

# 基于自适应波束天线自组网的能量效率拓扑控制

李晓鸿<sup>1</sup>, 张大方<sup>2</sup>, 陈文斌<sup>1</sup>, 王 东<sup>1</sup>

(1. 湖南大学计算机与通信学院, 湖南长沙 410082; 2. 湖南大学软件学院, 湖南长沙 410082)

**摘 要:** 针对自适应波束定向天线自组网, 运用样方统计法推导自组网高概率连通的关键传输半径和邻居数  $K$ , 提出一种基于邻居数的分布式拓扑控制算法 DK-Neigh, 构建结点出度等于(或略小于)  $K$  的有向连通拓扑图. 仿真结果表明: DK-Neigh 可以保证网络连通率大于 96%; 当天线波束宽度小于 60 度时, DK-Neigh 的结点节能比全向天线 K-Neigh 算法提高 15%. DK-Neigh 在保证网络高概率连通的同时减少结点能耗, 提高网络能量效率.

**关键词:** 自组网; 定向天线; 拓扑控制; 能量效率

**中图分类号:** TP393.03      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2010) 06-1399-06

## An Energy Efficient Topology Control for Ad Hoc Networks with Steered Beam Antennas

LI Xiao-hong<sup>1</sup>, ZHANG Da-fang<sup>2</sup>, CHEN Wen-bin<sup>1</sup>, WANG Dong<sup>1</sup>

(1. School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

2. School of Software, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** Topology control aims to maintain network connectivity and reduce energy consumption for Ad hoc networks using steered beam directional antennas. To derive analytical expressions to determine the critical transmission range and neighbor number  $K$ , we employ quadrat statistical methods. A distributed neighbor-based topology control approach, referred to as the DK-Neigh, is proposed to maintain the outdegree of every node equal to or slightly below a specific value  $K$ . The approach can build the resulting communication graph with high probability connected. Extensive simulations are carried out, which show that the DK-Neigh is to achieve a high probability (more than 96 percent) of connectivity. If width of beam is smaller than 60 degree, average energy cost of nodes is reduced at least 15 percent than the topology control protocol K-Neigh using omni-directional antennas. Simulations show the DK-Neigh is more energy-efficient while maintaining network connectivity.

**Key words:** ad hoc networks; directional antennas; topology control; energy efficient

### 1 引言

拓扑控制是提高自组网能量效率的一种重要手段. 目前提出的有代表性的分布式拓扑控制算法, 按照所使用的输入信息可分为: 基于结点位置信息、基于角度信息和基于邻居个数信息的拓扑控制算法<sup>[1]</sup>. 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, 使得该类算法具有很强的实用性<sup>[1,2]</sup>. 但是这些拓扑控制算法都假设自组网结点使用全向天线.

近年来, 由于定向天线能显著提高系统的性能和容量, 促使定向天线技术开始在无线通信中广泛应用. 文献[3]表明, 在相同场景下, 结点使用定向天线将比全向天线更加提高无线自组网的传输能力, 并减小端到端延迟, 但是对如何保证网络连通这个基础问题没有研究.

在无线自组网中使用定向天线, 为保证网络连通需要解决两个基础问题: 邻居发现和邻居选择. 文献[4]提出周期性轮询机制可实现邻居发现, 获得邻居的位置和角度信息. 邻居选择要解决的问题包括确定结点波束的发送方向和发送范围, 选择逻辑邻居子集构建网络拓扑. 拓扑控制能有效地解决邻居选择问题, 是保证自组网连通的重要手段.

基于定向天线自组网的拓扑控制研究才刚刚开始, 目前, 已有一些学者针对多波束转换天线的自组网进行拓扑控制方法的研究<sup>[5-7]</sup>. 基本思想都是首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结点的逻辑邻居, 然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. 文献[8]的研究表明自适应波束天线可以增加结点

间多跳路径的连通概率,但是没有深入讨论定向天线对整个网络拓扑连通性的影响.

与全向天线信号覆盖区域被模型化为一个圆形碟子相比,自适应波束定向天线使得拓扑控制问题的研究更加复杂<sup>[8]</sup>.本文针对无线通信功能更加先进的自适应波束定向天线,研究拓扑控制算法以保证网络连通和提高自组网节点的能量有效性.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半径(critical transmission range)和邻居数,在此基础上,采用基于邻居数拓扑控制的思想,提出一种自适应波束定向天线分布式拓扑控制算法—定向天线  $K$  邻居算法(简称 DK-Neigh).算法主要思想是,每个节点只需获得各个方向的邻近节点的数量信息,确定天线波束的朝向和发送功率大小,构建一个节点出度等于(或略小于)临界邻居数  $K$  的有向连通图.仿真结果表明,采用 DK-Neigh 拓扑控制算法可以有效提高节点的能量有效性.

## 2 定向天线网络模型和网络连通性分析

### 2.1 定向天线网络模型

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>[3]</sup>.如图 1 所示,定向天线按照波束形成方法分为多波束转换天线和自适应波束天线两大类.与多波束转换天线相比,由于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,能提高通信质量,减小干扰信号的影响<sup>[9]</sup>.

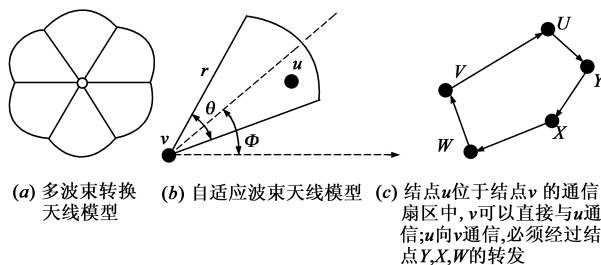


图1 定向天线模型

本文假设每个结点使用自适应波束天线,如图 1 (b)所示,天线覆盖范围为一个扇形,  $\phi$  表示波束的朝向,结点可以控制波束方向;  $\theta$  表示波束的宽度,本文假定所有结点的波束宽度都相等,且恒定不变;  $r$  表示波束覆盖半径,结点可以调整发送功率以改变通信半径.本文假定所有结点初始的最大发送功率相等,扇区内的所有方向波束的信号增益是相同的.结点在通信时,能够全向侦听、接收信号;在发送时,能够自适应的调整波束的朝向和功率,向波束覆盖扇区中的结点发送信号.

由定向天线结点生成的网络拓扑图记为  $G = (V,$

$E)$ ,其中  $V$  表示图的结点集,结点个数用  $n$  表示;  $E$  表示图的有向边集合,若结点  $v$  的天线覆盖了结点  $u$ ,则有向边  $\langle v, u \rangle \in E$ .如图 1(c)所示,  $v$  可以直接与  $u$  通信,但是结点  $u$  的天线没有覆盖结点  $v$ ,所以不能直接与  $v$  通信,必须通过其它路径转发.定义  $d^+(v)$  表示结点  $v$  的出度,  $d^-(v)$  表示结点  $v$  的入度.若某结点的出度或入度为零,则定义该结点是孤立结点.如果图  $G$  中任意结点都存在到所有其它结点的有向路径,则图  $G$  是强连通图.如果图  $G$  中存在孤立结点,则图  $G$  一定不连通.不存在孤立结点的图  $G$  可能不是强连通图,因为图  $G$  中可能存在多个互不双向连接的连通子图.若图  $G$  不存在孤立结点,则称图  $G$  是弱连通.

本文用结点定向天线信号的覆盖半径(距离)来衡量节点的能量有效性(设无线射频信号在自由空间中传播的能耗与距离的平方成正比<sup>[1]</sup>),覆盖半径越小,结点越节能.与全向天线信号覆盖区域被模型化为一个圆形碟子相比,自适应波束定向天线模型使得拓扑控制问题的研究更加复杂.首先,定向天线信号只需发向某个特定的方向,那么其本身就具有很好的节能特性.但是由于信号只能覆盖一定角度的区域,这就有可能减少结点的邻居数,从而影响网络连通性.其次,由于定向天线只需集中功率于某个角度内,结点使用相同的发送功率,其覆盖距离比全向天线更远,这又可能使得结点在不增加能耗的条件下可以与更多的结点直接通信,提高网络的连通性.最后,由于每个结点的天线只能朝向某个方向,拓扑图中出现有向边,使得结间路径出现不对称性.更糟糕的是,如果结点独立决定自己的天线的朝向,则有可能使得整个拓扑图不连通.

### 2.2 网络连通性分析

结点如何决定天线的朝向和临界半径,以保证网络连通呢.如果每个结点可以独立调整自己的发送功率,那么如何在保证整个拓扑图连通的基础上,减小发送功率以提高节点能量有效性呢.这是一个 NP 难问题<sup>[1]</sup>.

本文利用样方统计法<sup>[10]</sup>,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.如果结点是均匀分布的,采用这种统计模型,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)).基于这个模型,设无线网络中  $n$  个结点均匀分布在一个很大的区域  $M$  中,结点密度  $\rho = n/\|M\|$ ,定向天线的波束宽度为  $\theta$ ,波束覆盖半径为  $r_{\max}$ .我们把结点的定向天线覆盖扇区  $S$  作为样方,那么  $S$  中的结点数服从均值为  $\rho \theta r_{\max}^2/2$  的泊松分布,每个结点天线覆盖扇区中的结点数目(既结点出度)的

概率密度函数为

$$P(d^+(v) = K) = \frac{e^{-\frac{\rho\theta r_{\max}^2}{2}} \left(\frac{\rho\theta r_{\max}^2}{2}\right)^K}{K!} \quad (1)$$

由式(1)可以得到定理 1,求得拓扑图  $G$  结点最大出度的概率分布。

**定理 1** 设  $n \gg 1$  个结点均匀分布在一个很大的区域  $M$  中,结点密度为  $\rho$ .定向天线的波束宽度为  $\theta$ ,波束覆盖半径为  $r_{\max}$ ,随机选择一个朝向,那么图  $G$  结点最大出度  $\leq k_0$  的概率  $P$  满足下面的公式:

$$P(d_{\max}^+ \leq k_0) = \left( \sum_{k=0}^{k_0} \frac{e^{-\frac{\rho\theta r_{\max}^2}{2}} \left(\frac{\rho\theta r_{\max}^2}{2}\right)^k}{k!} \right)^n \quad (2)$$

又由式(1)可以得到每个结点出度大于等于 1(天线扇区中至少有一个结点)的概率为:

$$P(d^+(v) \geq 1) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{e^{-\frac{\rho\theta r_{\max}^2}{2}} \left(\frac{\rho\theta r_{\max}^2}{2}\right)^k}{k!} = 1 - e^{-\frac{\rho\theta r_{\max}^2}{2}} \quad (3)$$

假设样方统计方法满足独立无关性,那么所有结点的扇区中至少都覆盖一个结点(所有结点的出度大于等于 1)的概率为

$$P_+ = \binom{n}{n} P(d^+(v) \geq 1)^n P(d^+(v) = 0)^0 = \left(1 - e^{-\frac{\rho\theta r_{\max}^2}{2}}\right)^n \quad (4)$$

利用随机几何学中关于点覆盖问题的概念,一个结点不被其它结点的扇区覆盖的概率为  $(1 - \|S\|/\|M\|)^n$ .当  $\|M\|$  趋向无穷大时,

$$P(d^-(v) = 0) = E\left[\left(1 - \frac{\|S\|}{\|M\|}\right)^n\right] = e^{-\frac{\|S\|E(n)}{\|M\|}} = e^{-\frac{\rho\theta r_{\max}^2}{2}} \quad (5)$$

每个结点入度大于等于 1(结点至少被一个以上的结点扇区覆盖)的概率为:

$$P(d^-(v) > 0) = 1 - e^{-\frac{\rho\theta r_{\max}^2}{2}} \quad (6)$$

显然,所有结点至少被一个以上的结点扇区覆盖(所有结点的入度大于等于 1)的概率为:

$$P_- = \left(1 - e^{-\frac{\rho\theta r_{\max}^2}{2}}\right)^n \quad (7)$$

在一个很大的区域  $M$  中均匀分布  $n$  个点,图  $G$  没有独立结点的概率为:

表 1 满足拓扑图 99% 概率连通时,式(9)和式(2)求出的临界半径和邻居数与通过仿真实验求出的  $K$  值

结点数	近似解								仿真			
	30°		45°		60°		90°		30°	45°	60°	90°
	$r_{\max}$	$k_0$	$r_{\max}$	$k_0$	$r_{\max}$	$k_0$	$r_{\max}$	$k_0$	$K$	$K$	$K$	$K$
64	751	20	613	20	531	20	433	20	15	16	16	16
80	679	21	554	21	480	21	392	21	17	18	18	17

$$P_G = P_+ * P_- = \left(1 - e^{-\frac{\rho\theta r_{\max}^2}{2}}\right)^{2n} \quad (8)$$

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>[11]</sup>.利用推导的式(8)可证明定理 2,求得定向天线网络连通概率至少为  $P$  的结点临界半径的下限。

**定理 2** 设  $n \gg 1$  个结点均匀分布在一个很大的区域  $M$  中,结点密度为  $\rho$ .定向天线的波束宽度为  $\theta$ ,波束覆盖半径为  $r_{\max}$ ,随机选择一个朝向.如果要保证网络连通概率至少为  $P$ ,那么结点临界半径  $r_{\max}$  必须满足:

$$r_{\max} \geq \sqrt{\frac{-2\ln(1 - P^{1/2n})}{\rho\theta}} \quad (9)$$

### 2.3 仿真与讨论

本节通过模拟实验验证上节连通性分析的有效性.将  $1000\text{m} \times 1000\text{m}$  的区域分成 16 个大小相同的单元,每个单元中均匀的分布结点,结点数从 4 到 15 之间变化.天线波束宽度  $\theta$  分别设置为  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ .定义临界邻居数  $K$  表示保证拓扑图高概率连通( $\geq 99\%$ )时最小的结点出度.对于每一种结点数  $n$  和波束宽度  $\theta$ ,每个结点随机选择天线的朝向,生成 30000 幅有向连通拓扑图,对每个生成拓扑图求出并记录满足连通的最小结点出度.图 2 说明  $n = 112, \theta = 60^\circ$  时  $K$  值等于 20 时拓扑图连通概率 99%.

对于不同的  $n$  和  $\theta$ ,可以保证图 99% 以上概率连通的最小的  $K$  值如表 1 所示.对于不同的  $n$  和  $\theta$ ,利用公式(9)计算出  $P(\text{拓扑图连通}) > 99\%$  时的临界半径  $r_{\max}$ ,然后带入公式(2),计算在该半径下满足  $P(\text{结点最大出度} \leq k_0) > 99\%$  的最小的  $k_0$  值如表 1 所示.图 3 是不同波束宽度的临界邻居数  $K$  值随结点数变化的趋势以及与理论分析结果的比较。

通过实验结果的分析,发现临界邻居数的变化趋势与定性分析的结果相似,随着结点数的增加, $K$  值也缓慢的增加.当结点数大于 112 后,天线波束宽度分别为  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  时, $K$  值的变化与理论分析的  $K$  值曲线基本吻合,这个与定理 1 和定理 2 要求结点数比较大的前提条件相一致.在 2.2 节利用定理 1 和定理 2 求  $K$  值时,天线波束宽度这个变量被略掉了,但是图 3 的仿真结果表明,当天线波束宽度等于  $90^\circ$  时,虽然仿真求出的  $K$  值也随结点数的增加而缓慢的增加,但是与理论分析的值不同,表明当天线波束宽度较大时,利用定理 1 和定理 2 来求  $K$  值的公式不适用。

表 1 续

96	626	22	511	22	442	22	361	22	18	19	19	17
112	584	22	477	22	413	22	337	22	21	21	20	18
128	550	23	449	23	389	23	317	23	21	22	21	18
144	521	23	426	23	368	23	301	23	22	23	23	18
160	497	24	406	24	351	24	287	24	23	24	22	18
176	476	24	389	24	336	24	275	24	23	24	23	18
192	458	24	374	24	323	24	264	24	23	24	23	18
208	441	25	360	25	312	25	255	25	24	25	23	18
224	427	25	348	25	302	25	246	25	25	25	23	18
240	414	25	338	25	292	25	239	25	25	25	22	18

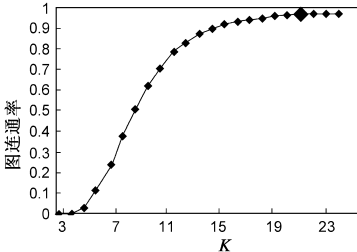
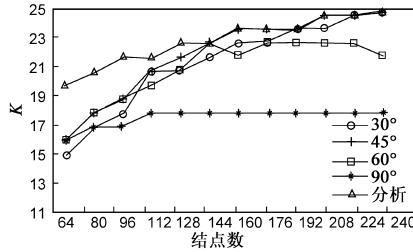
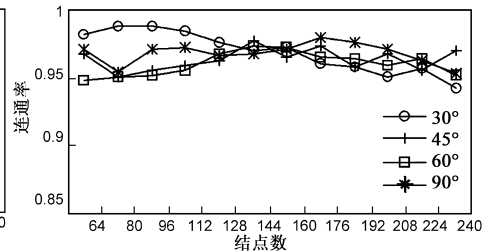
图2  $n=112, \theta=60^\circ$ 时,随 $K$ 值变化时拓扑图连通概率的变化图3 不同的结点数和波束宽度,保证图99%以上概率连通的最小的 $K$ 值的变化趋势

图4 不同波束宽度时,DK-Neigh生成的拓扑图的连通率

### 3 自适应波束定向天线拓扑控制算法 DK-Neigh

通过第2节的分析,发现在自适应波束定向天线的自组网中存在特定的临界邻居数  $K$ ,通过对图3的观察,可以发现当  $n$  在  $[64, 240]$  之间时,对天线波束宽度(分别为  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  时  $K$  值的增加趋势较为平缓,设置  $K=25$  时可以保证拓扑图的连通概率大于 99%。由此提出一种拓扑控制算法 DK-Neigh, 结点调整信号波束仅仅覆盖  $K$  个邻居,既能保证拓扑图高概率连通,又能提高结点的能量有效性。而且为了保证实用性,提出的拓扑控制算法具有分布式、异步和基于局部信息的特点,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。

本节描述的 DK-Neigh 拓扑控制算法基于以下前提条件:

- (1) 结点是固定不动的。
- (2) 所有结点的最大信号发送功率  $P_{\max}$  都相等。
- (3) 所有结点都采用自适应波束定向天线,波束宽度都等于  $\theta$ , 结点在通信时,能够全向侦听、接收信号;在发送时,能够自适应地调整波束的朝向和功率。

结点可以在不同时间启动 DK-Neigh 算法。但是所有结点启动的时间间隔要小于一个常数  $\Delta$ 。算法分为邻居发现和邻居选择两个阶段。对于自组网中的每个结点  $i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) 首先执行如下邻居发现步骤:

- (1) 结点  $i$  在  $t_i$  时刻激活 ( $t_i \in [0, \Delta]$ ), 设置信号发送功率  $P_i$  等于最大值  $P_{\max}$ , 随机选择一个波束朝向  $\Phi$  ( $\Phi \in [0, 2\pi]$ ), 然后逐步调整波束朝向  $\Phi = (\Phi + \theta \times j)$

$\text{mod } 2\pi$  ( $j=1, 2, 3, \dots$ ), 每改变一次方向, 结点用最大功率通告自己的标志信息(设每个结点完成全向通告信息的时间为  $d$ );

(2) 对于接收到的其它结点发送的通告信息, 结点  $i$  保存发送结点的标志;

(3) 利用定向天线的物理特性<sup>[9]</sup>, 计算并保存邻近结点与自己的相对角度;

(4) 采用距离估计机制<sup>[2]</sup>(如 RSSI 和 ToA)来计算结点头间距离, 估算两个结点间的距离;

在  $t_i + 2\Delta + d$  时刻后, 结点结束邻居信息通告和发现阶段, 进入邻居选择拓扑控制阶段, 执行如下步骤:

(1) 结点  $i$  对记录的所有邻居结点按照与  $i$  的相对角度进行排序, 保存在集合  $L_i$  中;

(2) 结点  $i$  随机选择一个波束朝向  $\Phi$  ( $\Phi \in [0, 2\pi]$ ), 如果  $L_i$  中没有结点的角度位于  $[\Phi - \theta/2, \Phi + \theta/2]$ , 那么结点继续随机选择一个波束朝向  $\Phi$ , 直至有邻居结点位于结点  $i$  选择的波束扇区中;

(3) 如果波束扇区中的邻居数大于等于  $K$ , 则根据第  $k$  个最远邻居的距离计算结点发送功率  $P_i$ ; 如果波束扇区中的邻居数小于  $K$  个, 则根据扇区中最远邻居的距离计算结点发送功率  $P_i$ 。

结点在邻居发现阶段设置最大的发送功率  $P_{\max}$  必须保证信号的覆盖半径不小于表1提供的参考值  $r_{\max}$ , 以保证生成的有向拓扑图是高概率连通图。DK-Neigh 算法在邻居发现阶段, 每个结点只需利用定向天线旋转一周发送自己的标志信息, 且不需应答邻居发送的通告信息, 而在邻居选择阶段结点独立地在本地执行

算法,无需信息交换,使得整个拓扑控制算法需要的消息交互开销为  $O(n)$ 。

#### 4 仿真结果和分析

为了评价 DK-Neigh 拓扑控制算法,通过仿真实验首先对 DK-Neigh 拓扑控制算法生成的拓扑图的连通率进行评价,然后从能耗、结点度和传输范围三个方面进行比较分析,并与全向天线 K-Neigh ( $K=9$ ) 拓扑控制算法<sup>[2]</sup>生成的拓扑图的性质做比较,实验环境参数与第 3 节实验相同。

为了提高拓扑控制算法在邻居发现中的效率,针对不同的结点数和天线角度,采用表 1 提供的临界半径的 1.5 倍来计算初始最大发送功率  $P_{\max}$ ,当天线波束宽度  $\theta$  分别为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  时设置  $K=25$ ,运行 DK-Neigh 算法生成的拓扑图的连通率的情况如图 4 所示,可以保证拓扑图的强连通概率达到 96% 以上.这与理论分析设置  $K=25$  时可以保证拓扑图概率 99% 以上连通有一些差距,是不是理论分析有误? 不是的.因为一般理论分析都假设结点分布区域是无限大的,而在仿真实验中,位于区域边界附近的结点的邻居分布与中心结点差别较大,只能与区域中间的结点建立链路,这种边界影响(border effect)现象影响了仿真结果.通过实验发现,天线的方向性使得网络拓扑图是有向图,边界结点受分布区域边界的限制,使得其被其它结点覆盖的概率降低,同时边界结点天线扇区中覆盖的结点数变化也非常大(有的扇区中仅有 1 个结点),由于每个结点调整波束朝向的独立性和随机性,定向天线生成链路的有向性,以及区域边界对结点密度的影响,从而影响了整个网络的连通率。

无线网络拓扑最重要的性能参数是其节能性,因为它直接影响结点和网络的生存时间.本文首先评价拓扑控制算法生成的拓扑图的能耗伸展因子,即 Spanner 性质.文献<sup>[1]</sup>证明全向天线 K-Neigh 拓扑控制算法具有 Spanner 性质.本文采用所有结点对间能耗与全向天线 K-Neigh 图中对应结点对间能耗比值的平均值来计算能耗伸展因子.图 5 表明拓扑控制算法生成的拓扑图可以保证端到端通信(选择最优路径)增加的能耗的倍数是常数,这表明 DK-Neigh 算法可以实现端到端通信的能耗控制.但是与全向天线拓扑控制算法的 Span-

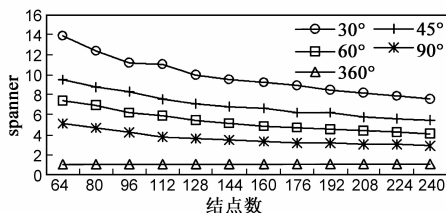


图5 不同波束宽度时拓扑图平均能耗伸展因子

ner 值相比,由于采用定向天线,结点间的链路大多不是对称的,使得端到端通信的跳数增加,从而增加了端到端通信能耗.对于不同的天线波束宽度,图 5 实验数据表明,天线波束越小,结点间路径的长度(跳数)越大,路径的能量消耗相对也增大。

在无线路由协议中,每个结点希望与有限的邻居来进行通信.结点度越大,将增加该结点对其邻居结点的干扰,同时增加其维护邻居状态的开销.图 6 表明随着结点数增加,网络平均邻居数也缓慢增加.与表 1 中的  $K$  值相比,DK-Neigh 算法生成的拓扑图的平均结点度减小了 20% ~ 30%,但是与全向天线 K-Neigh 生成的拓扑图平均邻居数相比,采用自适应天线的结点的物理度的值最多增加了 2.3 倍,这有可能使得自适应天线不能充分利用空分复用特性来提高网络的吞吐量。

本文使用结点定向天线信号的覆盖半径来衡量结点的能量有效性(能耗与结点距离的平方成正比),覆盖半径越小,结点越节能.图 7 表明,与仿真实验设置的初始半径相比,结点的平均半径减小了 15%,表明 DK-Neigh 可以减少结点的能耗,而且随着结点个数增加,结点平均半径变小,结点的能量有效性更好.与全向天线 K-Neigh 算法相比,我们用  $R_o$  表示全向天线的传输半径, $R_d$  表示定向天线的传输半径.假设定向天线的波束宽度是  $\theta$ ,全向天线和定向天线都采用相同的功率来发送信号,那么  $R_d/R_o$  的值等于  $2/\tan(\theta/2)$ <sup>[3]</sup>.根据这个公式对图 7 进行观察,当天线波束宽度为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  时,定向天线与全向天线的能耗比分别是 0.30, 0.56, 0.86, 1.63,说明,当天线波束宽度为  $90^\circ$  时,定向天线能耗高,当天线波束宽度为  $60^\circ$  时,两者结点能耗基本相等,而当天线波束宽度小于  $60^\circ$  时,定向天线结点表现出更好的节能性.这表明如果结点采用波束宽度较小的定向天线,采用有效的拓扑控制算法后,将获得比全向天线拓扑算法更好的节能性,提高网络能量效率。

#### 5 结论

随着智能天线技术的发展,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.本文通过对定向天线自组网连通问题

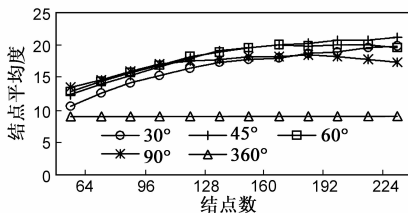


图6 不同波束宽度时拓扑图平均结点度

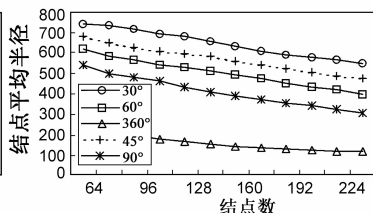


图7 不同波束宽度时拓扑图平均半径

定性和定量的分析研究,推导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算法.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,DK-Neigh 拓扑控制算法可以保证整个网络的连通概率大于 96%,结点的传输半径比初始值减少 15%,提高自组网的能量有效性;当天线波束宽度小于  $60^\circ$  时,DK-Neigh 与全向天线拓扑 K-Neigh 拓扑控制算法相比,可使结点节能提高 15%,表明结点采用波束宽度较小的定向天线,采用有效的拓扑控制算法,可获得比全向天线拓扑算法更好的节能性,提高网络的能量效率.

通过仿真实验,我们发现自适应波束定向天线拓扑控制技术还存在着许多问题有待进一步深入研究.如何设计有效的邻居发现机制和链路建立模型,使得结点能够在逻辑上建立对称链路;针对自适应波束定向天线,如何设计保证拓扑图是强连通的拓扑控制算法;针对结点度、端到端能耗有效性等性能参数,设计有效的定向天线拓扑控制算法,也是我们今后的研究内容.

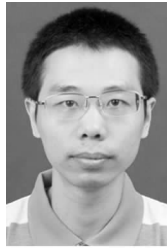
#### 参考文献:

- [1] 路纲,周明天,牛新征.无线网络临近图综述[J].软件学报.2008,19(4):888-911.  
Lu Gang, Zhou Mingtian, Niu Xinzheng, et al. A survey of proximity graphs in wireless networks[J]. Journal of Software. 2008, 19(4): 888-911. (in Chinese)
- [2] D M Blough, M Leoncini, G Resta, P Santi. The K-neighbor protocol for symmetric topology control in ad hoc networks[A]. Proceedings of ACM MobiHoc [C]. Annapolis, Maryland, USA: ACM New York, 2003. 141-152.
- [3] R Ramanathan. On the performance of ad hoc networks using beamforming antennas[A]. Proceedings of ACM MobiHoc [C]. Long Beach, CA, USA: ACM New York, 2001. 95-105.
- [4] S Vasudevan, J Kurose, D Towsle. On neighbor discovery in wireless networks with directional antennas[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM[C]. Miami, USA: IEEE Communications Society, 2005. 2502-2512.
- [5] V Nambodiri, L Gao, R Janaswamy. Power efficient topology control for wireless networks with switched beam directional antennas[A]. Proceedings of IEEE MASS[C]. Washington, USA: IEEE Communications Society, 2005. 588-596.
- [6] Z Huang, C Chung Shen, C Srisathapornphat, C Jaikaeo. Topology control for ad hoc networks with directional antennas[A]. Proceedings of IEEE ICCCN[C]. Miami, USA: IEEE Communications Society, 2002. 16-21.
- [7] U Kumar, H Gupta, S R Das. A topology control approach to

using directional antennas in wireless mesh networks[A]. Proceedings of IEEE ICC[C]. Istanbul, Turkey: IEEE Communications Society, 2006. 4083-4088.

- [8] Christian Bettstetter, Christian Hartmann, Clemens Moser. How does randomized beamforming improve the connectivity of ad hoc networks? [A]. Proceedings of IEEE ICC[C]. Seoul, Korea: IEEE Communications Society, 2005. 3380-3385.
- [9] 赵瑞锋,谈振辉,蒋海林.无线系统中的智能天线[J].电子学报,2000,28(12):77-80.  
Zhao ruifeng, Tan zhenhui, Jiang hailin. Smart antennas for wireless systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(12): 77-80. (in Chinese)
- [10] 余世孝.数学生态学导论[M].北京:科学技术文献出版社,1995.  
Yu Shixiao. Introduction to Mathematical Ecology[M]. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House, 1995. (in Chinese)
- [11] M D Penrose. On k-connectivity for a geometric random graph [J]. Random Structures and Algorithms, 1999, 15(2): 145-164.

#### 作者简介:



李晓鸿 男,1973 年出生,湖南长沙人,讲师,湖南大学计算机与通信学院博士研究生,主要研究方向为可信系统与网络、无线网络和移动计算.

E-mail: lixhong@263.net



张大方 男,1959 年出生,上海人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为可信系统与网络、网络测试、软件容错、软件测试.



陈文斌 男,1983 年出生,山东济南人,湖南大学计算机与通信学院硕士研究生,主要研究方向为无线网络和移动计算.

王东 男,1964 年出生,湖南长沙人,博士,教授,主要研究方向为计算机网络与流媒体应用技术、无线网络和移动计算.

