

# IMECN:一种新的无线传感器网络拓扑控制算法

李 云<sup>1,3</sup>,周 娴<sup>2</sup>,尤肖虎<sup>3</sup>,刘占军<sup>1</sup>

(1. 重庆邮电大学无线信息网络研究中心,重庆 400065;2. 北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室,北京 100876;  
3. 东南大学移动通信国家重点实验室,江苏南京 210096)

**摘 要:** 拓扑控制策略对减小无线传感器网络中节点的能量消耗,延长网络的生命期具有重要意义.在已有的拓扑控制算法中,有代表性的是 SMECN.本文在分析 SMECN 拓扑控制算法的缺点的基础上,提出了一种新的拓扑控制算法—IMECN.IMECN 利用极坐标中的极角,巧妙地将区域覆盖问题转化为角度叠加问题,通过判断多个圆心角的叠加和是否等于  $2\pi$ ,判断节点的无线传输范围是否覆盖其直接传输区域.最后,我们理论分析了 IMECN 的计算复杂度,仿真分析了 IMECN 的节能特性.

**关键词:** 无线传感器网络;拓扑控制;最小能量特性;直接传输范围

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2010)01-0048-06

## IMECN—A New Topology Control Algorithm for Wireless Sensor Networks

LI Yun<sup>1,3</sup>,ZHOU Xian<sup>2</sup>,YOU Xiao-hu,LIU Zhan-jun<sup>1</sup>

(1. CWIN, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China;2. Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;  
3. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University of China, Nanjiang, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** The topology control strategies of wireless sensor network are very important to reduce the energy consumptions of sensor nodes and prolong the life-span of networks. SMECN is a known topology control algorithm for wireless sensor networks. Based on analyzing the shortcoming of SMECN, this paper propose a new topology control algorithm, which is named Improvement of Minimum-Energy Communication Network (IMECN). IMECN subtly transforms the regional coverage problem into the angle superimposition problem. In IMECN, we can know whether the wireless transmission region covers this direct transmission region through comparing the sum of central angles to  $2\pi$ . Finally, we analyze the computational complexity of the IMECN and simulate the energy property of IMECN.

**Key words:** wireless sensor networks, topology control, minimum energy property, direct-transmission region

### 1 引言

减小节点的能量消耗是无线传感器网络协议设计的重要目标<sup>[1]</sup>.网络拓扑控制在满足网络覆盖度和连通度的前提下,可通过功率控制,形成一个数据转发的优化网络结构,从而延长网络的生存时间,减小节点在无线信道上的碰撞<sup>[2]</sup>,提高通信效率.

目前,已有一些文献对无线传感器网络拓扑控制算法进行了研究<sup>[3-9]</sup>.文献[3,4]中提出的 SMECN 和 MECN 算法,它们以功率递增的方式进行搜索,使网络中的节点找到自己的最小发送功率.在文献[5]中提出了一个基于扇区的拓扑控制算法(CBTC),该算法中节点的传播区域被划分成一个个不重叠的扇型区域,节点

逐步增大发送功率直到该节点能在每一个扇区内至少找到一个相邻节点或者该节点增大到其最大发送功率为止.文献[6]结合了短跳<sup>[7]</sup>和生成活动型子网<sup>[8]</sup>两种能量节省算法,使它们进行了互补.文献[9]提出了一种简单的睡眠调度算法 RIS.文献[10]提出了 MSNL,将睡眠调度问题表示成带有覆盖约束的最大化网络生命期问题.

与本文相关的是文献[3]提出的 SMECN 算法. SMECN 算法在设定网络中节点的发送功率时,必须判断节点无线传输区域是否包含了该节点的直接传输区域,但文献[3]没有给出上述问题的可实现方法.针对这些问题,本文提出了一种改进的最小能量通信网拓扑控制算法 IMECN(Improvement of Minimum-Energy Communica

tion Network). 同 SMECN 相比, IMECN 是一个真正可计算机实现的算法, 其计算复杂度为  $O(N \log N)$ .

## 2 无线传感器网络模型

在整个传感器网络中所有节点都分布在一个二维平面上, 具有惟一的标识(ID)且都知道自己的位置.

设发送节点  $u$  和接收节点  $v$  之间的距离为  $d(u, v)$ , 则节点  $u$  与节点  $v$  通信需要消耗的能量为  $p(u, v) = td(u, v)^n$  (其中  $t$  为一个常量,  $n$  为一个户外无线传播模型<sup>[11]</sup>的路径损耗指数,  $n \geq 2$ ), 由于在无线传感器网络中, 节点的通信距离很短, 本文将  $n$  取值为 2.

当无线传感器网络没有进行拓扑控制时, 每一个节点均使用其最大功率  $p_{\max}$  工作形成最大功率拓扑, 表示为  $G_{\max} = (V, E_{\max})$ , 其中  $V$  为网络中节点的集合,  $E_{\max} = \{(u, v), td(u, v)^2 \leq p_{\max}\}$ . 如果在  $G_{\max} = (V, E_{\max})$  中, 存在一条路径  $PATH(u, v) = (u = u_0, u_1, \dots, u_{n-1}, u_n = v)$ , 这条路径的长度为  $|PATH(u, v)| = n$ , 那么通过这条路径进行信息传输所消耗的能量为:

$$C(PATH(u, v)) = nc + \sum_{i=0}^{n-1} P(u_i, u_{i+1});$$

其中  $c$  表示节点的接收损耗, 同传感器节点的发送能量消耗相比,  $c$  通常较小. 在上述网络模型的基础上, 下面给出 IMECN 拓扑控制算法.

## 3 IMECN 拓扑控制算法

### 3.1 IMECN 中的基本概念

#### 3.1.1 转接区域 $R_{u \rightarrow v}$

若节点  $u$  与在区域  $R_{u \rightarrow v}$  中任意的一个节点  $\gamma$  直接通信所消耗的能量大于节点  $u$  经  $v$  转接后到  $\gamma$  所消耗的能量, 那么称区域  $R_{u \rightarrow v}$  为节点  $u$  关于节点  $v$  的转接区域<sup>[3]</sup>, 有:

$$R_{u \rightarrow v} = \{\gamma: C(u, v, \gamma) \leq C(u, \gamma)\}$$

**定理 1** 对节点通信距离较近的无线传感器网络, 能量损耗与传输距离的平方成正比, 则转接区域  $R_{u \rightarrow v}$  的边界为过点  $v$  并且垂直于线段  $w$  的一条直线  $L$ .  $L$  将平面分为两半 (如图 1 中所示), 其中不包含线段  $w$  的半平面为转接区域  $R_{u \rightarrow v}$  (图 1 中的阴影部分).

**证明** 设直线  $L$  为一条过点  $v$  且垂直于线段  $w$  的一条直线.  $L$  将平面分为两半, 分别用  $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$  表示, 其中  $\Phi_2$  为不包含线段  $w$  的半平面. 如图 2 所示.

任取  $\Phi_2$  中的一点  $m$ , 对  $\Delta uvm$ , 由三角定理可得:

$$d^2(u, m) = d^2(u, v) + d^2(v, m) - 2d(u, v)d(v, m)\cos\alpha \quad (1)$$

由于  $w \perp L$ , 所以  $\alpha = \angle uvm > 90^\circ$ , 那么  $\cos\alpha < 0$ , 则由式(1)得:

$$d^2(u, m) > d^2(u, v) + d^2(v, m) \quad (2)$$

由于能量损耗同距离的平方成正比, 因此有:  $C(u, m) > C(u, v) + C(v, m)$ , 即

$$C(u, m) > C(u, v, m) \quad (3)$$

对半平面  $\Phi_2$  中的任一点  $m$ ,  $u$  通过  $v$  转接到  $m$  的能量消耗小于  $u$  直接与  $m$  通信的能量消耗, 因此平面  $\Phi_2$  为  $u$  对于  $v$  的转接区域  $R_{u \rightarrow v}$ .

任取  $\Phi_1$  中的一点  $n$ , 对  $\Delta uwn$ , 由三角定理可得:

$$d^2(u, n) = d^2(u, v) + d^2(v, n) - 2d(u, v)d(v, n)\cos\beta \quad (4)$$

由于  $\beta = \angle uwn < 90^\circ$ , 那么  $\cos\beta > 0$ , 由式(4)得:

$$d^2(u, n) < d^2(u, v) + d^2(v, n) \quad (5)$$

由于能量损耗同距离的平方成正比, 因此有:

$$C(u, n) < C(u, v) + C(v, n), \text{ 即 } C(u, n) < C(u, v, n)$$

即对半平面  $\Phi_1$  中的任一点  $n$ ,  $u$  通过  $v$  转接到  $n$  的能量消耗大于  $u$  直接与  $n$  通信的能量消耗, 因此平面  $\Phi_1$  为  $u$  对于  $v$  的直接传输区域.

因此,  $L$  为节点  $u$  对  $v$  的转接区域  $R_{u \rightarrow v}$  的边界线. 证毕

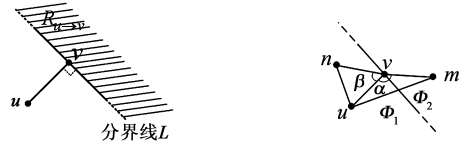


图1 节点  $u$  关于节点  $v$  的转接区域  $R_{u \rightarrow v}$  及其边界线  $L$

#### 3.1.2 直接传输区域 $R_{F(u)}$

设  $N_F$  为在区域  $F$  中所有节点的集合, 有:

$$N_F = \{v \in V: Loc(v) \in F\} \quad (6)$$

若  $F = F(u, p)$ , 节点  $u$  的直接传输区域表示为  $R_{F(u)}$ <sup>[3]</sup>, 则有:

$$R_{F(u)} = \bigcap_{v \in N_F} (F(u, p_{\max}) - R_{u \rightarrow v}) \quad (6)$$

由上式可知节点  $u$  与  $R_{F(u)}$  区域中任意一个节点直接通信消耗的能量为最小, 同时若节点  $u$  要与区域  $R_{F(u)}$  外的某节点  $x$  进行通信时, 则在区域  $R_{F(u)}$  中一定可以找到一个节点  $y$ , 节点  $u$  通过节点  $y$  转接后能同节点  $x$  通信, 且消耗的能量比节点  $u$  和节点  $x$  直接通信时消耗的能量要小. 图 3 的阴影部分为在给定节点  $u$  及其相邻节点  $v, m, t$  时, 节点  $u$  的直接传输区域  $R_{F(u)}$ .

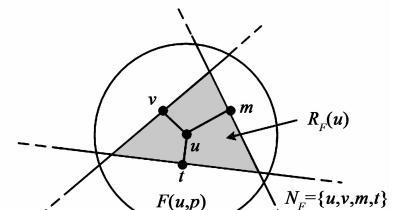
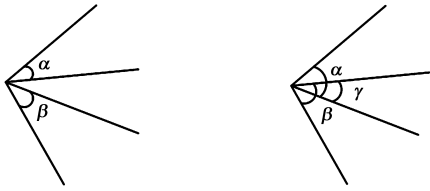


图3 节点  $u$  的直接传输区域  $R_{F(u)}$

**3.1.3 角叠加**

给定一个角  $\alpha$ , 它与具有相同顶点的角  $\beta$  进行叠

加,定义  $\alpha$  与  $\beta$  的叠加和为:(1)  $\alpha$ , 当角  $\alpha, \beta$  无重叠部分时;(2)  $\alpha + \beta - \gamma$ , 当  $\alpha, \beta$  有重叠部分时,  $\gamma$  为重叠部分的大小且  $\gamma \geq 0$ , 图 4 为两种不同情况下的角  $\alpha$  与角  $\beta$  的叠加和。



(a) 角  $\alpha$  与角  $\beta$  的叠加和为  $\alpha + \beta$  (b) 角  $\alpha$  与角  $\beta$  的叠加和为  $\alpha + \beta - \gamma$   
图 4 角  $\alpha$  与具有相同顶点的角  $\beta$  的叠加和

### 3.1.4 源节点与其邻居节点所对应的圆心角

设节点  $u$  为源节点、节点  $v$  为节点  $u$  在区域  $F(u, p)$  内的邻居节点,若节点  $u$  关于其邻居节点  $v$  的交接区域  $R_{u \rightarrow v}$  的边界线  $L$  与区域  $F(u, p)$  的圆周交于  $v_a$  和  $v_b$  两点,则  $\angle v_a u v_b$  为节点  $u$  与节点  $v$  所对应的圆心角 (如图 5 所示)。

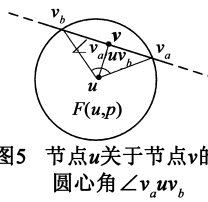


图 5 节点  $u$  关于节点  $v$  的圆心角  $\angle v_a u v_b$

### 3.2 IMECN 算法

由直接传输区域的定义公式 ( $R_{F(u)} = \bigcap_{v \in N_p} (F(u, p_{\max}) - R_{u \rightarrow v})$ ) 可知,若节点  $u$  与区域  $F(u, p)$  内相邻节点所对应的圆心角叠加和为  $2\pi$ , 那么节点  $u$  所覆盖的传输区域  $F(u, p)$  必定已经包含其直接传输区域  $R_{F(u)}$  (如图 6(a) 所示); 反之,若节点  $u$  与区域  $F(u, p)$  内相邻节点所对应的圆心角叠加和不等于  $2\pi$ , 那么区域  $F(u, p)$  必定未能包含区域  $R_{F(u)}$  (如图 6(b) 所示)。图 6 中的阴影部分为节点  $u$  的直接传输区域。

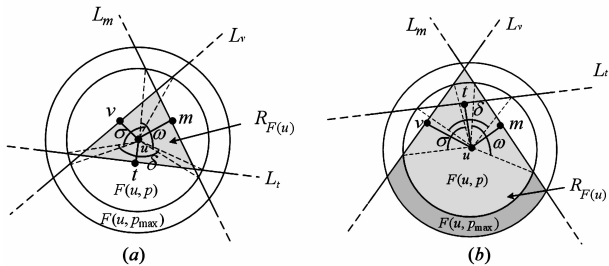


图 6 节点  $u$  关于相邻节点  $v, m, t$  的圆心角  $\sigma, \omega, \delta$

由此可知,判断  $F(u, p)$  是否覆盖节点  $u$  的直接传输区域  $R_{F(u)}$ , 可以转换为判断节点  $u$  与  $F(u, p)$  内相邻节点所对应圆心角的叠加和是否等于  $2\pi$ 。下面以任意一个节点  $u$  为例, 给出建立其极坐标系及计算节点  $u$  与其邻居节点所对应圆心角的叠加和的步骤。

#### 步骤 1 建立节点 $u$ 的极坐标系:

传感器网络的任意节点  $u$  建立一个以自己为极点, 以一条平行于  $x$  轴的射线  $ux$  为极轴, 以逆时针方向为正方向的极坐标系。

设原直角坐标系中, 节点  $u$  与区域  $F(u, p)$  内任意一节点  $v$  的直角坐标分别为  $Loc(u) = (a, b)$ 、 $Loc(v) = (x, y)$ 。若节点  $v$  的极坐标表示为  $Loc(v) = (r_{uv}, \theta_v)$ , 则有:

$$r_{uv} = \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2} \quad (7)$$

$$\theta_v = \arctan\left(\frac{y - b}{x - a}\right) \quad (8)$$

其中极径  $r_{uv}$  为节点  $u$  到  $v$  的距离, 极角  $\theta_v$  为极轴  $ux$  绕极点  $u$  逆时针旋转到边  $(u, v)$  时, 所旋转的角度, 且满足极角  $\theta_v \in [0, 2\pi]$ 。由于极角  $\theta_v$  通过式 8 计算时得到两个不同的值, 则: 当  $x - a \leq 0, y - b \leq 0$  或者  $x - a \geq 0, y - b \leq 0$  时, 使极角  $\theta_v$  取  $[\pi, 2\pi]$  之间的值; 而其它情况时, 使极角  $\theta_v$  取  $[0, \pi)$  之间的值。

#### 步骤 2 确定节点 $u$ 与其邻居节点所对应圆心角:

设节点  $u$  与  $v$  对应的圆心角为  $\angle v_a u v_b$ , 其中  $v_a$  和  $v_b$  为交接区域分界线  $L$  与区域  $F(u, p)$  相交的两个交点 (如图 7 中所示), 它们的极坐标分别表示为  $Loc(v_a) = (R, \theta_{va})$ 、 $Loc(v_b) = (R, \theta_{vb})$ , 其中  $R$  为圆形区域  $F(u, p)$  的半径, 若:

$$\begin{aligned} \theta'_{va} &= (\theta_v - \arccos(r_{uv}/R)), \\ \theta'_{vb} &= (\theta_v + \arccos(r_{uv}/R)), \\ \arccos(r_{uv}/R) &\in [0, \pi/2] \end{aligned} \quad (9)$$

则有:

(1) 当  $\theta'_{va} < 0$  时 (即极角  $\theta_v \in [0, \pi/2]$ , 且交点  $v_b, v_a$  分别位于极轴  $ux$  上下两侧, 如图 7(a) 所示),

$$\begin{aligned} \theta_{va} &= 2\pi + \theta_v - \arccos(r_{uv}/R), \\ \theta_{vb} &= \theta'_{vb} = \theta_v + \arccos(r_{uv}/R) \end{aligned} \quad (10)$$

(2) 当  $\theta'_{vb} > 2\pi$  时 (即极角  $\theta_v \in [3\pi/2, 2\pi]$ , 且交点  $v_b, v_a$  分别位于极轴  $ux$  上下两侧, 如图 7(b) 所示),

$$\begin{aligned} \theta_{va} &= \theta'_{va} = \theta_v - \arccos(r_{uv}/R), \\ \theta_{vb} &= \theta'_{vb} - 2\pi = \theta_v + \arccos(r_{uv}/R) - 2\pi \end{aligned} \quad (11)$$

(3) 其它情况时,

$$\theta_{va} = \theta'_{va} = \theta_v - \arccos(r_{uv}/R),$$

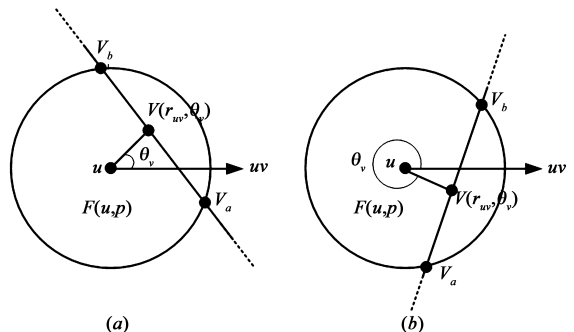


图 7 圆心角  $\angle v_a u v_b$  被极轴从中穿过的两种情况

$$\theta_{vb} = \theta'_{vb} = \theta_v + \arccos(r_{uv}/R) \quad (12)$$

其中,极角  $\theta_{va}, \theta_{vb} \in [0, 2\pi]$ ,  $r_{uv}, \theta_v$  分别为节点  $v$  的极径和极角.

那么对  $F(u, p)$  中的任意一点  $v$ , 有一对交点  $v_a, v_b$  与节点  $u$  关于  $v$  的圆心角  $\angle v_a u v_b$  一一对应, 因此建立如下对应关系  $f: \angle v_a u v_b \leftrightarrow (\theta_{va}, \theta_{vb})$ , 其中  $\theta_{va}, \theta_{vb}$  分别为交点  $v_a, v_b$  的极角. 若节点  $u$  与  $F(u, p)$  内相邻节点所对应的圆心角的集合为  $\Theta$ , 则根据对应关系  $f$ , 集合  $H(u) = \{(\theta_{va}, \theta_{vb}) \mid v \in F(u, p)\}$  与圆心角集合  $\Theta$  相对应, 即集合  $H(u)$  里面的每一个元素代表一个相对应的圆心角.

**步骤 3** 利用集合  $H(u)$  计算节点  $u$  与  $F(u, p)$  内相邻节点所对应圆心角的叠加和:

为了便于利用集合  $H(u)$  计算圆心角的叠加和, 对集合  $H(u)$  作如下变换:

(1) 遍历集合  $H(u)$  中每一个元素. 若存在元素  $(\theta_{va}, \theta_{vb}) \in H(u)$ , 且  $\theta_{va} > \theta_{vb}$  (即  $(\theta_{va}, \theta_{vb})$  所对应的圆心角  $\angle v_a u v_b$  为图 7(a) 或 (b) 其中的任意一种情况), 则使:

$$H(u) = H(u) - \{(\theta_{va}, \theta_{vb})\} + \{(\theta_{va}, 2\pi), (0, \theta_{vb})\}$$

该变换把被极轴穿过的圆心角  $(\theta_{va}, \theta_{vb})$  分成两个不同的小圆心角  $(\theta_{va}, 2\pi)$  和  $(0, \theta_{vb})$ , 再把它们重新并入集合  $H(u)$  中, 使集合  $H(u)$  的元素满足  $\theta_{va} < \theta_{vb}$ .

(2) 把集合  $H(u)$  中所有元素  $(\theta_{va}, \theta_{vb})$ , 按照  $\theta_{va}$  的值的大小, 以从小到大的顺序进行排序.

(3) 计算圆心角的叠加和大小.

(1) 若  $(\theta_{xa}, \theta_{xb})$  为排序后的集合  $H(u)$  中第一个元素, 则把  $\theta_{xa}, \theta_{xb}$  的值分别赋值于  $\phi_0, \phi_1$ .

(2) 将  $(\phi_0, \phi_1)$  依次与集合  $H(u)$  内的每一个元素进行比较, 每一次比较后, 根据比较结果更改  $\phi_0, \phi_1$  的值. 对于  $H(u)$  中的任一元素  $(\theta_{va}, \theta_{vb})$ :

(a) 当  $\theta_{vb} \geq \phi_1 > \theta_{va} \geq \phi_0$ , 则  $\phi_1 = \theta_{vb}, \phi_0 = \phi_0$

(b) 当  $\phi_1 \geq \theta_{vb} > \theta_{va} \geq \phi_0$ , 则  $\phi_1 = \phi_1, \phi_0 = \phi_0$

根据对应关系  $f$ , 则(2)步对圆心角进行了叠加, 其叠加和为  $\phi_1 - \phi_0$ .

(3) 判断  $\phi_1 - \phi_0$  的值是否等于  $2\pi$ , 若等于  $2\pi$ , 则可以判定区域  $F(u, p)$  包含了节点  $u$  的直接传输区域  $R_{F(u)}$ , 反之则不包含.

上述步骤就是 IMECN 算法为节点  $u$  设定发送功率  $p$  后, 判断区域  $F(u, p)$  是否包含节点  $u$  的直接传输区域  $R_{F(u)}$  的具体过程, 下面本文给出整个 IMECN 算法的伪代码(如图 8 所示).

#### Algorithm IMECN

```

1   $p = p_0$ ;
2   $H(u) = \emptyset$ ;
3   $\phi_0 = 0$ ;
4   $\phi_1 = 0$ ;
5  while  $\phi_1 - \phi_0 \neq 2\pi, p \neq p_{\max}$  do {
6   $p = \text{Increase}(p)$ ;
7  Broadcast "Hello" message with
   power  $p$  and gather Acks;
8  Build a polar coordinates about the node  $u$ ;
9   $H(u) = \{(\theta_{va}, \theta_{vb}) \mid v \in F(u, p)\}$ ;
10 for each  $(\theta_{va}, \theta_{vb}) \in H(u)$  do
11 if  $\theta_{va} > \theta_{vb}$  then
12  $H(u) = H(u) - \{(\theta_{va}, \theta_{vb})\}$ 
   +  $\{(\theta_{va}, 2\pi), (0, \theta_{vb})\}$ ;
13 Sort all  $(\theta_{va}, \theta_{vb})$  in  $H(u)$ 
in increasing order by  $\theta_{va}$ ;
14 Let  $(\theta_{xa}, \theta_{xb})$  is the first element in  $H(u)$ ,
15  $\phi_0 = \theta_{xa}, \phi_1 = \theta_{xb}, H(u) = H(u) - \{(\theta_{xa}, \theta_{xb})\}$ ;
16 do Flip( $H(u)$ );
17  $P(u) = p$ 
18 Procedure Flip( $H(u)$ )
19 for each  $(\theta_{va}, \theta_{vb}), (\theta_{va}, \theta_{vb}) \in H(u)$ ,
   in sorted  $\theta_{va}$ 's order do
20 if  $\theta_{vb} \geq \phi_1 > \theta_{va} \geq \phi_0$  then
21  $\phi_1 = \theta_{vb}, \phi_0 = \phi_0, H(u) = H(u) - \{(\theta_{va}, \theta_{vb})\}$ ;
22 else if  $\phi_1 \geq \theta_{vb} > \theta_{va} \geq \phi_0$  then
23  $\phi_1 = \phi_1, \phi_0 = \phi_0, H(u) = H(u) - \{(\theta_{va}, \theta_{vb})\}$ ;
24 end;
```

图 8 IMECN 算法

该算法首先对部分变量进行初始赋值; 以初始功率  $p_0$  开始广播消息并通过返回信息收集邻居节点的信息; 建立极坐标及得到圆心角所对应的集合  $H(u)$ ; 对集合  $H(u)$  中的元素进行修改及排序; 通过  $\text{Flip}(H(u))$  对圆心角进行叠加; 判断圆心角叠加和  $(\phi_1 - \phi_0)$  是否等于  $2\pi$ , 若等于算法停止并设节点  $u$  的发送功率为  $p_0$ , 若  $\phi_1 - \phi_0 \neq 2\pi$  则增大  $u$  的发送功率  $p$ , 重复执行上述步骤, 直到  $\phi_1 - \phi_0 = 2\pi$  或达到节点  $u$  的最大发送功率  $p_{\max}$  为止.

## 4 IMECN 的性能分析

### 4.1 IMECN 算法复杂度

假设网络中的节点数为  $N$ . IMECN 算法中(如图 8), 1-4 行为简单的赋值语句, 与节点数无关, 复杂度

均为  $O(1)$ ; 8 行为建立极坐标系, 复杂度最大为  $O(N)$ ; 9-11 行, 遍历集合  $H(u)$ , 对集合  $H(u)$  内的元素进行变换, 在最坏情况下 (即网络中的所有节点相互覆盖), 复杂度为  $O(N)$ ; 第 12 行对集合  $H(u)$  所有元素进行排序, 复杂度为  $O(N \log N)$ ; 13-14 行也为简单的赋值语句, 复杂度为  $O(3)$ ; 第 15 行调用了 17-25 行的  $Flip(H(u))$  过程, 在这个过程中,  $(\phi_0, \phi_1)$  要与集合  $H(u)$  中的每个元素进行比较, 其复杂度为  $O(N)$ ; 6-15 行是整个  $while$  语句的循环体, 其复杂度与条件  $\phi_1 - \phi_0$  是否等于  $2\pi$  有关. 在最坏条件, 即当  $p$  增大到  $p_{\max}$  时, 圆心角叠加和都不等于  $2\pi$ , 循环结束. 该最坏条件下循环体的复杂度  $O(a(N + N + N \log N + 3 + N))$ ,  $a$  为节点的可调功率等级.

由以上分析可知, IMECN 算法的算法复杂度为  $O(N \log N)$ . 而 SMECN<sup>[3]</sup> 算法的算法复杂度为  $O(N^2)$ , 同 SMECN 算法相比, IMECN 更为简单.

## 4.2 IMECN 算法的能耗特性

### 4.2.1 仿真环境

本文采用了网络仿真软件 NS-2 作为仿真平台. 假设有 30 到 100 个节点随机分布在一个  $1000 \times 1000 \text{m}^2$  的矩形区域中, 每个节点所具有的初始能量为 2J, 最大传输半径为 200m. 仿真中, 我们选用了自由空间传播模型, 传输损耗系数  $\beta$  为 2. 每个节点的天线均为全向天线, 且发送天线和接收天线的增益都为 0dB, 接收阈值为 -94dBW, 设置节点的最大发送功率为 -16.7dbw, 最小发送功率为 -36.7dbw, 在最大发送功率和最小发送功率之间设置 10 个等级, 则与之对应的节点传输半径是 20m ~ 200m; 同时我们采用了经典的 AODV<sup>[12]</sup> 作为网络中的路由方式; 设置了 6 条 CBR 业务流, 所有业务流都是随机地从 30 ~ 100 个节点中进行配置的, 其发包数率为 5 包/秒, 每一个包的大小为 512 字节.

### 4.2.2 仿真结果

图 9 显示了网络中 100 个节点, 通过 IMECN 算法控制后的网络拓扑图 9(a) 和未采用拓扑控制机制 (即所有节点均以最大功率工作) 所形成的网络拓扑图 9(b). 从图 9(a) 和图 9(b) 中很明显地发现, 通过 IMECN 算法

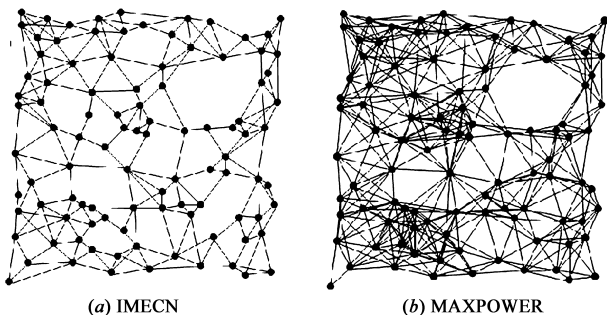


图9 IMECN算法及以最大功率工作导出的网络拓扑

控制后形成网络拓扑图更为简单, 从而可以减少节点间的冲突和节省节点的能量.

接下来我们仿真了网络节点数从 30 个增加到 100 个的过程中网络平均节点度数的变化 (如图 10). 从图 10 中可以看出, 当未采用拓扑控制机制时, 随着节点密度的增加, 网络平均节点度数的增长速度几乎与节点数的增长速度成正比, 但是 IMECN 算法所形成的拓扑的平均节点度随着网络节点数的增加几乎保持不变.

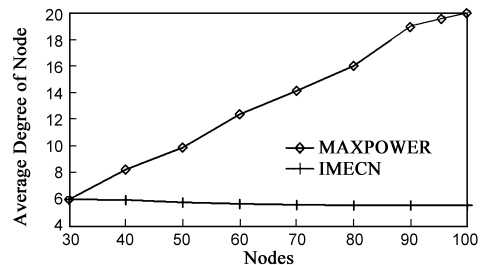


图10 网络拓扑的平均节点度数

图 11 给出了采用 IMECN 算法控制和未采用拓扑控制机制时, 在统计时间间隔 (每隔 10 秒进行 1 次统计) 内业务流上节点的平均剩余能量在仿真时间内的变化情况, 从图 11 中可以看出, IMECN 算法可以有效的节省节点的能量.

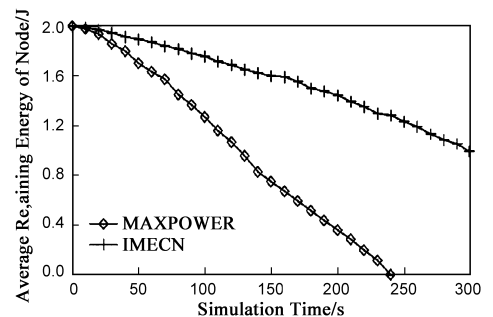


图11 统计时间间隔内业务流上节点平均剩余能量

## 5 结束语

如何节省节点的能量是无线传感器网络设计的主要问题. 拓扑控制通过调节节点的传输功率, 优化网络的性能, 减少节点能量消耗, 从而延长网络的生存时间. 本文对 SMECN 算法进行了改进, 提出了一种新的无线传感器网络拓扑控制算法—IMECN. IMECN 引入了极坐标的概念, 巧妙地将区域覆盖问题转化为角度叠加问题, 通过判断多个圆心角的叠加和是否等于  $2\pi$ , 从而判断传感器节点以一个功率  $p$  传输时的无线传输范围是否覆盖这个节点的直接传输区域.

MECN 和 SMECN 算法相比, IMECN 不仅是一个计算机可直接实现的算法, 且具有更低的复杂度. 同时, 仿真结果表明, IMECN 具有明显的节能特性.

## 参考文献:

- [1] A Chandrakasan, R Amirtharajah, S H Cho, J Goodman, G Konduri, J Kulik, W Rabiner, and A Wang. Design considerations for distributed microsensor systems[A]. Proc. IEEE Custom Integrated Circuits Conf. (CICC)[C]. San Diego: IEEE CS Press, 1999. 279 – 286.
- [2] Li N, Hou J C, Sha L. Design and analysis of an MST based topology control algorithm[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2005, 4(3): 1195 – 1206.
- [3] Li (Erran) Li and Joseph Y Halpern. A minimum-energy preserving topology-control algorithm [J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2004, 3(3): 910 – 921.
- [4] V Rodoplu and T H Meng. Minimum energy mobile wireless networks[J]. IEEE J. Select. Areas Commun, 1999, 17 (8): 1333 – 1344.
- [5] Li (Erran) Li, Joseph Y Halpern and Paramvir Bahl. A cone-based distributed topology-control algorithm for wireless multi-hop networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(1): 147 – 159.
- [6] Bolian Yin, Hongchi Shi, and Yi Shang. A Two-Level Strategy for Topology Control in Wireless Sensor Networks[A]. Proceedings of 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS'05)[C]. Fukuoka: IEEE CS Press, 2005. 358 – 362
- [7] J Liu and B Li. Distributed topology control in wireless sensor networks with asymmetric links[A]. IEEE GLOBECOM' 03 [C]. San Francisco: IEEE CS Press, 2003, 3(8): 1257 – 1262.
- [8] B Chen, K Jamieson, H Balakrishnan, and R Morris. Span: an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks[J]. Mobile Computing and Networking, 2002, 8 (5): 85 – 96.
- [9] Kumar S, Lai T H, Balogh J. On k-coverage in a mostly sleeping sensor network[A]. Haas ZJ, ed. Proc. of the ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom)[C]. New York: ACM Press, 2004. 144 – 158.
- [10] Berman P, Calinescu G, Shah C, Zelikovsky A. Efficient energy management in sensor networks[A]. Xiao Y, Pan Y, eds. Proc. of the Ad Hoc and Sensor Networks, Series on Wireless Networks and Mobile Computing [C]. New York: Nova Science Publishers, 2005.
- [11] T S Rappaport. Wireless Communications: Principles and Practice. Englewood Cliffs [M]. NJ: Prentice-Hall, 1996.
- [12] Perkins C E, Royer E M. Ad-Hoc on demand distance vector routing[A]. Kristine K, ed. Proc of the 2nd Workshop on Mobile Computing Systems and Applications[C]. New Orleans: IEEE Computer Society. 1999. 90 – 100.

## 作者简介:



李 云 男, 1974 年出生于四川西充, 博士, 教授/博导, 东南大学移动通信国家重点实验室博士后. 主要研究方向为互联网理论及技术、Ad hoc 网络/传感器网络技术.  
E-mail: liyun@cqupt.edu.cn

周 娴 女, 1982 年出生于重庆, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络.