

一种基于网络顶点割的拓扑优化算法

王宏 赵锋 彭伟

(国防科学技术大学计算机学院 长沙 410073)

摘要 优化网络设计是网络管理的目标之一。介绍一种基于关键链路分析和图的顶点割来优化网络拓扑结构设计的 BTop 算法,它结合流量工程和图论学理论对已有的网络拓扑进行优化设计。对算法的特性进行了分析,使用 Abilene 流量和拓扑数据验证了算法的有效性。

关键词 网络管理,拓扑优化,顶点割

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

New Network Topology Optimization Approach Based on Vertex Separator Set

WANG Hong ZHAO Feng PENG Wei

(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Optimization network topology design is one of goals of network management. A network topology optimization algorithm, BTop, was proposed, which combines network traffic engineering and graphic theory to optimize network topology. The efficiency of the algorithm was verified by the real traffic and topology data sampled from the Abilene network.

Keywords Network management, Topology optimization, Vertex separator set

1 概述

网络拓扑优化是网络设计规划与设计中的一个重要步骤,它研究网络拓扑、链路容量和路由的规划设计及优化方法。早期的网络建设中,更多的注意力放在网络的连通性上,只要两点之间能够通过网络连接通讯,就达到目的,导致网络速度慢,甚至不可用。我国的网络系统建设工作目前已处于成熟时期,网络规划与设计向精细化、科学化方向发展。但现实的情况是:在网络规划和升级时,许多网络管理者和设计者根据以往的经验进行“优化”设计,主要通过提高设备档次、升级骨干网络设备、扩大网络带宽,解决“感觉上可能存在的”设计问题,而采取的措施往往是盲目和随意的。随着新的网络应用(如云计算、实时控制、视频会议)等的出现,对网络性能提出了更高需求,因此迫切需要研究网络规划设计、网络改造的优化方法和理论来解决网络规划设计和改造中的优化问题。

上世纪 90 年代,流量工程(Traffic Engineering, TE)^[1]成为网络界的研究热点,它研究将网络上的流量合理地映射到网络的物理拓扑上,其目的是均衡负载,提高网络设备的利用率,最终改善网络的性能。域内流量工程技术研究在一个域内,如何将网络上的流量按照拓扑结构按比例进行映射,可分为两大类:一是通过路由控制方式;二是通过资源分配方式。考虑流量工程约束后,网络拓扑优化问题是 NP-Hard 问题^[2]。对网络拓扑优化问题求解一般采用启发式、半启发式和进化算法(如遗传算法,GA)进行求解^[3]。GA 是一种模仿自然选择与生物遗传进化机制进行搜索寻优的方法,算法结

构简单,对搜索空间、目标函数不要求连续和可微。与单纯的随机搜索不同,GA 采用概率搜索方式,在搜索迭代过程中利用遗传信息来判断搜索方向^[3]。文献[4]介绍一种基于 GA 算法和流量工程的网络规划设计与优化方法。文献[5]介绍基于改进遗传算法进行可靠性网络优化设计的方法。文献[6]介绍基于复杂网络理论分析网络拓扑的方法。文献[7]设计了一种基于测量的网络生成树拓扑优化算法,该文献可以根据网络上的流量分布动态地调整网络拓扑。文献[8]提出了一种基于初始环的网络染色体编码的遗传算法,用于求解最小化网络直径和最小化网络成本的优化问题,并在此基础上使用相应的染色体交叉方法,避免了每次交叉后的个体网络连通性检查,降低了整个算法的时间复杂度。

本文介绍基于关键链路分析和图的顶点割(Vertex Separators Set)来优化网络拓扑结构设计的 BTop 算法。它结合流量工程和图论学理论对已有的网络拓扑进行优化设计,提出网络拓扑的优化设计方案。对算法进行了描述,对其特性进行了证明,使用 Abilene 流量和拓扑数据验证了算法的有效性。

2 网络拓扑的健壮性问题

在骨干网络中,几乎每天都会发生路由器或链路故障,一些网络不可达,导致路由发生切换甚至发生路由抖动,使大量的流量发生转移。

图 1(a)中,(B,C),(E,F)为关键路径,如果(B,C)发生故障,则使大量流量发生迁移至另一关键路径(E,F)造成(E,F)更加拥堵。图 1(b)中,如果(B,C)发生故障,原来(B,C)

上的流量可以迁移至(B,F)(F,C)或(B,E)(E,C),不会造成(E,F)更加拥堵。

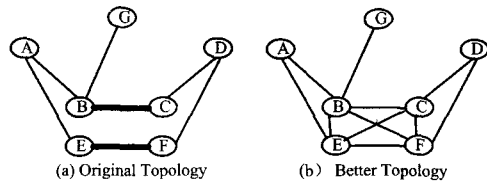


图1 不同健壮性的拓扑结构

使用图 $G(V, E)$ 来表示一个自治系统的 IP 网络, V 代表路由器集合, E 代表链路, 特别地, (i, j) 代表从路由器 i 到 j 的链路。从 i 到 j 的 IGP 路径记作 P_{ij} , 表示路由器和链路的集合。使用 n 表示图 G 中的节点数目, v_i 表示路由器 i 的故障率, w_l 表示链路 l 故障率, $\gamma(l)$ 代表链路 l 的可靠性。所有的故障场景加上一个没有故障的场景组成场景集合 S , 场景 S 产生的概率记为 r_s , 在场景 S 下出故障的部件集合记为 F_s 。

定义 1(流量损移率) 给定流量矩阵 M , M_{ij} 表示路由器 i 到路由器 j 的流量, 则定义状态 S 的流量损移率为 T_s :

$$T_s = \frac{\sum_{i,j \in V} M_{ij} Pr_s[i \leftarrow j]}{\sum_{i,j \in V} M_{ij}} \quad (1)$$

$$T = \sum_{s \in S} r_s T_s \quad (2)$$

定义 2(拓扑健壮性) 给定一组网络拓扑和流量矩阵 M , 流量损移率较小的网络拓扑具有更好的拓扑健壮性。

3 BTop 算法

3.1 算法思想

如果图的顶点子集 S 使得 $G-S$ 不连通, 则称 S 为 G 的顶点割。给定顶点割 S , 假设 G_1 和 G_2 是 $G-S$ 的两个连通分支, 则 G_1 中的任意顶点和 G_2 中的任意顶点之间的路径必然经过 S 中的顶点。

算法的基本思想是找到包含网络关键链路顶点的顶点割 S , 如果顶点割 S 中的节点不存在直连链路, 则增加一条链路将其直连。BTop 是一个算法, 递归进行到图中只有一个或者两个路由器时结束。算法使用了一个过程 GSeparator, 使用来自文献[10]的复杂度为 $O(n^3)$ 的谱分割算法来寻找割集。GSeparator 对输入的一个拓扑图返回该图的一个顶点割集。

BTop 算法以路由器组成的图 $G=(V, E)$ 作为输入, 产生优化以后的网络拓扑图 $G'=(V', E')$ 。如果在网络拓扑图中能找到一个顶点割集将图分割为一些连通子图, 那么从一个子图中的顶点到另外一个子图中的顶点的任意最短路径必然经过割集中的一个或者多个路由器。因此如果能构造这样一个网络拓扑: 全互连每一个子图中的路由器都建立必要的网络链接使得子图内的任意路由器和割集内的任意一个路由器之间都存在一条最短路径, 那么在任意两个节点之间都将存在一条最短路径。

如果把子图中的和割集中的顶点邻接的一个或者多个顶点加入到割集的顶点集合中, 那么可得割集的一个超集, 其仍然是一个割集。显然, 基于不同割集的网络拓扑的最大度可能并不相同。我们希望能找到一个优化的割集使得产生的网络拓扑的最大度最小。然而, 在实践上给一个大型网络拓扑图寻找这样一个割集并非易事。因此, 在找到一个割集后, 我们采用启发式算法寻找割集的一个超集。对子图中任何一个路由器和割集中的任意路由器, 先找到它们之间的最短路径, 如果该链路属于关键链路, 则将与之相连的节点加入到超集

中。

3.2 算法描述

图 2 给出了 BTop 算法的描述。

Algorithm BTop

Input: $G=(V, E)$, $KeyLink \subseteq E$; Graph G , set V of routers, set E of edges

Output: $G'=(V', E')$

$E'=E, V'=V$

/* Step 1 Choose a graph separator $S \subseteq G.V$ */

$S = Gseparator(G)$;

$G_1, \dots, G_m \leftarrow$ components of $G.V-S$;

/* Step 2 Find a superset S^+ of S . */

$S^+ = S$;

foreach $u \in G_i, v \in S$ do

if $(u \notin S^+) \text{ and } ((e(u, v) \in KeyLink) \text{ or } (\text{num_of_ele}(S^+) < 3))$ then
 $S^+ = S^+ \cup \{u\}$;

end

end

/* Step 3 Mesh the routers in S^+ */

foreach $u, v \in S^+, u \neq v$ do

$P = \text{Shortest-Path}(u, v)$;

if $(e \in P) \text{ and } (e \in KeyLink)$ do

$E' = E' \cup e(u, v)$;

$weight(e(u, v)) = \sum_{e' \in P} weight(e' \in P)$

end

end

图2 BTop 算法描述

定理 1 在 BTop 优化后的网络拓扑图中, 对于任意一条处于顶点割集中的关键链路的顶点 u, v , 则两点之间的连接必然满足下列条件之一:

1) $\exists e(u, v) \in E, e \in KeyLink$;

2) $\exists P, \forall e \in P, e \notin KeyLink$ 。

证明: 如果 u, v 相邻, 则满足条件 1), 如果 u, v 不相邻, 由步骤 2 知至少存在一条链路 $\exists e(u, v) \in E, e \notin KeyLink$ 。

定理 2 在 BTop 优化后的网络拓扑图中, 任意两个顶点 u, v 之间, 最多经过一条割集中的关键链路。

证明: 设在步骤 2 完成之后产生的割集为 S^+ 。

可分 3 种情况。情况 1: $u \in S^+$ 并且 $v \in S^+$ 。情况 2: $u \in G-S^+$ 并且 $v \in S^+$, 或反之。情况 3: $u \in G-S^+$ 并且 $v \in G-S^+$ 。无论何种情况, 由定理 1 知, 经过割集中的关键链路最多只有一条。

3.3 关键链路发现算法

主成分分析就是一种通过降维来简化原始数据分析的方法, 它能够把多个变量转换为少数几个综合变量, 而这几个综合变量可以反映原来多个变量的大部分信息。为了使这些综合变量所含的信息互不重叠, 应使这些综合变量互不相关。

本文采用基于主成分分析的关键链路发现算法 PCAR, 详细算法描述见文献[9]。

4 BTop 算法验证与评估

4.1 BTop 算法示例

我们给出一个简单的例子来说明 BTop 算法的工作过程。考虑一个具有 7 个路由器的网络拓扑, 使用 PCAR 算法发现的关键链路为 (B,C), (E,F), 如图 3(a) 所示。

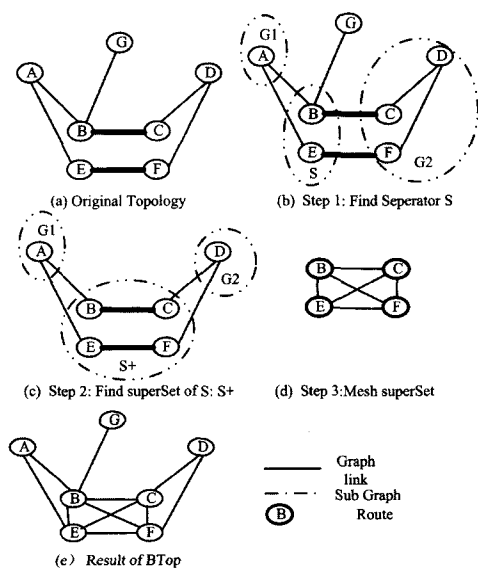


图3 BTop算法工作示例

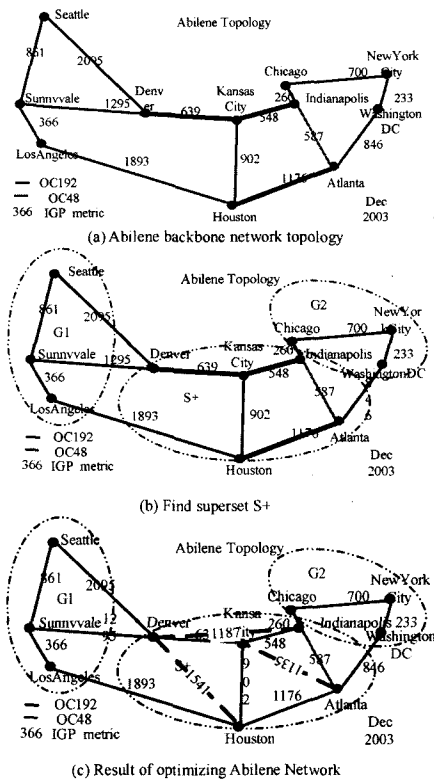


图4 Abilene核心网络拓扑优化结果

在步骤1中,算法选择路由器集合 $S = \{B, E\}$ 作为割集,分割出子图 $G_1 = \{A\}$ 和 $G_2 = \{C, D, F\}$ 。在步骤2中,因为C位于从D到B的最短路径上,F位于从D到E的最短路径上,C和F被加入到S中形成新的割集 $S^+ = \{B, C, E, F\}$ 。在步骤4中, S^+ 中的路由器中任意两个节点之间最短路径如果经过关键路径,则增加一条直连链路。由于关键链路连接的是拓扑图的割集节点,因此在此增加链路将改善关键链路的传输压力,提高网络整体性能。

4.2 Abilene上的实验

下面我们再举一个真实的网络拓扑美国教育科研网Abilene^[142]。Abilene核心网络拓扑由11个节点和14条双向链路组成,如图4所示。使用PCAR算法求得的关键链路为(Denver, KansasCity), (KansasCity, Indianapolis), (Houston, Atlanta),图中用粗线标注。

结束语 本文介绍了基于关键链路的网络拓扑优化算法BTop。BTop基于关键链路分析和图的顶点割来优化网络拓扑结构设计。论文用Abilene流量数据验证了BTop算法的有效性。

参考文献

- [1] Awduche D, Chiu A, Elwalid A, et al. Overview and Principles of Internet Traffic Engineering. Internet Engineering Task Force [S]. RFC3272, May 2002
- [2] Uhlig S, Bonaventure O, Magnin V, et al. Implications of the Topological Properties of Internet Traffic on Traffic Engineering [C]//Proc. of ACM SAC'04, March 2004
- [3] 孙雨耕,吕航,薛希俊.基于流量工程的新型Internet网络规划研究[J].电路与系统学报,2004,9(3):40-45
- [4] 叶大振,吴新余.基于遗传算法的计算机通信网优化设计[J].南京邮电学院学报,1996,16(06)
- [5] 刘东.基于改进遗传算法的可靠性网络优化设计[J].计算机技术与应用,2007,17(1):63-68
- [6] 雷霆,余镇.基于复杂网络理论的计算机网络拓扑研究[J].计算机工程与应用,2007,43(6)
- [7] 柴洪杰,黄周松,雷振明.基于测量的网络生成树拓扑优化[J].高技术通讯,2003(03)
- [8] 曹继伟,刘玉华,许凯华,等.基于初始环编码的遗传算法优化网络拓扑结构问题[J].计算机工程与应用,2006(26)
- [9] 王宏.网络综合流量管理关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2008
- [10] Daniel A, Spielman, Teng Shang-hua. Spectral Partition Works: Planar Graphs and Finite Element Meshes[C]//IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, 1996:96-105
- [11] Chen Y P, Liestman A L, Liu Jiang-chuan. A Hierarchical Energy-Efficient Framework for Data Aggregation in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(3)
- [12] Madan R, Lall S. Distributed Algorithms for Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(8)
- [13] Chang J-H, Tassiulas L. Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(4)
- [14] 章志忠,周水庚,方锦清.复杂网络确定性模型研究的最新进展[J].复杂系统与复杂性科学,2008,5(4):29-45

(上接第46页)

- [5] Bollobas B. Random graphs (2nd ed) [M]. New York: Academic Press, 2001
- [6] Erdos P, Renyi A. On random graphs [J]. Publicationes Mathematicae, 1959, 6: 290-297
- [7] Strogatz W. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393: 440-442
- [8] Barabasi A L, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks [J]. Science, October 1999: 509-512
- [9] Ravasz E, Barabasi A L. Hierarchical organization in complex networks [J]. Physical Review E, 2003, 67: 026112
- [10] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Error and attack tolerance of complex networks [J]. Nature, 2000, 40: 378-382