

# 一种基于随机波束天线的自组网拓扑控制协议

李晓鸿 张大方 陈文斌 王 东

(湖南大学信息科学与工程学院 长沙 410082)

**摘 要** 定向天线能显著提高无线系统的性能和容量,但采用定向天线的自组网拓扑构建问题比全向天线网络复杂,拓扑控制是一种保证网络连通和节能的有效手段,文中通过对随机波束自组网连通问题定性和定量的分析研究,运用样方统计法推导保证拓扑图高概率连通的临界邻居数;在此基础上,提出了一种基于邻居数的分布式拓扑控制协议,节点独立确定天线波束的朝向和信号发送功率大小,使得天线覆盖邻居节点个数等于(或略小于)预先设定的临界邻居数,该协议的特点是获取邻居信息的代价小,且运行简单,仿真结果表明:新协议在维护网络高概率连通的同时保证了节点最小能量特性;在节点能耗和网络传输性能等方面均优于全向天线基于邻居数的拓扑控制协议。

**关键词** 自组网;定向天线;拓扑控制;能量效率;吞吐率

**中图法分类号** TP393 **DOI号**: 10.3724/SP.J.1016.2011.01342

## An Energy Efficient Topology Control Protocol for Ad Hoc Networks Utilizing Randomized Beamforming

LI Xiao-Hong ZHANG Da-Fang CHEN Wen-Bin WANG Dong

(College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082)

**Abstract** Directional antennas have received considerable attention in the last few years due to the spatial-reuse they provide which increases the potential capacity of wireless networks. But the topological connectivity of beamforming antennas in multi-hop wireless networks is more complicated than topologies for wireless networks with omni-directional antennas. Topology control aims to maintain network connectivity and reduce energy consumption for Ad hoc networks using directional antennas. In this paper, the authors employ quadrat statistical methods to derive analytical expressions to determine the critical neighbor number for randomized beamforming network model. A distributed neighbor-based topology control protocol, referred to as the RBNTC, is proposed to maintain the outdegree of every node equal to or slightly below a specific value  $K$ . The protocol exchanges exactly bound messages; another positive feature is that it is based on distance estimation only, which can be implemented at a reasonable cost. Extensive simulations are carried out, which show that the RBNTC is to achieve a high probability (more than 99%) of connectivity while constructing a wireless network topology with minimum-energy property. Simulation results show that the proposed protocol achieves considerably better performance than the topology control protocol  $K$ -Neigh based on omni-directional antennas in terms of power efficiency and traffic carrying capacity of the network.

**Keywords** ad hoc networks; directional antennas; topology control; energy efficient; throughput

收稿日期:2008-06-26;最终修改稿收到日期:2009-11-05. 本课题得到国家自然科学基金(90718008,61003305)、国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2007CB310702)资助. 李晓鸿,男,1973年生,博士,讲师,中国计算机学会会员,主要研究方向为网络管理、无线网络和拓扑控制. E-mail: lixhong@263.net. 张大方,男,1959年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为可信系统与网络、网络测试、软件容错、软件测试. 陈文斌,男,1983年生,硕士研究生,主要研究方向为无线网络拓扑控制. 王 东,男,1964年生,博士,教授,中国计算机学会高级会员,主要研究领域为网络测试与性能评估、无线网络和移动计算等.

## 1 引言

自组网作为一种无中心、自组织的多跳无线网络,由于其具有抗毁性、自组织性与机动性等特点,在无线通信领域发挥着越来越重要的作用.为保证自组网能即时、通畅和高效通信,提高自组网的传输能力和减少节点的能耗是自组网面临的关键问题<sup>[1-2]</sup>.

自组网中的拓扑控制技术是指在维持拓扑的全局优化(如连通性)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网络拓扑.文献[3-4]对目前几类经典的拓扑控制算法的仿真实验表明,拓扑控制生成的拓扑图都保证连通且具有较小的节点度和传输半径,这样不但可以节省通信能量、简化网络拓扑,还可以减少节点在无线信道上的碰撞,提高信道的空间复用度,最终提高整个网络的传输性能.其中基于邻居个数信息的拓扑控制算法,由于获取信息开销小,因此具有较强的实用性<sup>[5-6]</sup>,但是这些拓扑控制算法都是假设自组网节点使用全向天线.与全向天线相比,智能天线技术中的定向天线阵列<sup>[7]</sup>具有灵活的波束控制、高的信号增益、极强的干扰抑制能力以及高的空间分辨能力等优点,可以极大地提高无线信道资源的空间复用度.另外,在相同的发送功率的情况下,定向天线在主瓣方向上具有比全向天线更远覆盖距离.文献[8-9]表明,在相同场景下,节点使用定向天线将比全向天线更加能提高无线自组网的传输能力,并减小端到端的延迟.

智能天线技术和拓扑控制技术作为提高系统资源利用率的有效方法正得到人们的日益关注.研究这两种技术在自组网中的应用,更是当今热门的课题.

定向天线自组网的拓扑控制方法<sup>[10-12]</sup>,基本思想都是预先假设天线为全向天线,利用已有的全向天线拓扑控制算法求得每个节点的逻辑邻居后,根据逻辑邻居的方位,利用多波束转换天线的特性打开合适的天线扇区,实现网络连通.但是,对于自适应波束定向天线<sup>[7]</sup>,由于天线形成的增益方向性强,使得上述的拓扑控制策略很难适用于自适应波束天线自组网.

本文针对自适应波束天线,设计随机波束自组网模型,研究拓扑控制策略以保证网络连通和提高自组网性能.运用样方统计法对网络拓扑进行连通

性理论分析和实验验证,推导出保证网络高概率连通的临界邻居数;在此基础上,提出一种分布式拓扑控制协议——随机波束  $K$  邻居协议(Randomized Beamforming  $K$ -Neigh Topology Control, RBNTC).主要思想是,每个节点独立确定天线波束的朝向,获得邻近节点的数量信息后,调整发送功率大小,构建一个节点度等于(或略小于)临界邻居数的拓扑图.RBNTC 只需要获取邻居个数信息,具有获取信息开销小、实用性较强的特点.仿真结果表明,RBNTC 拓扑控制协议可保证网络高概率连通;在减小节点能耗和提高网络传输性能等方面均优于全向天线基于邻居数的拓扑控制协议.

## 2 随机波束网络模型

### 2.1 天线和波束模型

随着数字信号处理技术和天线阵列技术的发展,定向天线的成本和设备大小已经可以应用于体积较小的无线设备<sup>[8]</sup>.定向天线按照波束形成方法分为多波束转换天线和通信功能更加强大的自适应波束天线两大类<sup>[7]</sup>.自适应波束天线采用更加复杂的天线阵列和数字信号处理技术识别邻近节点的方向,快速形成并调整主瓣波束的朝向,覆盖希望通信的邻近节点.本文假设所有节点分布在一个二维平面中,节点使用均匀圆阵的自适应天线.均匀圆阵的天线增益公式<sup>[13]</sup>为

$$g_N(\phi) = N \times [J_0(k\rho) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} J_{mN}(k\rho) \cos[mN(\pi/2 - \xi)]]^2 \quad (1)$$

其中,  $N$  是阵元数,  $k$  是自由空间波数,  $J_m(x)$  是第一类  $m$  阶 Bessel 函数.

$$\rho = R \sqrt{(\cos\phi - \cos\phi_0)^2 + (\sin\phi - \sin\phi_0)^2},$$

$\phi_0$  是波束主瓣的朝向,  $\xi = \tan^{-1}[(\sin\phi - \sin\phi_0)/(\cos\phi - \cos\phi_0)]$ . 图 1(a) 是主瓣朝向  $\phi_0$  为  $0^\circ$  时 6 阵元均匀圆阵的增益模式. 由式(1)可知,波束天线会在某个朝向上形成一个主瓣,而在其余方向上形成多个旁瓣,一个  $M$  元自适应天线阵在主瓣方向上可以提供  $M$  倍的全向天线增益,而旁瓣的增益大多比全向天线小<sup>[14-15]</sup>. 为便于讨论,本文假设每个节点使用的波束天线增益如图 1(b) 所示,  $\phi_0$  表示波束的朝向;  $\theta$  表示主瓣波束的宽度;  $G_m$  表示主瓣的天线增益,  $G_s$  表示旁瓣的天线增益,且满足  $0 < G_s \leq 1 \leq G_m$  关系,而当  $G_m = G_s = 1$  时则表示全向天线增益模式.

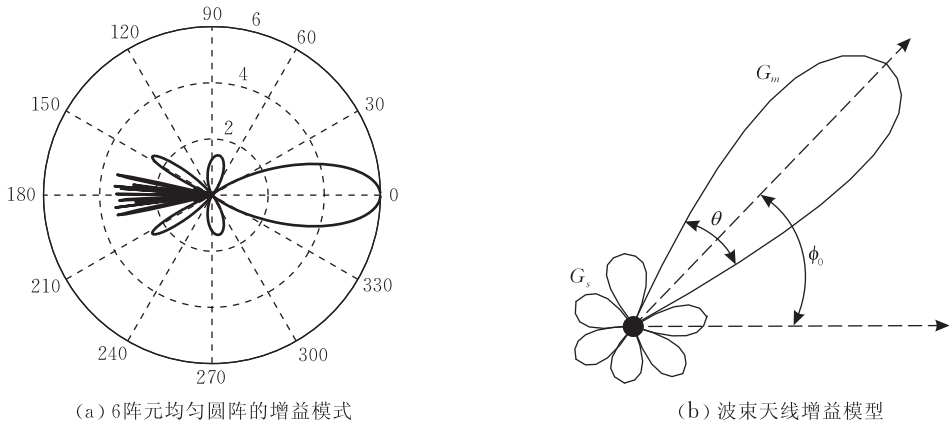


图 1 自适应波束天线增益模型

## 2.2 链路模型

如图 2 所示,节点采用波束天线,在发送和接收信号时都采用相同的增益模式. 信号的发送功率  $P_t$  和接受功率  $P_r$  的关系为

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^\alpha L} \quad (2)$$

其中,  $G_t, G_r$  分别是发送、接收天线的增益,  $\lambda$  是波长,  $d$  是发送节点与接收节点之间的距离,  $\alpha$  是路径损耗因子 ( $\alpha \geq 2$ ),  $L$  为系统损耗因子 ( $L \geq 1$ ). 假设传输介质是对称的, 所有节点的信号功率接收阈值  $P_{r_0}$  相等, 那么如果  $P_r$  大于或等于  $P_{r_0}$  时, 信号才能被正确接收, 即表示两个节点之间可以建立对称链路. 同时, 在通信过程中, 如果接收节点能获取发送节点的发送功率和节点之间天线的增益, 那么根据实际信号接收功率可利用式(2)计算出节点间的距离. 假设在全向天线模式时, 节点之间能够建立链路关系的最大距离是  $d_0$ , 若不改变发送功率, 在波束天线模式时, 能够建立链路关系的最大距离则为  $d_0 \sqrt[\alpha]{G_t G_r}$ , 如果  $G_t G_r$  大于 1, 天线的增益使得节点可以与更远的节点建立链路.

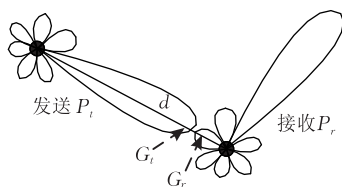


图 2 链路模型(发送和接收节点均采用波束天线)

## 2.3 随机波束网络模型

由式(2)可知, 如果节点能获得邻近节点的位置, 那么可以根据式(1)调整主瓣波束朝向合适的方向, 构建优化的拓扑结构. 但需要增加用于定向邻居发现的额外信号和计算信号波达方向的处理开销, 为了优化多跳路径性能还要求多个节点使用复杂的

协议进行协调. 本文为了设计一种能有效适用于自组网的完全分布式的拓扑构建方法, 采用了一种简单的波束形成模式, 每个节点采用阵列天线形成定向波束, 主瓣波束宽度都相等, 且恒定不变, 波束朝向  $\phi_0$  是  $[0, 2\pi]$  中的一个随机值, 且完全独立于网络中的其它节点. 波束的增益模式一旦确定就固定不变, 且用于信号的发送和接受. 每个节点的最大发送功率  $P_{\max}$  和信号接受功率阈值  $P_{r_0}$  相同, 但可以独立调整发送功率  $P_t$  的大小. 这种无线网络模型称为随机波束网络模型.

## 2.4 随机波束模型中节点的通信区域

为了便于讨论, 设  $r_0$  为全向天线在传输功率等于  $P_t$  时的覆盖半径. 假设功率不变且波束天线在各个波瓣区域内的增益为定值, 在随机波束网络模型中, 设  $r_{mm}, r_{ms}$  和  $r_{ss}$  分别为两个节点的主瓣互相朝向对方、仅有一个节点的主瓣朝向对方和两个节点的主瓣互不朝向对方时的直接通信距离. 根据式(2), 可以得到  $r_{mm} = r_0 \sqrt[\alpha]{G_m G_m}$ ,  $r_{ms} = r_0 \sqrt[\alpha]{G_m G_s}$  和  $r_{ss} = r_0 \sqrt[\alpha]{G_s G_s}$ .

**定义 1.** 随机波束模型中, 每个节点可以与周围邻近节点互相直接通信的范围, 称为节点的有效区域  $S$ .

如图 3 所示, 节点  $u$  的有效区域由 3 个部分构成: I 区中所有节点都可以与节点  $u$  直接通信, 其范围为  $S_I = \pi r_{ss}^2 + \theta(r_{ms}^2 - r_{ss}^2)/2$ . II 区和 III 区中, 只有主瓣朝向节点  $u$  的节点可以与节点  $u$  直接通信, 而在随机波束网络模型中, 某节点主瓣朝向节点  $u$  的概率为  $\theta/2\pi$ , 则  $S_{II} = [(2\pi - \theta)(r_{ms}^2 - r_{ss}^2)/2]\theta/2\pi$ ,  $S_{III} = [\theta(r_{mm}^2 - r_{ms}^2)/2]\theta/2\pi$ . 所以, 节点  $u$  的有效区域的范围为  $S = S_I + S_{II} + S_{III}$ . 在有效区域  $S$  中, 可以与  $u$  建立直接双向链路关系的节点数, 即为节点  $u$  的度.

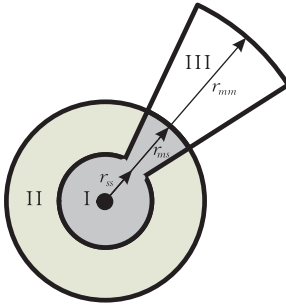


图3 随机波束网络模型中节点的有效直接通信区域

### 3 随机波束网络连通性研究

在保证网络连通的基础上,如何最小化节点的度(即关键邻居数)是无线自组网的一个基本问题,也是基于邻居数拓扑控制技术研究的前提<sup>[3]</sup>.针对全向天线自组网,文献[16]证明如果每个节点连接最近距离的邻居数超过  $5.1774 \log n$ ,那么当  $n$  趋向无穷大时自组网连通的概率趋向 1.文献[5]则通过仿真实验发现保证自组网高概率连通(节点数在 50~500 之间)的关键邻居数为 9~11.

与全向天线信号覆盖区域被模型化为一个圆形碟子相比,随机波束天线模型使得自组网连通问题的研究更加复杂<sup>[14]</sup>.近几年一些学者开始关注波束天线对自组网连通性的影响.相比全向天线,文献[14]通过仿真发现随机波束天线可以提高自组网的连通性.文献[15]则进一步定性和定量分析了随机波束天线的物理参数(如天线阵列的阵元数、信号传播路径损耗和衰落)对自组网连通性的影响,确定了能提高网络连通性的天线参数范围.文献[8-9]表明,在相同场景下,节点使用定向天线将比全向天线能提高无线自组网的传输能力,并减小端到端的延迟.这些成果为研究基于随机波束天线的拓扑控制技术奠定了基础.

随机波束自组网拓扑控制问题是指,在随机波束网络模型中,如果每个节点可以独立调整自己的发送功率,那么如何减小发送功率,在保证整个拓扑图连通的基础上,减小能耗和优化网络性能.为了求取节点合适的发送功率,下面讨论保证随机波束网络连通的关键邻居数问题.

本文采用样方统计法,在有一定大小的面积上测量个体数量,通过统计方法,从而确定观测对象个体的密度或者组成.如果节点是均匀分布的,基于这种统计模型,位于样方区域  $A$  中的点数服从参数为  $\lambda \|A\|$  的泊松分布(其中  $\|A\|$  表示区域  $A$  的面积,  $\lambda$

表示泊松过程的密度(intensity))<sup>[17]</sup>.基于这个模型,设随机波束网络中  $n$  个节点均匀分布在一个很大的区域  $M$  中,节点密度  $\rho = n / \|M\|$ .令节点的有效区域  $S$  作为样方,那么  $S$  中的节点个数服从均值为  $\rho S$  的泊松分布,有效区域  $S$  中的节点数目的概率密度函数为

$$P(K) = \frac{e^{-\rho S} (\rho S)^K}{K!} \quad (3)$$

由式(3),可以得到节点  $u$  的天线没有覆盖一个节点的概率为

$$P(K=0) = e^{-\rho S} \quad (4)$$

利用随机几何学<sup>[18]</sup>中关于点覆盖问题的概念,一个节点不被其它节点的天线有效区域覆盖的概率为  $(1 - \|S\| / \|M\|)^n$ .当  $\|M\|$  趋向无穷大时,

$$P(\text{节点 } u \text{ 不被其它节点天线覆盖}) = E \left[ \left( 1 - \frac{\|S\|}{\|M\|} \right)^n \right] = e^{-\frac{\|S\| E(n)}{\|M\|}} = e^{-\rho S} \quad (5)$$

由式(4)和(5)可以得到节点  $u$  的度大于 0 的概率为

$$P(d(u) > 0) = 1 - e^{-2\rho S} \quad (6)$$

假设统计方法满足独立无关性,那么在一个很大的区域  $M$  中均匀分布  $n$  个点,图  $G$  没有孤立节点的概率为

$$P = \binom{n}{n} P(d(u) > 0)^n P(d(u) = 0)^0 = (1 - e^{-2\rho S})^n \quad (7)$$

当  $n \gg 1$  时,图连通的概率近似等于图没有孤立点的概率<sup>[19]</sup>.利用推导的式(7)可以证明定理 1,求得随机波束网络,图连通概率至少为  $P$  的节点临界覆盖区域的下限.

**定理 1.** 设  $n(n \gg 1)$  个节点均匀分布在一个很大的区域  $M$  中,节点密度为  $\rho$ .定向天线随机选择一个朝向,天线的有效区域为  $S$ .如果要保证网络连通概率至少为  $P$ ,那么节点传输功率必须使得节点的有效区域  $S$  满足下面的公式

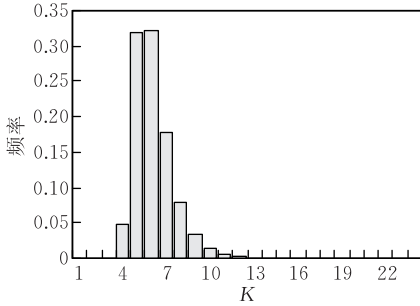
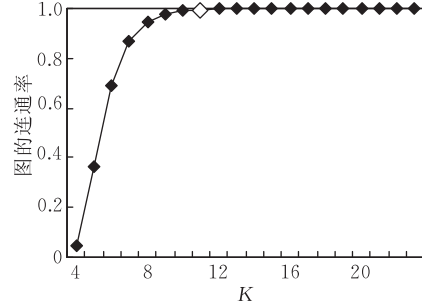
$$S \geq \frac{-\ln(1 - P^{1/n})}{2\rho} \quad (8)$$

由式(8),令节点天线有效区域  $S$  等于图连通概率为  $P$  的临界覆盖范围,利用式(3)可以得到定理 2,求得图  $G$  中节点最大覆盖节点数的概率分布.

**定理 2.** 设  $n(n \gg 1)$  个节点均匀分布在一个很大的区域  $M$  中,节点密度为  $\rho$ .天线波束随机选择一个朝向,有效区域为  $S$ ,那么图  $G$  所有节点的最大覆盖节点数  $K(G)$  小于等于  $k_0$  的概率  $P$  满足下面的公式

$$P(K(G) \leq k_0) = \left( \sum_{k=0}^{k_0} \frac{e^{-\rho S} (\rho S)^k}{k!} \right)^n \quad (9)$$

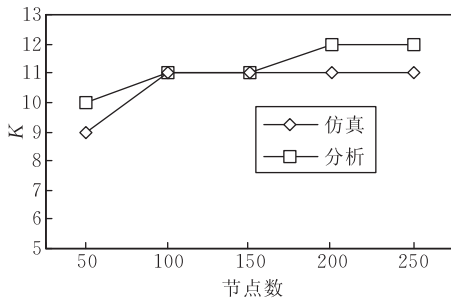
定义临界邻居数  $K$  表示保证拓扑图高概率连通 ( $\geq 99\%$ ) 时最小的覆盖邻居节点数. 对于不同的节点数  $n$ , 利用式(8)计算出图连通概率  $99\%$  时的有效区域  $S$ , 然后代入式(9)计算满足  $P(K(G) \leq k_0) > 99\%$  的最小的  $k_0$  值, 可以求出保证图  $99\%$  以上概率连通的临界邻居数  $K$ .

(a)  $K$  的分布

(b) 拓扑图连通概率的变化

图 4  $n=150$  时, 拓扑图连通的临界邻居数  $K$  的分布及随  $K$  值变化时拓扑图连通概率的变化

图 5 是临界邻居数  $K$  值随节点个数变化的仿真结果与理论分析结果的比较. 通过实验结果的分析, 可以发现随着节点数增加,  $K$  值的增加趋势较为平缓, 临界邻居数的变化趋势与定性分析的结果基本吻合.

图 5 对于不同的节点数, 保证图  $99\%$  以上概率连通的最小的  $K$  值的变化趋势

## 4 随机波束 $K$ 邻居拓扑控制协议描述

通过对图 5 的观察, 可以发现  $K$  值的增加趋势较为平缓. 在随机波束自组网中存在特定的临界邻居数  $K$ , 设置  $K=12$  时可以保证拓扑图的连通概率大于  $99\%$ . 由此提出一种随机波束  $K$  邻居拓扑控制策略 RBNTC, 节点调整信号波束覆盖范围仅仅覆盖  $K$  个邻居, 既能保证拓扑图高概率连通, 又能提高节点的能量有效性. 而且为了保证实用性, 提出的拓扑控制策略具有分布式、异步和基于局部信息的

下面通过模拟实验验证临界邻居数的有效性. 在  $1000\text{m} \times 1000\text{m}$  的区域内均匀分布节点, 节点数从  $50 \sim 250$  之间变化. 根据式(1), 设置节点天线主瓣波束宽度  $\theta=60^\circ$ , 波束  $G_m=4$ ,  $G_s=0.8$ <sup>[14-15]</sup>. 对于每一种节点数  $n$ , 每个节点随机选择天线主瓣的朝向, 生成 60000 幅连通拓扑图, 对每个生成拓扑图求出并记录满足图连通的最小覆盖节点数  $K$ . 图 4 说明  $n=150$  时,  $K \geq 11$  时拓扑图连通概率  $99\%$ .

特点, 这些特性可以减小获取拓扑控制算法需要的信息和消息交互的开销, 提高算法运行效率<sup>[6]</sup>.

设  $P_{\max}$  表示节点的最大发射功率, 假设所有节点设置发送功率为  $P_{\max}$  能够保证网络拓扑连通.  $P_{\text{opt}}(u)$  表示节点  $u$  的最优发射功率.

RBNTC 策略分为邻居发现和邻居选择两个过程. 对于自组网中的每个节点  $u$ , 节点可以在不同时间启动 RBNTC 策略. 但是所有节点启动的时间间隔要小于一个常数  $\Delta$ . 节点  $u$  在  $t$  时刻激活 ( $t_u \in [0, \Delta]$ ), 随机选择一个波束朝向  $\Phi$  ( $\Phi \in [0, 2\pi]$ ). 首先执行如下邻居发现过程:

1. 假设节点在时间间隔  $[t_u + \Delta, t_u + \Delta + d]$  内能够竞争到无线信道, 以初始功率  $P_{\max}$  周期性通告自己的标志信息, 信息中包含了节点  $u$  的 ID 号以及此时节点  $u$  的发射功率  $P_{\max}(u)$ .

2. 对于接收到的其它节点  $v$  发送的通告信息, 获取接收信号的功率, 根据式(2)求得节点  $u$  发包给  $v$  的最小发送功率  $P(u, v)$ ;

3. 节点  $u$  把邻居节点  $v$  的 ID 和  $P(u, v)$  存入其本地邻居节点集  $N_E(u)$ , 并按照最小发送功率  $P(u, v)$  递增的次序排序 [设  $\tau$  为步 2 和步 3 执行时间的上限].

4. 根据文献<sup>[5]</sup>, 最多需  $2\Delta + d + \tau$ , 邻居发现过程结束, 所有节点分别执行邻居选择过程. 节点  $u$  在  $N_E(u)$  中选取其中所需发射功率最小的  $K$  个节点的 ID 加入标志信息中 (如果邻居数小于  $K$  个, 则把所有邻居 ID 加入标志信息中), 采用第一步的方法通告.

5. 节点  $u$  对于接收到的其它节点  $v$  发送的通告信息,

若(邻居选择)通告信息中包含  $u$  的 ID, 把其本地邻节点集  $N_E(u)$  中邻节点  $v$  的 ID 标记为对称邻居。

6. 最多需  $4\Delta + 2d + \tau$ , 所有节点的邻居选择过程结束<sup>[5]</sup>. 每个节点  $u$  以各自邻节点集中到最远的对称相邻节点所需的功率为最优发射功率  $P_{opt}(u)$ .

RBNTC 策略的步 1 保证此算法为分布式算法, 步 2 和步 5 说明每个节点只需收集自己局部的信息, 即收集与邻居节点有效通信的功率信息统计邻居个数信息, 由于获取信息开销小, 使得这类拓扑控制策略具有较强的实用性, 且每个节点只需发送

两次有效通告消息, 使得算法需要的消息交互开销为  $O(n)$ <sup>[5-6]</sup>. 根据文献[5]中的定理 2, 算法步 5 经过拓扑边对称化处理后仍然能保证网络高概率连通。

为了提高 RBNTC 的实用性, 本文将其与 MAC 协议结合, 实现有效支持拓扑控制应用的 MAC 协议. 基于网络仿真工具 OPNET Modeler<sup>[20]</sup>, 结合拓扑控制策略和 IEEE 802.11 CSMA/CA DCF 机制, 采用有限状态机编程机制仿实现拓扑控制协议. 图 6 给出了拓扑控制协议状态转移图。

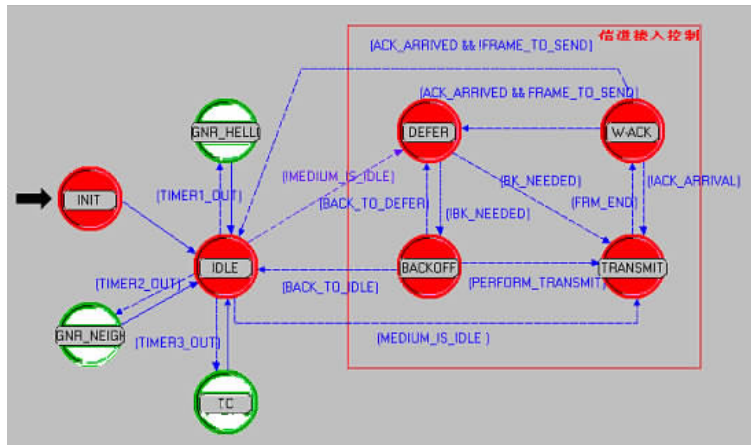


图 6 拓扑控制协议状态转移图

主要状态实现的功能如下：

(1) INIT. 进行网络初始设置；开启定时器 Timer1, 时间从  $[0, \Delta]$  中随机选择；自调度中断事件转向 IDLE。

(2) IDLE. 判断中断事件类型, 并根据  $Tc\_Interrupts\_Process()$  加以处理；如果信道空闲条件满足, 直接发送；否则进入帧间等待 DEFER 状态；若 Timer1 超时, 进入邻居信息收集阶段, 转向 GNR\_HELLO 状态；若 Timer2 超时, 进入交换邻居表阶段, 转向 GNR\_NEIGHS 状态；若 Timer3 超时, 交换邻居表完成, 进入拓扑控制实施阶段, 转向 TC 状态。

(3) GNR\_HELLO. 开启定时器 Timer2, 时间为  $d$ ；生成 TC/HELLO 帧并放入发送队列；在离散时刻  $t_{current}, t_{current} + i, t_{current} + 2i, \dots, t_{current} + d$  预设中断事件 Generate\_Hello, 模拟“在  $d$  段时间内不断发送 TC/HELLO”；完成之后转到 IDLE。

(4) GNR\_NEIGHS. 开启定时器 Timer3, 时间为  $d$ ；生成 TC/NEIGHS 帧放入发送队列, 在离散时刻  $t_{current}, t_{current} + i, t_{current} + 2i, \dots, t_{current} + d$  预设中断事件 Generate\_Neighs；完成之后转到 IDLE。

(5) TC. 每个节点以各自邻节点集中到最远的

对称相邻节点所需的功率为最优发射功率  $P_{opt}$ , 调整发送机的功率强度；完成之后转到 IDLE。

(6) DEFER、BACKOFF、TRANSMIT 和 WACK 分别按照 IEEE 802.11 DCF 载波侦听/冲突避免机制, 实现帧间等待、退避、传输和等待回复的功能。

另外, 在每个非强制状态(实心圆)的出口都会调用  $Tc\_Interrupts\_Process()$  判断中断事件的类型, 进行相关处理之后再根据满足的条件转向下一状态。 $Tc\_Interrupts\_Process()$  主要负责处理以下中断事件：

(1) Higher\_Layer\_Arrival. 上层流中断, 收到上层发来的数据包. 将包放入发送队列。

(2) Physical\_Layer\_Arrival. 下层流中断, 收到物理层信号. 包类型若为 RTS/CTS/DATA/ACK, 判断是否发往本机, 若是则接收并设置响应动作, 否则丢弃；若为 TC/HELLO 或 TC/NEIGH, 提取包中的源 MAC 地址 ID, 更新自己的邻节点集后丢弃包。

(3) Generate\_Hello. 产生 TC/HELLO 帧, 放入发送队列。

(4) Generate\_Neighs. 产生 TC/NEIGHS 帧,

放入发送队列。

3 个定时器的时间长度要保证节点能够竞争到无线信道,可以设置为  $0.1s^{[5]}$ . 在网络初始的一段特定时间内,所有节点的 MAC 层自动产生并使用最大发送功率  $P_{max}$  发送控制分组“TC/HELLO”. 其分组格式类似于 RTS,为广播帧,不需要确认机制,信道接入方式遵循载波侦听冲突避免机制. 节点在邻居选择阶段,产生并发送控制分组“TC/Neigh”,包含所选  $K$  个邻居的 ID,其发送方式和控制分组“TC/HELLO”一样. 当拓扑控制进程结束时,每个节点,在邻节点集中,以各自到最远的对称相邻节点所需的功率为最优发射功率  $P_{opt}(u)$ .

## 5 仿真与分析

无线网络拓扑最重要的性能是其能量有效性,因为它直接影响节点和网络的生存时间. 本文评估了网络中节点采用 RBNTC 拓扑控制策略后,平均发射功率的变化;比较了 RBNTC 与文献[5]中全向天线  $K$ -Neigh( $K=12$ )拓扑控制算法的节能性. 实验环境参数与第 3 节实验相同. 从图 7 可以看出,与未经拓扑控制的节点发射功率(参考文献[5]中设置的节点最大半径计算  $P_{max}$ ,所有节点均以最大发射功率进行通信)相比,拓扑控制后确定的节点发射功率显著减小,且随着节点密度的增加,拓扑控制对节能性的提高更加有效;当节点采用波束天线后,与全向天线拓扑控制算法相比,RBNTC 所确定的节点平均发射功率又减小近一倍. 因此,RBNTC 在维护网络连通性的同时保证了节点最小能量特性,在提高网络节点节能性方面效果显著.

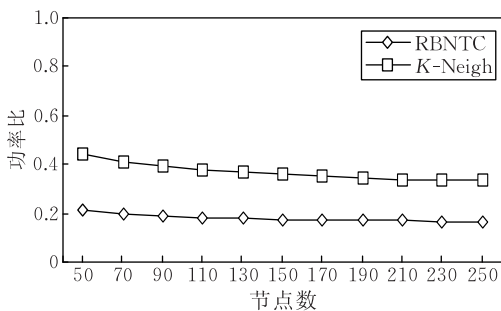


图 7 节点分别经过 RBNTC、全向天线  $K$ -Neigh 算法后的平均功率与最大发射功率的比值

为了分析拓扑控制对网络性能的影响,本文采用 OPNET 10.5 网络仿真工具<sup>[20]</sup>,仿真场景如下:网络节点数以 20 个节点的增量在 50~250 之间变化. 节点随机分布在  $1000m \times 1000m$  的二维区域

中,每个节点采用自适应波束天线(主瓣波束宽度为  $60^\circ$ ,主瓣增益为 4,旁瓣增益为 0.8)<sup>[14-15]</sup>,波束朝向水平,方向随机选择后固定不变,天线高度为 1.5m,接收阈值为  $-80dbm$ ,节点最大发射功率为 0.0064W. 随机选择 20 个源节点,每个源节点的节点也随机选择,数据包的大小为 1Kbits,发送间隔时间为 poisson 分布,每个源节点产生分组速率(单位为包/s)从 0.5~5. 使用 DSR 路由协议和基于 802.11 标准的 MAC 协议,传播损耗模型使用自由空间模型<sup>[14-15]</sup>. 仿真时间为 500s. 因为在不同节点数的网络中进行拓扑控制后对网络性能的影响相似,本文以 150 个节点的仿真结果进行分析.

图 8 反映了在不同业务负载下的网络分组交付率的变化,交付率是指总接收数据量和总发送数据量的比值,可以反映网络的数据传输效率. 当网络负载较低时,网络中的通信碰撞概率较低,路由稳定且开销小,有无拓扑控制对网络的性能影响不是很大. 在节点都以最大功率发送信号构建的网络中,每个节点通信范围内的节点数远多于拓扑控制时,随着负载不断加大,各个分组竞争信道的概率变大,而分组对信道竞争的加剧会使得链路失败概率增加,导致 DSR 路由协议不断寻找新的路由,产生大量的路由开销(如图 9 所示)占用网络带宽,从而显著降低业务流的端到端通过量. 如果发送功率不变,节点采用波束天线,那么每个节点的干扰范围进一步增加,使得 DSR 路由探测包由于竞争信道困难,出现无法发现有效路由的特殊情况,使得即使在网络负载较低时,网络吞吐率也较小.

随着网络负载的增加,节点间的干扰是影响网络吞吐量的主要因素<sup>[12,21]</sup>. 通过对网络性能的仿真我们可以看出,与最大功率拓扑相比,拓扑控制通过减少节点的发射功率,建立了相对而言较为稀疏的连通网络,提高了空间复用度,增加了网络吞吐率;但是,随着网络负载的增大,网络中节点间发包冲突的概率增大,所有拓扑图对应的网络吞吐量呈下降趋势,拓扑控制后的网络性能优势由于受到 MAC 层竞争机制的影响而有所减弱,即拓扑控制只是延缓了网络性能的下降.

通过实验发现,波束天线由于天线覆盖范围的方向性,与远距离的(主瓣中的)邻居通信时,干扰的节点数比全向天线少. 如图 8 所示,在同样网络负载时,与全向天线  $K$ -Neigh 拓扑控制算法相比,RBNTC 拓扑控制策略构建的网络拓扑中,分组干扰的概率减小,减小了链路失败的情况,减小了路由开销(如图 9 所示),保证了网络吞吐率.

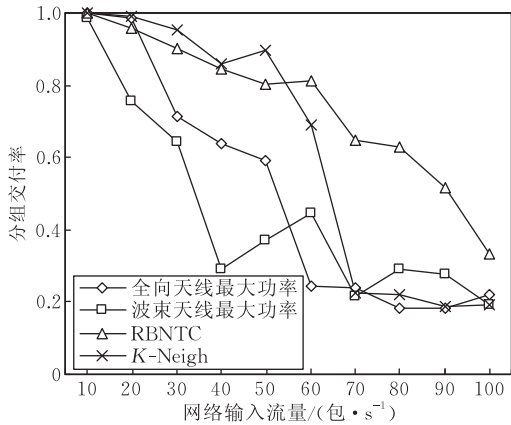


图 8 在不同业务负载下的分组交付率比较

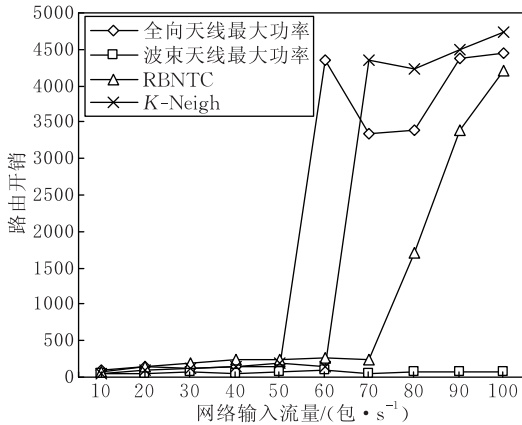


图 9 在不同业务负载下的路由开销比较

## 6 结 论

随着数字信号处理技术和天线阵列技术的发展,使得自适应波束定向天线能显著提高系统容量和通信质量.在自组网中使用定向天线、拓扑控制技术是保证网络连通和节能的一种有效手段.本文通过对随机波束自组网连通问题定性和定量的分析研究,推导了保证拓扑图高概率连通的临界邻居数  $K$ ;在此基础上,提出了一种基于邻居数的分布式拓扑控制策略,节点独立确定天线波束朝向和信号发送功率大小,使得天线覆盖邻居节点个数等于(或略小于)某个预先设定的特殊常数  $K$ .该算法的主要特点是获取算法执行所需数据的代价小,且算法运行简单快速.仿真实验说明,当节点采用波束天线后,RBNTC 可以保证整个网络的连通概率大于 99%,与全向天线拓扑控制算法减小能耗相比,RBNTC 所确定的节点平均发射功率又减小近一倍,进一步提高自组网节点的能量有效性;同时,由于定向天线提高了空间复用度和拓扑控制构建的稀疏拓扑结构,减少了干扰,因而优化了网络吞吐率.

通过仿真发现,网络性能和天线属性、网络负

载、瓶颈节点、连通度、MAC 层竞争机制和路由协议密切相关.无线自组网拓扑构建要在调整发射功率、保证连通度和减小信道干扰之间加以折衷,使网络性能得到进一步优化.

## 参 考 文 献

- [1] Goldsmith A J, Wicker S B. Design challenges for energy-constrained Ad Hoc wireless networks. *IEEE Wireless Communications*, 2002, 9(4): 8-27
- [2] Shen Zhong, Chang Yi-Lin, Cui Can et al. A distributed topology control algorithm for self-maintenance of the minimum-energy property of a wireless networks topology. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(4): 569-578 (in Chinese)  
(沈中, 常义林, 崔灿等. 一种可自维护无线网络拓扑最小能量特性的分布式拓扑控制算法. *计算机学报*, 2007, 30(4): 569-578)
- [3] Santi P. Topology control in wireless Ad hoc and sensor networks. *ACM Computing Surveys*, 2005, 37(2): 164-194
- [4] Lu Gang, Zhou Ming-Tian, Niu Xin-Zheng et al. A survey of proximity graphs in wireless networks. *Journal of Software*. 2008, 19(4): 888-911(in Chinese)  
(路纲, 周明天, 牛新征等. 无线网络临近图综述. *软件学报*, 2008, 19(4): 888-911)
- [5] Blough D M, Leoncini M, Resta G, Santi P. The  $K$ -Neigh protocol for symmetric topology control in Ad hoc networks//*Proceedings of the ACM MobiHoc*. Anapolis, Maryland, USA, 2003: 141-152
- [6] Nayebi A, Sarbazi-Azad H. Analysis of  $k$ -Neigh topology control protocol for mobile wireless networks. *Computer Networks*, 2009, 53(5): 613-633
- [7] Bellofiore S, Balanis C A. Smart-antenna system for mobile communication network. Part 1. Overview and antenna design. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2002, 44(3): 145-154
- [8] Ramanathan R. On the performance of Ad hoc networks using beamforming antennas//*Proceedings of the ACM MobiHoc*. Long Beach, California, USA, 2001: 95-105
- [9] Yi S, Pei Y, Kalyanaraman S. On the capacity improvement of Ad hoc wireless networks using directional antennas//*Proceedings of the ACM MobiHoc*. Anapolis, Maryland, USA, 2003: 108-116
- [10] Nambodiri V, Gao L, Janaswamy R. Power-efficient topology control for static wireless networks with switched beam directional antennas. *Journal of Ad Hoc Networks*, 2008, 6(2): 287-306
- [11] Dai Fei, Wu Jie. Efficient broadcasting in Ad hoc wireless networks using directional antennas. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2006, 17(4): 335-347
- [12] He Peng, Li Jian-Dong, Chen Yan-Hui et al. Distributed topology control algorithm for Ad hoc networks using directional antennas. *Journal of Software*, 2007, 18(6): 1308-1318(in Chinese)  
(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. *软件学报*, 2007, 18(6): 1308-1318)

- [13] Balanis C A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. New York: John Wiley & Sons, 1982
- [14] Bettstetter C, Hartmann C, Moser C. How does randomized beamforming improve the connectivity of Ad hoc networks// *Proceedings of the IEEE ICC*. Seoul, Korea, 2005: 3380-3385
- [15] Durrani S, Zhou X, Jones H. Connectivity of wireless ad hoc networks with random beamforming; An analytical approach// *Proceedings of the IEEE PIMRC*. Cannes, France, 2008: 1-5
- [16] Xue Feng, Kumar P R. The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks. *Wireless Networks*, 2004, 10(2): 169-181
- [17] Yu Shi-Xiao. *Introduction to Mathematical Ecology*. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House, 1995 (in Chinese)
- (余世孝. *数学生态学导论*. 北京: 科学技术文献出版社, 1995)
- [18] Hall P. *Introduction to the Theory of Coverage Processes*. New York: John Wiley & Sons, 1988
- [19] Penrose M D. On  $k$ -connectivity for a geometric random graph. *Random Structures and Algorithms*, 1999, 15(2): 145-164
- [20] OPNET network simulation(EB/OL). <http://www.opnet.com>
- [21] Li Fang-Min, Xu Wen-Jun, Gao Chao. A power control MAC protocol for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2007, 18(5): 1080-1091(in Chinese)  
(李方敏, 徐文君, 高超. 一种适用于无线传感网络的功率控制 MAC 协议. *软件学报*, 2007, 18(5): 1080-1091)



**LI Xiao-Hong**, born in 1973, Ph.D.. His research interests include network management, wireless network and topology control.

**ZHANG Da-Fang**, born in 1959, Ph. D., professor, Ph.D. supervisor. His current research interests include net-

work measurement, software test and network security, etc.

**CHEN Wen-Bin**, born in 1983, master candidate. Her current research interests include wireless network topology control.

**WANG Dong**, born in 1964. Ph. D., professor. His current research interests include network test and performance evaluation, wireless communications and mobile computing, etc.

## Background

Directional antennas have received considerable attention in the last few years due to the spatial reuse they provide which increases the potential capacity of wireless communication. Moreover, there are also benefits of power efficiency with directional antennas as they radiate power in only the desired directions. Two types of directional antennas have mainly been considered, steered beam and switched beam from the class of smart antennas. Steered beam directional antennas radiate power in only a certain direction, but the point of maximum gain can be steered as desired to always utilize the peak gain for transmitting and receiving. This is far superior to the performance of a switched beam system.

But the topology of Ad hoc networks using steered beam directional antennas is more complex than that with traditional omni-directional antennas. In particular, we focus on randomized beamforming where each node forms its main beam into a randomly chosen direction, a simple scheme that does not require any coordination among nodes and is therefore appealing in terms of practical implementation in a completely distributed Ad hoc network. Does random direction beamforming improve the overall connectivity among nodes? An answer to this question is by far not obvious. Beamforming enables nodes to transmit to a higher distance, but this increase in transmission range is bounded to a certain direction. Hence, the nodes lose links to nodes located nearby and might end up being isolated if the main beam is too narrow.

Moreover, if all the nodes used the maximum transmission power, we observed that network performance do not significantly increased in randomized beamforming Ad hoc networks.

This observation is our motivation to investigate the topology control for Ad hoc networks with random direction beamforming. The goal of topology control technique is to control the topology of the graph representing the communication links between network nodes by adjusting the transmission power of nodes. The main contribution of this paper is to propose a topology control algorithm constructing a power-efficient topologies for a wireless Ad hoc network with randomized beamforming. Using a combination of analytical and simulation-based methods, we give a tight lower bound for the critical neighbor number that is necessary to obtain an almost surely connected network on a bounded area of given size. Moreover, we present a topology control protocol that is fully distributed, asynchronous, and localized. Not only the constructed topology demonstrate significant reductions in the power required keeping the network connected, but also simulation results show that the proposed protocol significantly improves the network performance.

This work was partially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 90718008, No. 61003305) and the Major State Basic Research Development Program of China (973 Program) (No. 2007CB310702).