

基于 OPNET 的自组网拓扑控制有效性的研究

陈文斌, 李晓鸿, 王 东

(湖南大学计算机与通信学院, 长沙 410082)

摘 要: 拓扑控制通过调节节点的发送功率, 减少信号干扰, 降低节点能量消耗, 提高网络传输能力。该文通过考察自组网中几种经典的拓扑控制算法, 研究了拓扑图能保证连通具有较小的节点度和传输半径。OPNET 网络仿真平台仿真发现, 拓扑控制的效能受网络中每秒的发包个数影响, 当每秒发包个数大于一定值时, 拓扑控制将提高网络吞吐量。

关键词: 自组网; 拓扑控制; 吞吐量; 网络仿真

Study on Effectiveness of Topology Control in Ad Hoc Networks Based on OPNET

CHEN Wen-bin, LI Xiao-hong, WANG Dong

(School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082)

【Abstract】 Topology control tries to reduce radio interference, lower energy consumption and enhance network capacity by adjusting transmission power of nodes. This paper studies some classical topology control algorithms and finds that the resulted topology has several nice properties such as connectivity, less node degree and transmission range. Simulation results show that when the delivery rate of packets in the network is greater than a certain value, which affects the effectiveness of topology control. The network's throughput can be significantly improved.

【Key words】 Ad hoc networks; topology control; throughput; network simulation

1 概述

自组网的拓扑结构受诸多因素影响, 如节点发送功率、天线角度、节点移动、信号干扰等, 动态性很强, 从而影响了链路层和网络层协议的性能, 尤其对节点能耗、网络传输能力有很大影响^[1]。

在自组网中, 如果所有节点都以最大发送功率工作, 节点有限的能量将被通信部件快速消耗, 降低网络生命周期。而且, 网络中每个节点的无线信号将覆盖大量节点, 造成无线信号冲突频繁, 影响节点的无线通信质量, 降低网络的吞吐量。另外, 生成的网络拓扑中将存在大量的边, 导致网络拓扑信息量大, 路由计算复杂。若为了节能将节点发送功率设置太小, 形成的拓扑虽然简单, 但易因为瓶颈节点的失效而失去连通性。因此, 需要研究在维持拓扑的某些全局性质的前提下, 通过调整节点的发送功率和建立合适的相邻关系的方法构建自组网拓扑, 以达到延长网络生命周期, 提高网络吞吐量, 降低网络干扰, 节约节点能量的目的^[1]。

文献[2-4]研究了自组网中的拓扑控制算法以及其对网络的影响, 适当减小节点的发送功率来调整网络的拓扑结构, 可以提高网络性能。然而, 文献[5-6]中对自组网性能影响的仿真结果表明, 实施拓扑控制后, 反映网络性能的重要指标——吞吐量却会下降。本文借助 OPNET 网络仿真平台^[7]实现了经典的拓扑控制算法(LMST^[2], CBTC^[3], K-Neigh^[4]), 并进行定量分析。仿真结果表明: 当网络每秒的发包个数小于一定值时, 拓扑控制使每个节点的发送功率变小, 导致网络拓扑中数据包的平均转发次数增加及链路失效更加频繁, 因此吞吐量会下降; 但当网络每秒的发包个数大于此定值时, 网络中节点间的干扰成了影响吞吐量的主要因素, 而拓扑控

制能减少网络干扰, 增强空间复用能力, 因此能提高网络的吞吐量。

2 自组网拓扑控制算法分析

2.1 经典拓扑控制算法

一个有效的拓扑控制算法应满足下列性质^[8]: (1)算法在设置节点最小发送功率的同时必须保证网络的连通性。(2)算法能分布式运行, 因为在多跳无线自组网中不可能有集中控制, 每个节点都必须根据自己收集到的信息来做决定。(3)算法只需要每个节点收集自己局部的信息, 这样减少了信息的交互开销, 提高算法收敛的速度。(4)算法生成的拓扑图是对称、边稀疏和节点度有界的, 因为目前自组网中最常用的链路层和网络层协议都需要网络拓扑具有这些性质。(5)算法具有 Spanner 性质: 在拓扑控制算法生成的拓扑图中任意 2 个节点间的能耗与它们在 UDG(UDG 为所有节点都以最大功率工作时生成的拓扑图)中能耗的比值小于某个常数。

根据输入信息, 拓扑控制方法可以分为 3 类^[1]:

(1)基于节点位置(坐标)信息的拓扑控制协议

Li^[2]提出了一种称为 LMST 的拓扑控制算法。基本思想是每个节点采用分布式且基于局部邻居位置信息的方法, 对其最大传输半径内的邻居节点构建最小生成树, 然后设置传输半径仅覆盖与最小生成树根节点直接相连的所有子节点。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60703097); 湖南省自然科学基金资助项目(06JJ4078)

作者简介: 陈文斌(1983-), 男, 硕士, 主研方向: 可信系统与网络; 李晓鸿, 讲师、博士; 王 东, 教授、博士

收稿日期: 2008-10-19 **E-mail:** lixhong@263.net

(2)基于角度(方向)信息的拓扑控制协议

文献[3]提出了一种利用信号角度到达(angle-of-arrival)技术获得邻居角度信息(取代位置信息)的分布式拓扑控制协议(简称 CBTC)。基本思想是每个节点 u 逐渐增加传输范围直到其发现的邻居满足条件:任意 2 个邻居之间的角度的最小值不大于某个预先设定的角度 α 或已经达到节点的最大传输范围。作者证明如果设置的 $\alpha \leq 5\pi/6$ 可以保证网络的连通性。本文 α 取值为 $5\pi/6$ 。

(3)基于邻居(个数)信息的拓扑控制协议

Blough 提出了 K-Neigh 协议^[4],基本思想是保持每个节点的邻居数小于等于某个特定的 k 。而且每个节点获得邻居数只需要距离信息就足够了,不需要知道邻居节点的具体位置或所在方向,减轻了节点的负担。初始时节点用最大传输能量互相交换信息,根据收到的信息选择 k 个最近的邻居作为一个集合,调整自己的传输范围使其覆盖集合中最远的节点。作者证明 K-Neigh 协议能够保证拓扑图高概率的连通,而且通过大量的仿真实验,给出了保证图 95% 连通率时不同节点数应该设置的邻居数 k 。本文 k 取值为 9。

本文使用 Java 编程仿真说明拓扑控制算法对网络拓扑特性的影响。其中仿真环境为: $1\ 000 \times 1\ 000\ \text{m}^2$ 区域中均匀分布 160 个节点,所有节点初始最大传输范围是 250 m(K-Neigh 例外,根据算法要求设置最大传输半径为其 MST 图最长边长度的 2 倍^[4])。图 1~图 4 给出了 UDG 和其他 3 种拓扑控制算法生成的拓扑图。

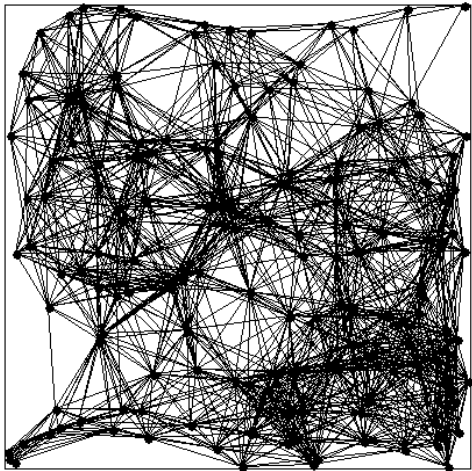


图 1 UDG 生成的拓扑图

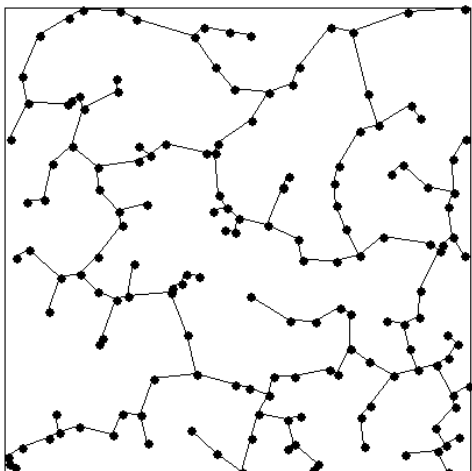


图 2 LMST 生成的拓扑图

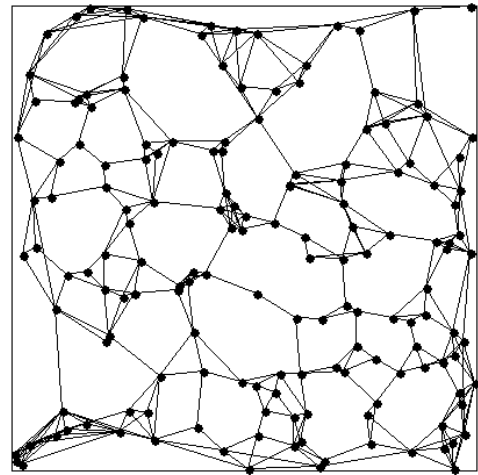


图 3 CBTC 生成的拓扑图

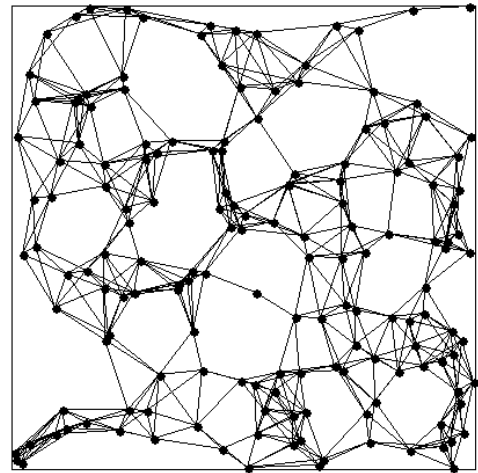


图 4 K-Neigh 生成的拓扑图

2.2 拓扑控制算法特性比较

拓扑控制算法特性可从节点的度和传输半径 2 个方面来分析。本文随机生成连通的 100 幅 UDG 图,并在其基础上运行拓扑控制算法 LMST, CBTC 和 K-Neigh, 计算生成拓扑的性能参数。其中,节点半径等于此节点的通信传输距离,即该节点与其相距最远的邻接点的几何距离。节点传输半径越大,表明所需通信能耗越大,空间复用度越弱;节点的度(邻居个数)越大,则该节点对邻居节点的干扰增加,同时也增加维护邻居状态的开销。

由表 1 可得,与 UDG 相比,所有的拓扑控制算法都能有效减少节点传输半径,降低节点平均度。就平均度和平均半径而言,LMST 最小,但不意味着此算法生成拓扑的性能最好。因为平均半径减小,使得瓶颈节点和路由跳数增加,数据传输失败的概率增大,网络层路由更新和重新探测频繁,从而产生的大量路由开销可能会降低网络性能。所以,只有生成适中传输半径的算法才是比较好的算法。

表 1 不同拓扑控制算法的统计特性

算法	节点的平均度	平均半径/m
LMST	2.50	66.59
CBTC	6.64	124.86
K-Neigh	7.98	135.77
UDG	23.95	250.00

3 性能评估

本文采用了以下几个性能指标:

(1)吞吐量:接收数据量和总发送数据量的比值,从这个

比值中可以看出整个网络成功传递的数据量,以及在传递过程中由于链路故障丢失的数据量。该参数能很好地反映网络的数据传输效率。

(2)丢包数:仿真中整个网络的丢包数,包括链路失败、碰撞等原因引起的包丢失。

(3)平均路由由跳数。

网络仿真工具为 OPNET10.5^[7]。仿真场景如下:选择 20 个源节点,每个节点每次将 1 KB 的数据发送给随机选择的目的地节点,发送间隔时间呈 Poission 分布,网络层使用 DSR 路由协议,传播损耗模型使用自由空间模型^[7]。每个节点使用 0 dB 增益的全向天线,天线高度为 1.5 m,数据传输速率为 1 Mb/s,接收阈限为 -80 dbm,最大发送功率为 0.006 4 W(此时每个节点的最大传输半径为 250 m)。仿真时间 500 s,仿真结果如图 5~图 7 所示。

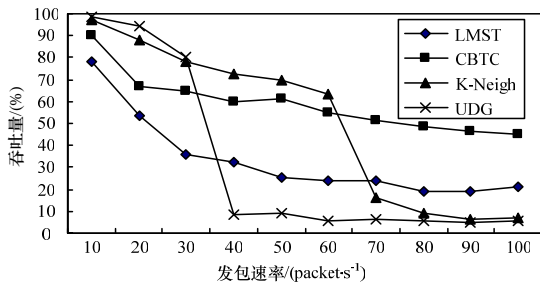


图 5 不同算法吞吐量的比较

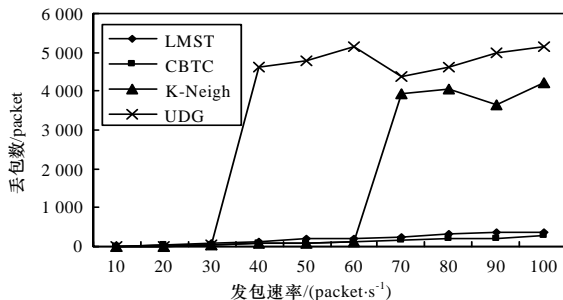


图 6 整个网络的丢包数

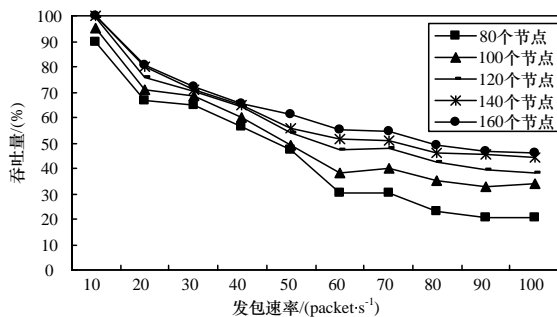


图 7 不同节点数下 CBTC 吞吐量的比较

图 5 为不同拓扑控制算法下网络吞吐量的变化趋势。以 UDG 对应的曲线为例,网络的发包速率为 v (单位: packet/s),当 $10 \leq v \leq 30$ 时,吞吐量大于 80%;但当 $30 < v < 40$ 时,吞吐量骤然下降,不到 10%,并且随着发包速率增加,吞吐量逐渐降低。K-Neigh 和 CBTC 也有类似趋势。图中明显可以看到,当发包速率在 [10,30] 中,UDG 的吞吐量最高;在 [40,60] 中,K-Neigh 的吞吐量最好;在 [70,100] 中,CBTC 体现了其优势;以上分析也说明,不同的拓扑控制算法适用于不同的

网络负载。

参考表 1,可以看出信道空间复用度越弱的拓扑方案导致网络吞吐量下降越快。为了更好地解释这一现象,统计了整个网络的丢包数。图 6 描绘了不同拓扑控制算法下,整个网络丢包数随发包速率变化的趋势。可以看出:为完成同样的业务量,不同拓扑控制算法下的网络丢包数不同。因为平均传输半径越大,瓶颈节点越少,平均路由由跳数越小(见表 2),节点间干扰越大。以图 3 的 UDG 为例,网络发包速率不大时($v \leq 30$),节点间干扰不大,丢包主要受瓶颈节点影响;但当网络发包速率增大($30 < v \leq 100$),节点间的干扰起主导作用,网络丢包数急剧上升。K-Neigh 也有类似趋势。

表 2 不同拓扑算法中的平均路由由跳数

算法	平均路由由跳数
UDG	3.15
LMST	7.23
CBTC	5.39
K-Neigh	4.36

以 CBTC 为例,节点密度增大,发送速率减小,平均度减小^[9],节点间干扰变小,网络吞吐量变大,如图 7 所示。这说明在自组网中,节点间的干扰是影响网络吞吐量的重要因素。因此,拓扑控制通过降低节点间的干扰,并在网络负载大于一定值的情况下,使整个网络的吞吐量增加。

4 结束语

本文研究了拓扑控制对网络中节点的度和传输半径的影响,通过仿真手段测量了不同拓扑控制算法下自组网的吞吐量。结果表明,随着网络发包速率的增大,信道空间复用度越弱的拓扑方案,网络吞吐量下降越快,且不同的网络发包速率适用于不同的拓扑控制算法。因此,需要在信道空间复用度、路由跳数和网络负载之间加以折中,使网络性能得到进一步优化。

参考文献

- [1] Santi P. Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks[J]. ACM Comp. Surveys, 2005, 37(2): 164-194.
- [2] Li Ning, Hou J C, Sha Lui. Design and Analysis of an MST-based Topology Control Algorithm[C]//Proc. of IEEE INFOCOM'03. San Francisco, CA: [s. n.], 2003: 1702-1712.
- [3] Li L E, 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] Blough D M, Leoncini M, Resta G, et al. The K-Neigh Protocol for Symmetric Topology Control in Ad Hoc Networks[C]//Proc. of ACM MobiHoc. Anapolis, USA: ACM Press, 2003: 145-152.
- [5] 王 炫, 李建东, 张文柱. 拓扑控制对 Ad Hoc 网络性能的影响[J]. 计算机科学, 2006, 33(6):44-47.
- [6] 贺 鹏, 李建东, 陈彦辉, 等. Ad Hoc 网络中基于方向性天线的分布式拓扑控制算法[J]. 软件学报, 2007, 18(6): 1308-1318.
- [7] 陈 敏. OPNET 网络仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [8] Wang Yu, Li Xiangyang. Localized Construction of Bounded Degree Planar Spanner for Wireless Networks[C]//Proc. of the DIALM-POMC Joint Workshop on Foundations of Mobile Computing. San Diego, USA: [s. n.], 2003: 59-68.
- [9] 陈文斌, 李晓鸿, 王 东, 等. 无线自组网拓扑控制算法研究和性能分析[C]//第十二届全国容错计算学术会议论文集. 石家庄: 半导体技术杂志社, 2007: 16-21.

编辑 任吉慧