

无线自组网的拓扑控制策略研究进展^{*})

王方伟^{1,2} 张运凯¹ 丁振国³ 马建峰²

(河北师范大学网络信息中心 石家庄 050016)¹

(西安电子科技大学计算机网络与信息安全教育部重点实验室 西安 710071)²

(西安电子科技大学网络教育学院 西安 710071)³

摘要 拓扑控制是无线自组网中最重要的技术之一,主要用来降低能量消耗和无线干扰,其目标是在降低能量消耗和无线干扰的前提下,控制网络节点间的通信串路和节点的传输范围,以提高全网的生命周期和效率,如连通性和对称性等。本文首先介绍了拓扑控制模型;然后给出了拓扑控制策略的分类,回顾了无线自组网拓扑控制策略的研究进展,并对有关策略进行了分析;最后给出了该领域的一些研究方向。

关键词 无线自组网,拓扑控制,能量消耗,网络管理

Research Development of Topology Control Strategies for Wireless Ad Hoc Networks

WANG Fang-Wei^{1,2} ZHANG Yun-Kai¹ DING Zhen-Guo³ MA Jian-Feng²

(Network Center, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016)¹

(Ministry of Education Key Laboratory of Computer Networks and Information Security, Xidian University, Xi'an 710071)²

(College of Network Education, Xidian University, Xi'an 710071)³

Abstract Topology control is one of the most important technologies which are used in wireless Ad hoc networks to reduce energy consumption and radio interference. Its goal is to control the communication links between network nodes and transmitting range of the nodes in order to prolong the life cycle of the whole network and improve its network efficiency, such as connectivity, symmetry, while reducing energy consumption and radio interference which have a strict effect on the transmitting range of the nodes. Firstly, topology control models are introduced. Secondly, a taxonomy of topology control techniques is provided, the progress of the topology control technologies is surveyed, and various topology control strategies are described. Finally, several directions of further research are suggested.

Keywords Wireless Ad hoc networks, Topology control, Energy consumption, Network management

1 引言

无线自组网是一种新型网络,是由一组带有无线收发装置的移动终端组成的多跳临时性自治系统^[1],不需要网络中心,可以随时、随地无需任何基站的支持,快速构建的一个移动通信网络。其最初的设计目的是为了军事应用,可以在不利用现有网络基础设施的情况下提供一种通信支撑环境,是一种有效的网络拓展或无线中继方式。1997年,IEEE802.11标准委员会首次采用“Ad Hoc网络”一词来描绘这种特殊的对等无线移动网络。Ad Hoc网络由大量独立自主的节点构成,所有节点同时兼有主机和路由器的功能。作为主机主要是运行面向用户的应用程序,提供用户使用网络的人机接口;作为路由器,主要是运行相应的路由协议,为不能直接通信的两个主机担负中转的功能,进行分组转发和路由维护工作。上述这些特点使得自组网成为无线网络和移动计算领域的研究热点。其关键技术有网络管理、移动管理、拓扑控制、能量保护、路由协议等,其中拓扑控制问题至关重要,它影响到整个网络的性能,这是因为网络中的节点可以以任意速度和任意方式移动,加上无线发送装置发送功率的变化、无线信道间

的互相干扰因素、地形等综合因素影响下,节点间通过无线信道形成的网络拓扑结构可以随时发生变化而且变化的方式和速度都是不可预测的,这更加重了无线自组网拓扑控制的难度。国内外学者对无线自组网进行了深入研究,已经取得了一些研究成果,但在拓扑控制方面的成果比较少,还处于起步和实验室阶段,距离实际应用还有段距离,对其研究任重而道远。

2 无线自组网的拓扑控制模型

一般把无线自组网抽象为2维或3维欧式空间(Euclidean Space)内点的集合^[2~4],其中每个点代表一个网络节点。节点的结构表示为 $S_d = (N, F)$,其中 $d=2,3$, N 为网络节点的集合,节点总数 $n = |N|$, $F: N \times T \rightarrow [0, l]^d$ 为网络节点的位置函数,它决定了在 d 维欧式空间内每个网络节点在 t 时刻的物理位置,其中 T 为时间, $l > 0$ 为 d 维立方体的边长。如果网络节点 $i \in N$ 的物理位置不随时间变化而变化, i 就称作固定节点。如果所有网络节点都是固定节点,那么这个网络就称作固定网络,位置函数 F 可以简化为 $P: N \rightarrow [0, l]^d$ 。

无线自组网 $S_d = (N, F)$ 中的节点覆盖范围分配方案

^{*})国家863计划项目(2002AA143021)、河北省自然科学基金项目(F2006000177)、河北省教育厅科技基金(2004445)。王方伟 博士生,讲师,主要研究领域为网络信息安全;张运凯 博士,教授,主要研究领域为网络信息安全;丁振国 博士,教授,主要研究领域为网络信息安全;马建峰 博士,教授,博士生导师,主要研究领域为密码学、网络信息安全等。

(Range Assignment, RA)可以表示为 $RA : N \rightarrow (0, r_{max})$, 它为每个网络节点分配一个数值 $r \in (0, r_{max})$, 用以表示这个节点的无线信号传输范围, r_{max} 称作网络节点的最大传输范围, 它的大小主要取决于无线收发器的性能。为了方便起见, 现假设所有收发器的 r_{max} 都相等。

如果网络节点 i 要向节点 j 正确传送数据, 其功率必须满足如下不等式:

$$p_i / d_{i,j}^\alpha \geq \beta \quad (1)$$

其中 $\alpha \geq 2$ 为距离功率坡度 (distance-power gradient), $\beta \geq 1$ 表示传输质量, β 越大, 传输的质量越好, $d_{i,j}$ 表示节点 i 和 j 间的欧式距离。传输质量 β 通常设置为 1, 距离功率坡度 α 的大小主要取决于当时的环境, 在晴朗、空旷而且没有障碍物遮挡视线理想环境中, α 取为 2; 然而在现实环境中, 无线信号由于受到建筑物、地形和其他障碍物的影响会产生反射、散射、衍射现象, 所以通常取为 4^[5]。利用上面的公式, 覆盖范围分配 RA 的能量代价可以定义为

$$c(RA) = \sum_{i \in N} (RA(i))^\alpha \quad (2)$$

值得注意的是, 不等式 (1) 只考虑了发送端的功率消耗, 而在实际环境中, 接收端由于接收和解码所收到信号时消耗的功率也不能被忽略, 然而目前大多数文献并没有考虑这种情况。

知道了 $S_d = (N, F)$ 和覆盖范围分配 RA, 在时刻 t 无线自组网可以表示为有向图 $G_t = (N, E(t))$ 。如果 $RA(i) \geq d_{P(i,t), P(j,t)}$, 在节点 i 和 j 之间就存在一条有向边, 节点 j 称为节点 i 的邻居。如果 G_t 是强连通的, RA 就称作在时刻 t 是连通的。如果所有网络节点的传输范围都为 $r [r \in (0, r_{max})]$, 则 RA 称作 r 均匀 RA。在这种情况下, 无线自组网就可表示为无向图, $[i, j] \in E(t) \Leftrightarrow [j, i] \in E(t)$, 这种无线自组网模型通常称作单位圆图模型^[6]。如图 1 所示。

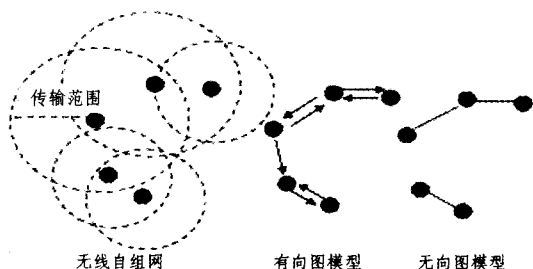


图 1 两个无线自组网的图模型

无线自组网的拓扑就是一些路由可达的串路集合, 其主要取决于无线收发器的地理位置、发射器的发射功率、无线干扰、天线的方向等因素。拓扑控制的目标是通过控制节点间的通信串路和结点的传输范围使生成的网络拓扑满足一定的性质, 以延长网络生命周期, 降低网络干扰, 提高吞吐率。一般把拓扑控制问题表示为一个三元组 $\langle M, GP, O \rangle$, 其中 $M \in \{\text{有向图, 无向图}\}$ 表示无线自组网的图模型, GP 表示预期的图属性, 如强连接、2 度连接等, $O \in \{\text{最大功率, 总功率}\}$ 表示要优化的目标。例如: 拓扑控制问题 $\langle \text{有向图, 强连接, 最大功率} \rangle$ 就表示有向图必须是强连通的, 而且使收发器的最大消耗功率必须最小。拓扑控制问题 $\langle \text{无向图, 2 度连通, 总功率} \rangle$ 要求无向图节点的连接度至少为 2, 而且所有收发器消耗的功率总和必须最小。

3 无线自组网的拓扑控制策略

拓扑控制策略在无线自组网中至关重要, 如果不采用拓

扑控制策略, 所有网络节点都将以最大传输功率工作, 这将严重影响自组网的整体性能: ①因为自组网的主机都是依靠电池提供能源, 如果以最大传输功率工作, 节点能量将迅速耗尽, 从而缩短自组网的生命周期; ②节点的传输功率越大, 它所覆盖的范围也越大, 导致网络拓扑将包含大量的边, 从而增加了路由计算的复杂度, 这对于承担路由器任务的网络主机来说是个巨大的挑战。③节点的无线信号将覆盖大量其它节点, 这将频繁引起无线干扰, 影响节点的通信质量, 降低整个网络的效率。因此, 迫切需要研究拓扑控制问题, 在降低能量消耗和无线干扰的前提下, 通过控制网络节点间的通信串路和结点的传输范围来延长网络生命周期, 提高网络效率。

拓扑控制策略应使网络拓扑满足下列性质中的一个或几个: ①连通性, 为了实现节点间的互通, 生成的拓扑必须保证连通性, 即从任何一个结点都可以发送消息到另外一个结点; ②对称性, 如果从节点 i 到节点 j 有一条边, 那么一定存在从节点 j 到节点 i 的边, 即 $[i, j] \in E(t) \Leftrightarrow [j, i] \in E(t)$ 。一般都要求生成的拓扑中串路是对称的。③稀疏性, 指生成的拓扑中的边数为 $O(n)$, 其中 n 是节点个数。减少拓扑中的边数可以有效减少网络的干扰, 提高网络的吞吐率, 还可以简化路由计算, 节省主机宝贵的资源。④Spanner 性质, 在生成的拓扑中任何两个节点间的距离小于它们在无向图中距离的常数倍。

3.1 拓扑控制策略的研究工具

目前拓扑控制策略的研究方法主要分为两种: ①几何法, 以几何结构为基础来构建网络的拓扑, 来满足无线自组网的某些特性。②概率法, 节点按照某种概率随机分布, 所生成的拓扑在以大概率满足某些性质的前提下, 使节点所需的传输功率最小和邻居节点数最少。

(1) 几何法

该方法使用的几何结构主要有最小生成树 (Minimum Spanning Tree, MST)、DT 图 (Delaunay Triangulation Graph)、相关邻居图 (Relative Neighborhood Graph, RNG), 这些方法将在 3.3 节详细分析和比较, 在此不再详述。

(2) 概率法

概率法经常采用的理论有连续渗透理论 (Continuum Percolation Theory)^[4]、占位理论 (Occupancy Theory)^[4] 和几何随机图理论 (Geometric Random Graph Theory)^[4]。在连续渗透理论中, 节点以 Poisson 密度 λ 分布在二维平面中, 如果节点间距离小于 r (覆盖范围), 则两个结点相连。因为连续渗透理论的模型与 Ad hoc 的网络模型吻合, 所以可以用连续渗透理论来分析 Ad hoc 网络的连通性。在占位理论中, 假设 n 个球独立地放入 C 个格子中。球放入格子中的放法由描述格子的某些属性的随机变量确定。占位理论的目标是确定当 n 和 C 趋近无穷时这些变量的概率分布。占位理论可以用于分析 Ad hoc 网络的连通性, 可以抽象为把区域 R 分割成 r^d 个大小相同的小格子 (d 为欧式空间的维数), 确定在这种情况下每个格子中至少有一个节点的概率。在几何随机图理论中, 节点按照某种概率密度分布在 d 维区域 R 中。许多科研人员研究了这种节点分布下的某些性质, 如到最近邻居的最长串路^[7], 欧式最小生成树中最长边的长度^[8]。Sant^[9] 使用几何随机图理论研究无线自组网的某些基本特性, 如连通性。几何随机图理论只适用于密集的 Ad hoc 网络。因为该理论假设节点的位置是固定的, 当节点个数趋于无穷时, 节点的密度也趋于无穷。

3.2 拓扑控制策略的分类

1972年,美国 DARPA (Defense Advanced Research Project Agency)启动了分组无线网项目,目的是研究其在战场环境下数据通信中的应用问题。为了解决无线自组网本身的一些局限性,如功率消耗和网络处理能力最优化问题,研究人员已经提出了许多拓扑控制策略。根据网络节点的传输范围 r 是否相同,我们把这些控制策略分为两类:同构拓扑控制和非同构拓扑控制。

所谓同构拓扑就是指所有网络节点的传输范围 r 都相同,这种拓扑控制问题就简化为在满足一定网络特性的前提下需要确定传输范围 r 的最小值,也就是临界传输范围(Critical Transmitting Range, CTR),这是理想状态下所采取的措施,是比较简单的。又根据网络节点的密集程度,进一步细分为稀疏网的拓扑控制和密集网的拓扑控制。但在实际环境中,由于受到内因(主机能源的差异)和外因(建筑物、地形和其他障碍物)的影响,所有网络节点的传输范围 r 不可能完全相同,所以一般无线自组网都是非同构的。根据生成拓扑时所需的信息类型不同,这类拓扑控制策略可以进一步细分为基于方向的拓扑控制策略、基于邻居节点的拓扑控制策略、基于位置的拓扑控制策略。如图2所示。

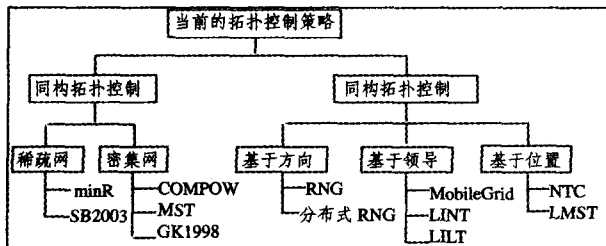


图2 拓扑控制策略的分类

3.3 拓扑控制策略

本节只涉及固定无线自组网中的有关拓扑控制策略,各策略性能比较见表1。

(1) 同构拓扑控制策略

为了更清楚的描述此类策略,首先定义临界传输范围(Critical Transmitting Range, CTR)。CTR:区域 $R=[0, l]^d$ ($d=2,3$)中放置有 n 个网络节点,在保证网络连通的条件下,所有节点的传输范围 r 最小应为多少。在很多情况下,动态调整网络节点的传输范围是不现实的,此时,为保证网络的连通性、降低功率消耗和增加网络容量,把所有节点的 r 都取相同的值是比较理想的选择,也是唯一可采用的方法。CTR的大小主要取决于节点的物理位置,如果事先知道节点的位置,CTR就可求出,等于欧式最小生成树最长边的长度。如果节点位置未知,则最小传输范围 $r \approx l\sqrt{d}$ 。

A) 稀疏自组网的拓扑控制

minR(Minimum Radius Graph):该策略得主要思想是逐步搜索能使全网保持连通的最小功率。先取一个最小值,然后检测网络是否连通,如果不连通,就逐步增加功率,直到网络连通。检测网络是否连通的复杂度为 $O(n^2)$ ^[10],整个策略的复杂度为 $O(n^2P)$,其中 P 为功率增加的次数。因这种策略假设所有网络节点都工作在相同的功率上,这会导致网络的功率冗余,对已经连通的节点产生副作用边,造成无线干扰。

SB2003(Santi-Blough 2003):Santi 和 Blough 在 2003 年

利用占位理论(Occupancy Theory)来分析稀疏自组网的 CTR 问题^[13]。文中证明:如果区域 R 中的 n 个节点随机均匀分布,并且 $r=l\sqrt[4]{c \log l/n}$ (c 为大于零的常数),则网络就以大概率保持连通。还证明了如果 $r \in O(l\sqrt[4]{1/n})$,则网络以大概率不连通。

B) 密集自组网的拓扑控制

COMPOW(Common Power level):其最主要的目标是提高网络吞吐量,同时考虑能量有效性。在保证网络连通的前提下,将全网的功率调整到最低值,以最大限度地提高网络吞吐量。其核心问题是如何设定全网的最佳公共发射功率。具体做法是每个节点都维护多个路由表,每个路由表对应着全网的一个公共功率量级,所有节点都以相同的功率发射,就产生了一个该功率量级下的网络拓扑。节点的最优功率就是路由表中的最小功率量级^[11]。COMPOW 克服了 minR 的缺点:传输功率冗余和无线干扰。在最坏情况下该策略的复杂度为 $O(Ln)$,其中 L 功率量级的数目。

最小生成树(MST):网络拓扑是以节点间的欧式距离为度量的最小生成树。节点的传输半径设为与该节点相邻的最长边的长度。以 MST 为拓扑的网络能保证网络的连通性。计算 MST 的常用算法有 Kruskal 算法和 Prim 算法^[12]。Kruskal 算法的主要思想是先把图中所有的边按升序排列,然后选择最小的边生成拓扑图。这个过程需要执行 $O(\log|E(z)|)$ 步,其中 $E(z)$ 为 t 时刻图的总边数,其复杂度为 $O(|E| \log|E|)$ 。而 Prim 算法在生成 MST 时,节点是任意放置的,如果新添加的边小于以前的边,就把这条边加到图中,复杂度为 $O(|E| + n \log n)$ 。

GK1998(Gupta-Kumar1998):几何随机图理论只适用于密集的 Ad hoc 网络,该理论假设放置节点的区域 R 是固定的,当结个数趋于无穷时,节点的密度也趋于无穷。Gupta 和 Kumar^[13]认为:在一个单位圆的区域 R 中,如果节点的传输范围设置为 $r = \sqrt{(\log n + c(n))/(\pi n)}$,则网络以大概率保持连通的充要条件为 $c(n) \rightarrow \infty$ 。

(2) 非同构拓扑控制策略

上面拓扑控制策略都是基于理想化的假设提出的,有一定的局限性,下面介绍一般情况下的一些策略,节点具有不同的传输范围。

A) 基于方向的拓扑控制

相关邻居图(Relative Neighbor Graph, RNG):在有 n 个节点的网络 $RNG(n)$ 中,如果节点 i 和 j 之间不存在满足 $d_{i,x} < d_{i,j}$ 且 $d_{j,x} < d_{j,i}$ 的节点 x ,就称节点 i 和 j 间的边是有效的。生成 MST 的常用算法有强力算法(brute-force algorithm)和 Supowit 算法。其复杂度分别为 $O(n^3)$ 和 $O(n \log n)$ ^[12]。

分布式 RNG:Chi-fu Huang 等^[14]提出了一个基于圆锥体的 RNG 分布式算法。在执行分布式 RNG 时,节点 i 不断增大发射功率直到发现没被覆盖区域中的最近的节点 j ,然后把边 $[i, j]$ 加入到 RNG 中,并计算节点 j 的角度 θ_j 。角度 θ_j 定义了一个节点 j 覆盖区域的圆锥体, θ 表示所有节点的角度集合,初始值为 0。把 θ_j 同集合 θ 合并,并重复整个过程直到覆盖节点 i 的整个区域(2π)。整个算法的复杂度为 $O(n \log n)$ 。

B) 基于邻居节点的拓扑控制

MobileGrid:是 Liu 等^[15]提出的一个带有竞争索引(Contention Index, CI)分布式算法,CI 为节点密度(ρ ,即单位

面积上的节点数)和区域面积(A)的乘积。为了维护全局的CI,所有节点必须把本地CI保持在一个特殊值上。第 i 个节点的本地CI用节点 i 的一跳邻居节点数目表示,每个节点需要查询特殊的优化表以便确定它所需要的最优CI值,然后根据CI值来动态调整传输范围。MobileGrid所用的CI值在3到9之间时网络容量最大,算法的复杂度为 $O(n)$ 。

LINT: LINT是由Ramanathan等^[16]提出的一个分布式算法,LINT利用路由协议收集的本地可用邻居信息来实现拓扑控制。所有节点都有三个参数:期望的节点度数 $deg\ ree_d$,节点度数上界 $deg\ ree_h$,节点度数下界 $deg\ ree_l$,并周期性地检测其活动邻居节点的数目。如果活动邻居节点数大于 $deg\ ree_d$,就减小其发射功率;反之,就增加发射功率,发射功率的增加/减小受其最大/最小功率限制。LINT类似于MobileGrid,其复杂度为 $O(n)$ 。

LILT: LILT是由Ramanathan等^[16]提出的另一个分布式算法,主要利用网络全局拓扑信息来发现和修复网络分割。因为能量的消耗和节点的移动可能造成网络常常被分割成几个部分,如节点可能为了节省能源而关机,节点也可能由于移动而到其他节点的覆盖范围之外,以及节点由于电池消耗殆尽导致网络出现分割。LILT主要由邻居减少协议(Neighbor Reduction Protocol, NRP)和邻居增加协议(Neighbor Addition Protocol, NAP)组成,NRP靠减少发射功率把节点度数保持在特定值上,而NAP靠增加功率来建立附加串路,检测邻居节点的复杂度为 $O(n)$ 。节点在收到路由更新要求时,执行NRP和NAP来检测网络是否连通,如果不连通,这个节点就要增加它的发射功率。整个LILT算法的复杂度为 $O(2n+|E|)$ 。

表1 各拓扑控制策略的性能比较

策略	种类	复杂度	表的数量	工作方式	优点
MinR	稀疏网	$O(n^2P)$	0	集中式	低功率、高容错
COMPOW	密集网	$O(Ln)$	L	分布式	低功率拓扑,抗干扰
MST	密集网	$O(E +n\log n)$	0	集中式	低功率拓扑
RNG	基于方向	$O(n\log n)$	0	集中式	低功率拓扑
分布式RNG	基于方向	$O(n\log n)$	1	分布式	低功率拓扑,自主性强
MobileGrid	邻居节点	$O(n)$	1	分布式	低功率、自主性强
LINT	邻居节点	$O(n)$	1	分布式	低功率、低AP、自主性强
LILT	邻居节点	$O(2n+ E)$	1	分布式	低功率、自主性强
NTC	基于位置	$O(E ^2\log E)$	0	集中式	低功率、高容错

说明:表1中的AP指清晰度点(Articulation Points)。

C)基于位置的拓扑控制

NTC(Noble Topology Algorithm): NTC是由Hu^[17]在1998年提出来的,其主要思路是利用改进的DT图(Delaunay Triangulation Graph)来达到所期望的网络容量和连通性,DT图提供了一个可靠的拓扑主干。先把图中的边以降序排列,然后把大于长度 R 的边都删除。排序操作是该算法的瓶颈,计算所需要的时间比较多。整个算法的复杂度为 $O(|E|^2\log|E|)$ 。

LMST(Localized MST): Li等^[18]提出了一个基于位置建

立MST拓扑的分布式算法。文中证明:①利用LMST产生的拓扑图是强连通的;②拓扑图中节点度数最多为6;③删除不影响网络连通性的非对称串路后,所得的拓扑图是对称的。

总结和研究展望 本文主要从同构拓扑和非同构拓扑两个角度比较全面地介绍了无线自组网的各种拓扑控制策略,并对其进行了较为系统的分类。近年来拓扑控制策略已成为无线自组网研究的热点,但目前这个领域中还存在着一些迫切需要解决的问题。首先,无线自组网的模型过于理想化。为了得到更符合实际的量化结果,需要研究更真实的模型,以便如实反映实际情况。其次,结点的分布假设过于理想化。绝大多数研究都假定节点是均匀分布的,虽然在某些情况下这种假设是合理的,但在大多数情况下这样的假设是过于理想化的。第三,基于干扰的拓扑控制研究。目前的文献主要研究基于能量消耗的拓扑控制,而基于干扰的策略很少,降低能量消耗和干扰是相互矛盾的,应研究如何折中这对矛盾,以便提高网络容量。最后,时序拓扑控制的研究。网络由于某种原因会经常导致拓扑结构发生变化,如果周期性地更新串路信息,会浪费节点宝贵的计算资源。这就要求必须有某种有效机制来更新串路信息,以便快速重构网络拓扑。

参考文献

- Macker J P, Corson M S. Mobile Ad Hoc Networking and the IETF [J]. Mobile Computing and Communications Review, 1998, 2(4): 9~15
- Rajaraman R. Topology control and routing in Ad hoc network: a survey [J]. SIGACT News, 2002, 33(2): 60~73
- Liu Rui. Topology control for Ad hoc networks: [Ph D dissertation]. University of Delaware, 2004
- Santi P. Topology control in wireless Ad hoc and sensor networks [J]. ACM Computing Surveys, 2005, 37(2): 164~194
- Rappaport T. Wireless Communications: principles and practice, second edition [M]. 北京:电子工业出版社, 2004
- Sen A, Huson M. A new model for scheduling packet radio networks [A]. In: IEEE INFOCOM [C]. Philadelphia, PA, USA: IEEE Press, 1996. 1116~1124
- Penrose M. On k-connectivity for a geometric random graph [J]. Rand Struct Algorithm, 1999, 15(2): 145~164
- Penrose M. A strong law for the longest edge of the minimal spanning tree. The Annals of Probability, 1999, 27(1): 246~260
- Santi P. The critical transmitting range for connectivity in mobile ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 4(3): 310~317
- Jennings E, Okino C. Topology control for efficient information dissemination in ad-hoc networks [A]. In: SPECTS'02 [C], San Diego, California, 2002. 1~7
- Santi P, Blough D. The critical transmitting range for connectivity in sparse wireless ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003, 2(1): 25~39
- Srivastava G, Boustead P, Chicharo F. A comparison of topology control algorithm for ad hoc networks [A]. In: Australian Telecommunications Networks Applications Conference [C], Melbourne, Australia: ACM Press, 2003. 1~5
- Gupta P, Kumar P. Critical power for asymptotic connectivity in wireless networks. In: Stochastic Analysis, Control, Optimization and Applications [M], Boston: Birkpauser, 1998. 547~566
- Huang Chi-fu, Tseng Yu-chee, Wu Shih-lin, et al. Distributed topology control algorithm for multihop wireless networks [A]. In: Proc. of International Joint Conference on Neural Networks [C], Honolulu, Hawaii, IEEE Press, 2002. 355~360
- Liu Ji-lei, Li Bao-chun. Mobilegrid: capacity-aware topology control in mobile ad hoc networks [A]. 见: ICCCN'02 [C], Miami, Florida, U. S. A, IEEE Press, 2002. 570~574
- Ramanathan R, Rosales-Hain R. Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment [A]. IEEE Infocom [C], Tel Aviv, Israel: IEEE Press, 2000. 404~413
- Hu L. Topology control for multihop packet radio networks. IEEE Transactions on Communications, 1993, 41(10): 1474~1481
- Li N, Hou J, Sha J. Design and analysis of an mst-based topology control algorithm [A]. In: IEEE INFOCOM [C], San Francisco, USA: IEEE Press, 2003. 1702~1712