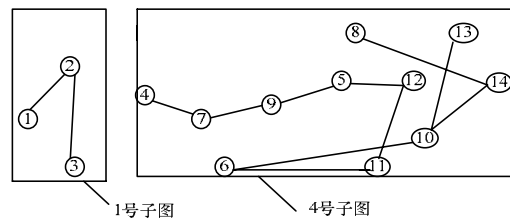


图 1 1 号波长的非连通图

然后构造边界节点组成的原始全连通图: 如果 2 个边界节点属于不同的连通子图, 则节点之间的链路属性值为 0, 如 1, 5 和 3, 7。否则为 1, 如 1, 3 和 5, 9。最终得到的原始全连通图如图 2 所示。

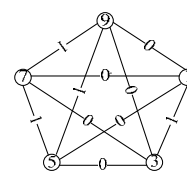


图 2 1 号波长的原始全连通图

### 2.3.2 非对称星型图的构造

在以上全连通图基础上进一步压缩。5, 7 和 9 中的每个节点到其他几个边界节点的链路属性值为 1 的条数为 2, 而 1, 3 到其他几个节点的链路属性值为 1 的条数为 1。所以, 选择 5, 7 或 9 及其链路来构造星型图。因此, 5, 7, 9 到虚拟核心节点的属性值为 1, 而 1, 3 到虚拟核心节点的属性值为 0。在此选其中任何一个节点构造的星型图都如图 3 所示。

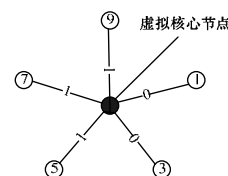


图 3 1 号波长的星型图

然后把星型图还原为全连通图,结果如图 4 所示。显然,从还原后的全连通图与原始全连通图对比结果可见,1-3 节点对存在偏差。对于 8 号波长,选 1,3 节点来构造星型图,则 7-9 节点对存在偏差;如选 7,9 则 1-3 节点对存在偏差。因此,选择 1,3 或者 7,9 构造星型图所产生的偏差不同,这与第 5 步相同。存在这种情况时,偏差用“1-3 或 7-9”表示,将这些节点和偏差对保存在  $D$  中。对每个波长执行以上步骤后,结果如表 2 所示。

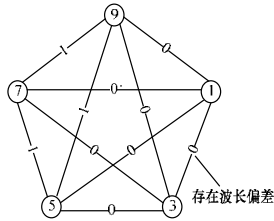


图 4 图 3 还原后的全连通图

表 2 波长偏差情况

波长	偏差情况	波长	偏差情况
1	1-3	9	无
2	3-7 或 5-9	10	无
3	无	11	1-3 或 5-9
4	无	12	无
5	无	13	无
6	5-9	14	5-9
7	无	15	无
8	1-3 或 7-9	16	无

从表 2 可以看出,共有 6 个波长存在偏差,而所有链路上的波长数总和为 160,波长偏差比例为 3/80。然后,根据第 6 步,把有偏差的波长集中在尽量少的节点对上。因此,把 1,8,11 号波长偏差集中在 1-3 节点对上;2,6,14 号波长偏差集中在 5-9 节点对上,按波长编号,把单个波长星型图上的波长逐一添加到星型图上,最终,每条链路上有 16 个波长。然而有 2 个节点对存在偏差,在构造的星型图上添加 2 条旁路,连接 1-3 和 5-9,其属性值为原始全连通图上的属性值。最终的非对称星型图如图 5 所示(图中未标出链路的属性值)。

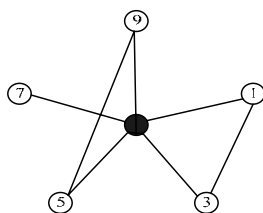


图 5 最终的非对称星型图

### 3 仿真结果与分析

拓扑聚合算法的性能评价如下:还原为全连通拓扑时,在未添加旁路的情况下有偏差的波长数目占所有链路上波长数目的比例(波长偏差比例);添加  $N$ (边界节点数目)条链路后的波长偏差比例。

#### 3.1 仿真实验

首先用 GT-ITM 软件包产生由 20 个节点组成的随机拓扑,拓扑图中的边用 GT-ITM 软件包中的第 3 种方法(随机方法)生成。边界率(边界节点占所有节点的比例)、每条链路可用的波长数目、给定链路上空闲波长数目取值如表 3 所示。具体的边界节点、每条链路上实际空闲的波长数目随机选取,

空闲波长的编号也在可用波长集中随机选取并均匀分布。对不同的随机拓扑仿真 1 000 次,记录实验数据,取平均值,聚合结果见表 3。

表 3 拓扑聚合结果

边界率	总波长数	最大空闲波长数	不含旁路的非对称星型波长偏差数	波长偏差比例/(%)	含 $N$ 条旁路的非对称星型波长偏差数	波长偏差比例/(%)
0.2	8	8	4.12	8.58	0.00	0.00
0.3			16.49	13.74	2.09	1.74
0.4			32.32	14.43	4.90	2.19
0.2	16	8	10.86	11.31	0.00	0.00
0.3			34.67	14.45	0.00	0.00
0.4			67.49	15.06	3.21	0.72
0.2	16	16	12.55	13.07	0.00	0.00
0.3			37.51	15.63	6.51	2.71
0.4			90.32	20.16	15.07	3.36

### 3.2 结果分析

从表 3 可以看出,当把全连通图压缩为不含旁路的星型图后,波长偏差比例集中在 8%~20%。毕竟,拓扑信息的压缩是以前准确性为代价的。但是对有波长偏差的节点对添加  $N$  条旁路后,基本不存在或者有极小的波长偏差,因为算法的主要特点就是把波长偏差集中在尽量少的节点对上,以添加尽量少的旁路,达到压缩的效果。

如果采用全连通拓扑结构, $N$  个边界节点的域压缩为全连通拓扑图将有  $N \times (N-1)/2$  条链路,即复杂度为  $O(N^2)$ ,而从表 3 可以看出,压缩为非对称星型图后的链路数目介于  $N \sim 2N$  之间,即复杂度为  $O(N)$ 。因此,采用非对称星型能更有效地压缩信息。

在总波长数为 16 时,最大空闲波长数为 8 比最大空闲波长为 16 时的波长偏差比例小,算法的压缩性能更好,特别是在极端的情况下,每条链条上都没有空闲波长,即每条链路上代表波长可用性的二进制全为 0 时,算法不需要添加任何旁路,此时压缩效果最好,压缩后只需要  $N$  条链路。

### 4 结束语

本文的创新之处在于将波长作为压缩参数来执行拓扑聚合算法,从模拟结果来看,原始全连通拓扑的复杂度为  $O(N^2)$ ,而采用非对称星型拓扑,复杂度可以降低到  $O(N)$ 。因此,本文提出的算法具有明显的优势。本文的仿真为静态环境,下一步将在实际的动态业务模式下进一步验证该算法性能。

#### 参考文献

- [1] ITU-T Rec.G.8080/Y.1304 Amendment 1, Architecture of the Automatically Switched Optical Network(ASON)[S]. 2003.
- [2] Liu Qing, Muthalaly V M, Ghani N. Hierarchical Inter-domain Routing in Optical DWDM Networks[C]//Proceedings of the 38th Southeastern Symposium on System Theory. Cookeville, TN, USA: [s. n.], 2006.
- [3] 杨敏, 向勇. 层次网络中的拓扑压缩算法及性能比较[J]. 计算机科学, 2002, 29(12): 44-48.
- [4] 康巧燕, 孟相如. 波长连续 WDM 光网络中新的自适应 RWA 算法[J]. 计算机工程, 2006, 32(18): 95-97.
- [5] Lui Kingshan, Nahrstedt K. Topology Aggregation and Routing in Bandwidth-delay Sensitive Networks[J]//Proceedings of IEEE GLOBECOM'00. [S. l.]: IEEE Press, 2000.

编辑 张正兴