

基于节点增益不同的无线网络拓扑控制技术

胡致远, 彭 强, 刘春艳

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030)

(pq312@163.com)

摘 要:无线网络拓扑控制通过调节网络节点的传输功率等措施,从而提升网络性能。无线异构网络因为其网络节点的不同特性,使得适用于无线同构网络的拓扑控制技术无法获得理想的网络性能。以无线网络的图论模型为基础,将信号的能量域指标引入图论模型,从而有效地解决了无线异构网络节点接收增益不同所带来的网络干扰等问题。采用异构无线网络层次聚类算法,获得接收增益不同条件下的拓扑控制策略。仿真表明,该拓扑控制算法对无线异构网络性能有较大改善。

关键词:无线网络; 拓扑控制; 接收增益; 信干比

中图分类号: TP393.03 **文献标志码:** A

Topology control of wireless network based on different transceiver gains

HU Zhi-yuan, PENG Qiang, LIU Chun-yan

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The topology control optimizes wireless networks by adjusting nodes' transmission power or other performance index. Meanwhile, nodes in heterogeneous wireless network possess different features, which obstructs the optimization of wireless network with the traditional topology control algorithms developed from homogeneous networks. This paper proposed a kind of topology control model by introducing SINR into topology model, in order to solve the interference caused by nodes' different transceiver gains. By adopting hierarchical clustering algorithm, new topology control strategy could improve the performance of heterogeneous wireless networks, which is supported by simulations.

Key words: wireless network; topology control; receiving gain; Signal-to-Interference plus Noise Ratio (SINR)

0 引言

随着电信产业的全球化以及 Internet 的迅猛发展,无线网络逐渐向各种移动无线互联网的无缝融合演进^[1]。未来的无线移动通信网络系统将由多种无线接入技术组成的异构网络。

目前,异构无线网络及其拓扑控制等关键性技术已成为热点研究领域。由节点的位置和传输范围确定的无线网络拓扑结构对网络的性能有着重大的影响:密集的拓扑连接导致了过高的无线链路干扰,不利于带宽空间重用,从而限制了网络容量;相反,如果拓扑连接过于松散,较少的无线链路不仅使网络吞吐量降低,而且容易产生网络分区。

根据拓扑控制的不同侧重点,其网络性能优化所要达到的目标也有区别。目前的研究目标集中在降低网络节点能量消耗^[2-3],其次是降低网络干扰、提高频谱资源空间复用能力、以及提高 MAC(Media Access Control)协议和路由协议的效率^[3-4]等方面。这些研究基本上是针对同构网络,即:网络中的所有节点都具有相同的最大发射和接收增益。然而,事实上即使所有的网络节点使用相同的发射功率,由于天线增益和地形等许多方面的差异,将使各个节点所形成的无线覆盖范围也是各不相同的^[5]。所以相对于同构网络而言,异构网络是更现实的网络模型。文献[6-7]作者提出了 DRNG、DLMST、DLSS 算法来解决异构问题,从而保障了异构网络的连通性;文献[8]作者提出一种分布式的拓扑控制算法,从而

形成最小功耗树;文献[9]作者将 Yao 图加入在 MG 模型中,提出了 extended Yao-Yao 和 extended Yao-Sink 两种算法,并在代价为 $O(n \log n)$ 的情况下,限制了所生成网络拓扑的节点度。

然而文献[6-9]作者都只考虑异构网络的功率发射半径不同,忽略了接节点收增益不同产生的网络性能影响。本文首先将信号的能量域信干比 Signal-to-Interference plus Noise Ratio (SINR)引入图论模型中,进一步研究了不同接收增益条件下的异构网络拓扑控制策略。

1 问题说明

无线通信系统通常采用功率控制技术以提高网络性能,包括:减少站点之间的无线信号干扰、提高无线信道的空间复用度、增加网络容量和减少站点设备功耗。拓扑控制则在采用功率控制技术的同时,更加关注从整个网络拓扑层面来调整网络容量,减少拥塞,控制系统功耗,保障 QoS 指标。拓扑控制主要采用调整设备的发射功率和方位角等技术措施,实现拓扑连接度的等网络拓扑指标调整。

在本文的拓扑控制算法研究中采用了聚类算法。聚类算法是基于整个数据集内部存在若干“分组”或“聚类”为出发点而产生的一种数据描述方法,其每个子集中的点具有高度的内在相似形。一般的聚类算法生成的类与类之间没有任何关系,这种数据描述方法是“平坦”的。文献[10]作者提到的分簇算法所生成的簇(群)之间就没有任何联系。针对这一

收稿日期:2009-03-31;修回日期:2009-05-16。 基金项目:国家 863 计划项目(2008AA01Z202);国家自然科学基金资助项目(60872038);重庆大学“211 工程”三期创新人才培养计划建设项目(S-09102)。

作者简介:胡致远(1965-),男,陕西西安人,副教授,博士,主要研究方向:无线接入网络、核心网;彭强(1984-),男,重庆合川人,硕士研究生,主要研究方向:拓扑控制技术;刘春艳(1983-),女,河北保定人,硕士研究生,主要研究方向:网络仿真技术。

问题,本文考虑将其直接引入层次聚类算法的研究中,从而构成一种“分层次”结构的聚类方法。

层次聚类的定义:考虑对 n 个样本聚成 C 类的情况。首先将所有样本分成 n 类,其每类正好含有一个样本;其次将样本分为 $n-1$ 类,接着是 $n-2$ 类,……,这样下去直到所有样本都被分为一类。聚类数目 $c = n - k + 1$ 对应层次结构的第 k 层,因此第 1 层对应 n 个类别而第 n 层对应一个类别。对层次结构的任一层及其该层中的任意两个样本,如果它们在该层中属于同一类,而且在更高层一直属于同一类,那么这样的序列称为“层次聚类”。

如图 1 所示^[11],如果仅从图论的角度考虑,链路 $\{s-r, s'-r'\}$ 之间相互干扰不可能同时通信。但由于无线网络中的干扰强度本身是渐变的,如果将信号的能量域 SINR 模型引入图论中,可以知道:

$$P_r = g \frac{P_s}{d(s,r)^a} \quad (1)$$

其中: P_r 表示接收到的信号功率, P_s 是发送节点 S 的发射功率, g 是天线增益, a 是路径损耗因子。假设节点接收敏感度为 β , 在异构网络中每个节点的接受敏感度是不同的。

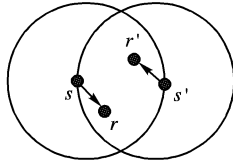


图 1 $\{s, r\}$ 和 $\{s', r'\}$ 的关系

于是在 SINR 忽略噪声后有 SIR , 其中 P_r 表示接收节点收到其他发射节点的干扰:

$$SIR = \frac{P_s}{P_i} = \frac{\frac{P_s}{d(s,r)^a}}{\frac{P_{s'}}{d(s',r)^a}} \geq \beta; s \neq s' \quad (2)$$

假设 $a = 4$, $\beta = 10$, $d(s, r) = 90 \text{ m}$, $d(s', r') = 80 \text{ m}$, $d(s', r) = 200 \text{ m}$, $g = 5.0625$, $d(s, r') = 180 \text{ m}$, $P_s = 0.2818 \text{ W}$, $P_{s'} = 0.2818 \text{ W}$ 。根据式(2)可知: $\beta r = 24.38 > 10$, $\beta r' = 25.62 > 10$ 。由此可知:链路 $\{s-r, s'-r'\}$ 可同时通信,例如采用 CDMA 方式。

2 SINR 模型与图论模型结合

由上述讨论可知:通常采用的图论模型不能很好地适应信号的“能量域”,而 SINR 模型则缺乏网络特征。因此,本文提出了一种 SINR 与图论相结合的模型,其考虑如下:将基于 SINR 模型加入图论模型中,假设所有网络节点 V 分布在一个二维平面上,每个节点具有唯一的 ID 号,每个节点 u 具有一个全向天线,而且节点 u 的传输功率 P_u 可以在最小和最大之间连续调节, $0 \leq P_u \leq P_{\max}$, 其中 P_{\max} 表示节点 u 的最大传输功率。对于异构网络,每个节点的最大传输功率是不同的,其链路集为: $E = \{u, v \mid d(u, v) \leq d_{\max}, u, v \in V\}$ 。另外,通过位置管理系统获得网络节点的位置信息。

在图 (V, E) 中 (X, Y) 代表欧式距离,对于节点 v , 有 $v(x, y)$ 表示其坐标位置, $d_{ij} = d(v_i, v_j)$ 表示节点 v_i 和 v_j 的欧式距离。源节点 v_i 向目的节点 v_j 发送信息能否被成功传输决定于两个因数,即为接收节点获得的信号能量 P_r 和信号干扰噪声比 $SINR$ ^[14], 于是有:

$$P_r(i, j) = \frac{g_{i,j} \times p_i(i, j)}{d_{i,j}^a} \geq RX_{\min} \quad (3)$$

$$SINR_{i,j} = \frac{g_{i,j} \times p_i(i) \times d_{i,j}^{-a}}{N_0 + I_j} \geq \beta \quad (4)$$

其中: RX_{\min} 表示信号能被正确译码的最低门限, β 表示节点的

接收敏感度门限, N_0 表示噪声, I_j 表示接收节点 j 收到的干扰总值, α 为无线信号衰减指数。

本文模型应用的异构网络是由骨干节点和普通节点组成的混合网络,所谓“骨干节点”是指发射最大半径较大和接收敏感度较强的路由节点,而“普通节点”则是用户节点。

3 算法规则

本算法由两个阶段组成:首先运用层次类聚算法将网络分簇,使得每个簇至少有一个“骨干节点”。然后考虑接收增益影响,在普通节点和骨干节点之间实施异构网络的拓扑控制策略。

3.1 层次类聚算法(分簇算法)

1) 在区域 $(0 \leq X \leq X_{\max}, 0 \leq Y \leq Y_{\max})$ 内随机分布 N 个节点,令 $R_N = \{C_i = \{x_i\}, i = 1, \dots, N\}$ 作为初始聚类,给定阈值 d_0 且令 $t = N$;

2) 计算“骨干节点”和“普通节点”之间距离 $D_{i,j}$ ($D(\cdot)$ 是距离函数,通常采用欧氏距离作为节点间相似度的度量),令 $D_{k,t} = \min\{D_{i,j} \mid i, j = 1, \dots, t, i \neq j\}$;

3) 决策机制:如果 $D_{k,t} < d_0$, 合并 C_k 类和 C_t 类,定义 $C_q = C_i \cup C_j$, 并产生新聚类。 $R_{t-1} = \{R_t - \{C_i, C_j\}\} \cup C_q$, 且 $N = N - 1$, 返回 2); 否则算法结束。

上述算法完成了簇的分类,其中异构网络中的骨干节点所构成的骨干网作为业务的中继点完成普通节点和骨干网络的节点业务流的转发功能。尤其是当业务有严格时延要求时,需通过具备“大距离尺度”的骨干节点进行转发,从而减少跳数。这里需要注意的是:如果某个普通节点在分簇算法中同时属于两个簇,则选择簇节点号小的簇号。

3.2 拓扑控制算法

3.2.1 相关定义

定义 1 最大功率拓扑。当网络中的每个节点均使用其最大功率工作时形成的拓扑结构称为最大功率拓扑。

定义 2 链路干扰。节点 v_k 对于链路 $\{v_i, v_j\}$ 是干扰节点:

$$Linter\langle i, j \rangle = \left\{ k \mid \left| \frac{\frac{P_i}{d(i,j)^a}}{\frac{P_k}{d(k,j)^a}} < \beta, k \in V, k \neq i \right. \right\} \quad (5)$$

定义 3 路径干扰。路径 $P = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 的干扰定义为:

$$Pinter(p) = \sum_{e \in p} Linter(v_i, v_j) e = (v_i, v_j) \quad (6)$$

考虑到如果节点的传输功率很大, SINR 就很大,从而该节点就有更大的抗干扰能力;但是该节点产生对网络的干扰也很大,所以必须在传输功率和干扰之间寻找一个平衡点。令 $Linter\langle i, j \rangle = \beta_k(i, j)$ 。

定义 4 阶跃函数:

$$I(\beta_k(i, j)) = \begin{cases} 1, & \beta_k(i, j) \leq \beta \\ 0, & \beta_k(i, j) > \beta \end{cases} \quad (7)$$

定义 5 S 型函数:

$$sig(x) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-b)}} \quad (8)$$

3.2.2 拓扑控制算法流程

1) 首先节点以最大功率发射,形成最大功率拓扑(最大拓扑图须是方向图)。考虑异构网络的发射最大半径和节点接收敏感度的不同,即:如果“普通节点”在最大发射功率上达不到“骨干节点”,但由于“骨干节点”接收剪感度高,于是“骨干节点”和“普通节点”之间形成就可以形成单向链路。

2) 信息收集: 每个节点需要获得其一跳邻居内所有节点的信息, 包括节点的 ID 和方位。

3) 运用层次聚类算法, 完成簇的分类。

4) 确定节点发射功率 P_i :

$$P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max} \quad (9)$$

$$\min \sum_{\text{link}(i,j) \in V, k \neq i,j} I[\beta_k(i,j)] \quad (10)$$

由于阶跃函数导致了优化的非平滑过程, 考虑将 (9) 式转化为一个平滑优化过程, 在文献 [11] 中, S 型函数可以近似为阶跃函数, 是一个平滑优化过程函数, 当 $x > b$ 时, $\text{sig}(x) = 1$; 当 $x < b$ 时, $\text{sig}(x) = 0$; 于是式 (10) 等价于:

$$\min \sum_{\text{link}(i,j) \in V, k \neq i,j} \text{sig}[\beta_k(i,j)] \quad (11)$$

上述过程变为一个相对平滑的优化过程, 于是可以用 SQP^[12] 方法来解决。

5) 节点 u 以最大功率半径发射形成的邻居为 N_{\max}^u , 对于 N_{\max}^u 内的每个节点 k , 计算 $\text{Linter}(u, v)$, $k \neq v$ 。

6) 对于每条链路 (u, v) , 如果存在节点 k , 使得 $\text{Linter}(u, k) + \text{Linter}(k, v) < \text{Linter}(u, v)$, 则删除链路 (u, v) 。

7) 完成以上步骤后, 选择每个节点的直接邻居作为其邻居节点。

4 仿真分析

本文用 C 语言搭建一个仿真平台, 该通信网络由 N 个通信节点组成, 在区域为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 范围内节点均匀随机分布。节点最大传输半径为 14 m , 聚类算法给定阈值 d_0 为 10 m 。为便于仿真分析, 假设在异构网络中“骨干节点”的接收灵敏度和发射功率的最大半径均为“普通节点”的一倍。

如图 2 所示, 本文考虑接收增益的算法与最大功率拓扑 (无拓扑控制策略) 和 DLMST 算法进行比较: 随着节点个数的增加, 网络中受链路干扰的节点个数增加, 本文考虑增益的拓扑控制策略的链路干扰节点个数明显小于最大功率拓扑和 DLMST 算法。

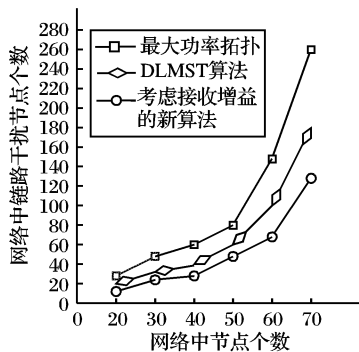


图2 网络中链路干扰的节点个数

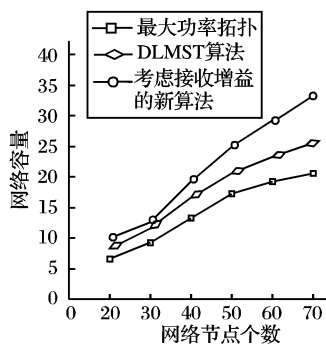


图3 网络容量

如图 3 所示, 定义网络容量为网络中可同时工作的链路

个数, 由于本文加入了能量 SINR 模型, 而且考虑到异构网络中节点的接收增益的差异, 因此采用本文拓扑控制策略的新算法的网络容量大于采用最大功率拓扑和 DLMST 算法。

5 结语

拓扑控制模型从整个网络拓扑角度来调整网络容量, 减少拥塞, 控制系统功耗, 保障 QoS 指标, 而 SINR 模型从单纯链路层面考虑。本文通过将信号的能量域 SINR 模型引入图论模型中, 从而综合了上述两种模型的优点。针对异构网络中节点的最大发射和接收增益不同对网络性能的影响, 本文在层次类聚的基础上, 研究了异构网络的拓扑控制策略。新的拓扑控制算法较好地适应了异构网络接收节点的增益变化, 改善了异构网络的整体性能指标。

参考文献:

- [1] NIEBERT N, SCHIEDER A, ABRAMOWICZ H, *et al.* Ambient networks: An architecture for communication networks beyond 3G [J]. IEEE Wireless Communications, 2004, 11(2): 14–22.
- [2] GOLDSMITH A J, WICKER S B. Design challenges for energy constrained Ad Hoc wireless networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2002, 9(4): 8–27.
- [3] LI LI, HALPERN J Y, BAHL P, *et al.* A cone-based distributed topology control algorithm for wireless multi-hop networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(1): 147–159.
- [4] SANTI P. Topology control in wireless Ad Hoc and sensor networks [J]. ACM Computing Surveys, 2005, 37(2): 164–194.
- [5] LI XIANG-YANG, SONG WEN-ZHAN, WANG YU. Localized topology control for heterogeneous wireless sensor networks [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2005, 2(1): 129–153.
- [6] LI NING, HOU J C. Topology control in heterogeneous wireless networks problems and solutions [C]// Proceedings of IEEE INFOCOM. Hong Kong: IEEE Press, 2004: 232–243.
- [7] LI NING, HOU J C. Localized topology control algorithms for heterogeneous wireless networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(6): 1313–1324.
- [8] LIU JI-LEI, LI BAO-CHUN. Distributed topology control in wireless sensor networks with asymmetric links [C]// IEEE Global Telecommunications Conference. [S. l.]: IEEE, 2003, 3: 1257–1262.
- [9] LI XIANG-YANG, SONG WEN-ZHAN, WANG YU. Efficient topology control for wireless Ad Hoc networks with non-uniform transmission ranges [J]. ACM Wireless Network (WINET), 2005, 11(3): 255–264.
- [10] 胡光明, 蒋杰, 龚正虎. 移动自组网络分簇算法综述 [J]. 计算机工程与科学, 2005, 27(1): 48–50.
- [11] XIAO MING-BO, SHROFF N B, CHONG E K P. A utility-based power control scheme in wireless cellular systems [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(2): 210–221.
- [12] FLETCHER R, POWELL M J D. A rapidly convergent descent method for minimization [J]. Computer Journal, 1963, 6(2): 163–168.
- [13] LIU YONG-ZHEN, ZHANG XIN-MING, LIU QING, *et al.* A hybrid interference model-based topology control algorithm [C]// Proceedings of the 2008 Fourth International Conference on Networked Computing and Advanced Information Management. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 42–46.
- [14] GAO YAN, HOU J C, NGUYEN H. Topology control for maintaining network connectivity and maximizing network capacity under the physical model [C]// IEEE INFOCOM 2008. [S. l.]: IEEE Press, 2008: 1013–1021.