

## 异构无线传感器网络支配集拓扑控制算法\*

孙超<sup>+</sup>, 尹荣荣, 郝晓辰, 窦晶晶, 刘彬

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

### Connected Dominating Set Topology Control Algorithm of Heterogeneous Wireless Sensor Networks

SUN Chao<sup>+</sup>, YIN Rong-Rong, HAO Xiao-Chen, DOU Jing-Jing, LIU Bin

(Institute of Electrical Engineering; Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

+ Corresponding author: E-mail: sch723@163.com

Sun C, Yin RR, Hao XC, Dou JJ, Liu B. Connected dominating set topology control algorithm of heterogeneous wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2011, 22(9): 2137-2148. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3895.htm>

**Abstract:** By using the theory of minimum connected dominating set, the issue of topology optimization for heterogeneous wireless sensor networks is studied. Considering the heterogeneous feature of sensor nodes' communication capabilities, a function named area energy consumption rate has been built by integrating the quality of communication links, the transmission range and the remaining energy of nodes. This function has been used to estimate the energy consumption rate of communication areas and determine the selection of dominating nodes. Thus, a distributed topology control algorithm which is minimum connected, has been proposed. The experimental results show that network topology constructed by this algorithm has reliable communication links and high efficiency of energy utilization. It has the potential to significantly prolong the lifecycle of heterogeneous wireless sensor networks.

**Key words:** heterogeneous wireless sensor network; topology control; connected dominating set; area energy consumption rate; link quality

**摘要:** 采用最小连通支配集的理论, 研究异构无线传感器网络拓扑结构的优化问题, 针对传感器节点的通信能力异构特性, 综合通信链路质量、节点传输范围与剩余能量, 构建起一种度量异构节点能量有效性的区域能量消耗率函数。利用该函数判断通信区域的能耗速率并确定支配节点的选择, 设计了一种最小连通支配的分布式拓扑控制算法。实验结果表明, 执行该算法构建起的网络拓扑具有通信链路可靠和能量利用高效的特点, 能够大幅度提高异构无线传感器网络的生命周期。

**关键词:** 异构无线传感器网络; 拓扑控制; 连通支配集; 区域能量消耗率; 链路质量

中图分类号: TP393 文献标识码: A

无线传感器网络WSN(wireless sensor network)是由大量密集部署在监测区域的微型传感器节点构成的一

\* 基金项目: 河北省自然科学基金(F2011203100); 河北省高等学校科学研究计划(2010162)

收稿时间: 2009-06-16; 修改时间: 2010-02-02; 定稿时间: 2010-06-10

种自组织网络.由于WSN真正实现“无处不在的计算”这一理念<sup>[1]</sup>,因此,它作为一种新的计算模式引起了世界各国军事部门、工业界和学术界的极大关注.早期的WSN研究一般均集中在对同构传感器网络(homogeneous sensor network)上,即网络内所有节点资源都是一样的,开展有关低能量网络协议研究<sup>[2]</sup>;而在实际的传感器网络配置和应用时,传感器网络往往呈现一种异构特性,如不同功能、不同配置资源的传感器节点构成异构网络以适应多样化应用需求.此外,即使是同构传感器网络,由于监测环境的复杂性,每个节点不可能均等使用其资源,从而也呈现出异构网络特性.可见,对异构传感器网络(heterogeneous sensor network)的研究更具现实意义.

拓扑控制是WSN的基础研究之一,对路由优化、能量保护和资源分配具有重要作用<sup>[3]</sup>.目前,对异构传感器网络拓扑控制的研究文献主要涉及到了能量和通信能力异构问题.考虑传感器节点初始能量异构特性,2004年,Smaragdakis等人<sup>[4]</sup>针对由两种不同初始能量节点组成的异构传感器网络提出分簇拓扑控制算法SEP,通过为高级节点和普通节点设置不同加权概率竞选簇头来延长网络生命周期,但其仅是为这种二级能量异构网络设计,而真实网络往往并不符合此类严格意义上的二级异构.针对SEP的局限性,2006年,Qing等人<sup>[5]</sup>提出一种适用多级能量异构网络的成簇算法DEEC,通过将选举簇头节点的概率直接与节点剩余能量建立联系,使具有较高初始能量和剩余能量的节点比低能节点有更多的机会成为簇头节点,达到延长网络生存时间的目的.但上述两种网络拓扑构建算法皆以分簇方式搭建虚拟骨干结构,簇头节点与基站之间的单跳通信限制了网络应用规模,且忽略了节点通信能力异构特性对网络拓扑构建的影响,存在单向通信链路问题.考虑传感器节点通信能力异构特性,2007年,Thai等人<sup>[6]</sup>率先以DBG(disk graphs with bidirectional links)图对WSN进行建模,并在此基础上提出基于最小连通支配集的近似算法TTA,可适用于传输范围异构的WSN,但仍以最小化连通支配集大小为构建目标,通过简单地选取传输范围大的节点作为支配节点,可最小化支配节点间通信链路的节点为连接节点实现拓扑构建,忽略了连通支配集的能量效率问题,网络能量利用率不高.

针对上述算法构建适用于异构传感器网络能量优化拓扑的局限性,本文从传感器节点通信能力异构特性与节点能耗之间的变化关系入手,综合节点担负支配任务后对整个网络的节能程度影响,提出了区域能量消耗率拓扑生成标准,并设计了一种基于区域能量消耗率的分布式连通支配集拓扑控制算法 AECR-CDS(area energy consumption rate based distributed topology control algorithm for connected dominating set).实验结果表明,该算法在保证网络连通性的前提下,不仅能够确保搭建高可靠通信链路,而且有效延长了网络生命周期.

## 1 理论基础

### 1.1 网络模型及定义

异构传感器网络是指由多种不同类型的传感器节点构成的无线网络<sup>[7]</sup>.节点能量和通信能力异构特性是异构传感器网络普遍存在的<sup>[8]</sup>,本文正是研究适用于这种能量和通信能力异构的无线传感器网络能量优化拓扑控制算法.

异构传感器网络可以建模为一个二维平面图 $G(V,E)$ .其中, $V$ 为点集, $E$ 为边集,分别对应于异构网络中的节点集和链路集. $G$ 中每个节点 $v \in V$ 的传输范围为 $r \in [r_{\min}, r_{\max}]$ ,某无向边 $(v_i, v_j) \in E$ 属于该图当且仅当 $v_i$ 和 $v_j$ 之间的距离 $d(v_i, v_j)$ 满足 $d(v_i, v_j) \leq \min\{r_i, r_j\}$ ,如图1所示.

为了方便后续算法的描述,这里给出一些相关定义.

**定义 1(邻节点和邻节点集)**<sup>[9]</sup>. 异构网络中,对于节点 $u$ ,若 $\exists v \in V, d(u, v) \leq \min\{r(u), r(v)\}$ ,其中, $r(u), r(v)$ 分别为节点 $u, v$ 的通信范围,称 $v$ 为 $u$ 的邻节点, $u$ 的所有邻节点组成 $u$ 的邻节点集 $N(u)$ .

**定义 2(连通)**<sup>[10]</sup>. 异构网络中,对于任意两节点 $u, v$ ,若存在链路 $u \leftrightarrow w_1 \leftrightarrow w_2 \leftrightarrow \dots \leftrightarrow w_k \leftrightarrow v$ ,称节点 $u$ 和 $v$ 是连通的;若异构网络中所有节点都能保证两两连通,则异构网络为连通网络.

**定义 3(连通支配集和极大独立集)**<sup>[11]</sup>. 图 $G(V,E)$ 中,设 $C \subseteq V$ ,对 $\forall u \in V$ ,若 $u \in C$ 或 $\exists v \in C, (u, v) \in E$ ,称 $C$ 为 $G(V,E)$ 的支配集;若由 $C$ 导出的子图为连通图,则称 $C$ 为 $G(V,E)$ 的连通支配集.其中,元素个数最小的连通支配集,称为最小连通支配集.设 $U \subseteq V$ ,对 $\forall u, v \in U$ ,若 $(u, v) \notin E$ ,即 $U$ 中不存在任意相邻的节点,称 $U$ 为 $G(V,E)$ 的独立集;若对 $\forall u \in V-U, U \cup \{u\}$ 不是独立集,则称 $U$ 为 $G(V,E)$ 的极大独立集.

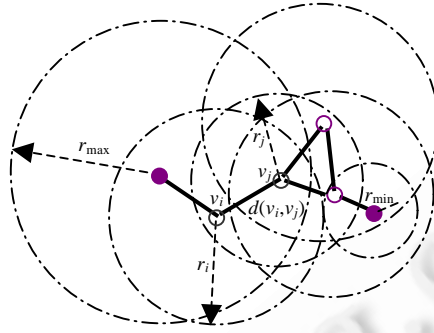


Fig.1 Heterogeneous sensor networks modeling

图 1 异构传感器网络建模

1.2 区域能量消耗率

WSN 中,各传感器节点特性之间相互影响.因此,为了构建能量优化的网络拓扑,基于连通支配集理论,一个节点在担负支配任务后的节能程度,不仅需考虑其自身能量效率,还应综合考虑自身通信区域内受其支配的所有非支配节点的能量效率,使得节点采取的局部优化趋于全局优化.基于上述分析,本文定义由节点自身和其通信区域内所支配的所有邻节点能量效率构建的区域能量消耗率反映了节点能量有效性,提出了以区域能量消耗率作为度量节点担负支配任务后的节能程度标准,并从理论上建立了节点通信能力异构特性与区域能量消耗率之间的变化关系.

定义 4(区域能量消耗率). 异构网络中,对于具有 $n_0$ 个邻节点的任意节点 $u$ 的可达通信区域 $R_u$ ,称公式(1)为节点 $u$ 的区域能量消耗率:

$$AECR(u) = \left( E_{co}(u) + \sum_{i=1}^{n_0} E_{co}(v_i) \right) / \left( E_{cr}(u) + \sum_{i=1}^{n_0} E_{cr}(v_i) \right) \tag{1}$$

其中,节点 $u$ 和 $v_i$ 皆位于 $R_u$ 内,且 $v_i \in N(u)$ ;  $E_{cr}(u), E_{cr}(v_i)$ 分别为节点 $u$ 和 $v_i$ 的当前剩余能量值;  $E_{co}(u), E_{co}(v_i)$ 分别代表节点 $u$ 和 $v_i$ 的当前能量消耗量.

下面具体给出节点通信能力异构特性与区域能量消耗率之间变化关系的推导过程.

不失一般性,对于无线传感器网络节点通信单元,其工作平均功耗 $E_{commu}$ 可表示为<sup>[12]</sup>

$$E_{commu} = M_{tx} [P_{tx}(L/R + T_{sw}) + (L/R)P_{out}] + M_{rx} [P_{rx}(L/R + T_{sw})] \tag{2}$$

其中: $M_{tx/rx}$ 是平均每秒发送/接收单元工作次数,主要由具体应用环境及MAC协议来决定; $P_{tx/rx}$ 是发送/接收单元电路消耗的平均功率; $L$ 是传输包长(bits); $R$ 是传输速率(b/s); $T_{sw}$ 是状态切换时间,一般在几百微秒范围,主要由锁相环路带宽决定; $P_{out}$ 是输出功率.

考虑到节点信息收发过程受信道通信质量的约束,节点 $u$ 成功完成一次收发过程(发送和接收一个包)所消耗的能量可以表示为

$$E_{commu}(u) = [P_{tx}(L/(R \cdot P_{PRR}) + T_{sw}) + (L/(R \cdot P_{PRR}))P_{out}] + P_{rx}(L/(R \cdot P_{PRR}) + T_{sw}) \tag{3}$$

其中, $P_{PRR}$ 是信息传输链路上的收包率,直接反映信道通信质量的度量指标.

采用Wang<sup>[13]</sup>提出的改进Friis方程表示实际环境中的无线信道,即

$$P_r = P_{out} (\lambda / 4\pi d_0)^2 (d_0/d)^n G_1 G_2 \tag{4}$$

其中, $P_r$ 是接收功率; $\lambda$ 是电磁波长; $d_0$ 参考距离,一般取 1m; $d$ 是发射方与接收方天线之间的距离; $n$ 是路径损耗指数; $G_1$ 是发射天线增益; $G_2$ 是接收天线增益.

由于传感器节点的接收灵敏度 $S_r$ 代表无线电接收机可以接收的最小接收功率,故将其作为节点能够接收到信息的接收功率阈值.把 $P_r = S_r$ 代入公式(4)可得节点 $u$ 输出功率 $P_{out}$ 与其相应有效通信距离 $r(u)$ 的变化关系:

$$r(u) = \sqrt[n]{(P_{out}(u) \cdot \lambda^2 d_0^{n-2} G_1 G_2) / (16 S_r \pi^2)} \tag{5}$$

将公式(5)代入公式(3),即可建立起节点  $u$  完成一次成功收发过程的能量消耗量与其有效通信距离  $r(u)$  的关系:

$$E_{commu}(u)=[A+(L/(R \cdot P_{PRR}))(P_{tx}+B \cdot r^n(u))]+[A+(L/(R \cdot P_{PRR}))P_{rx}] \quad (6)$$

其中,  $A=P_{tx}T_{sw}=P_{rx}T_{sw}$ ,  $B=(16S_i\pi^2d_0^{2-n})/(\lambda^2G_1G_2)$ .

基于连通支配集拓扑结构,对于网络中任意节点 $u$ ,若 $u$ 节点为支配节点,由于它不仅要完成自身信息传输而且还承担其所支配的 $n_0$ 个邻节点的信息转发任务,所以依据公式(6),其能量消耗量 $E_{commu}(u)$ 可表示为

$$E_{commu}(u)=[A+(L/(R \cdot P_{PRR_i}))(P_{tx}+B \cdot r^n(u))]+\sum_{i=1}^{n_0}[A+(L/(R \cdot P_{PRR_{v_i}}))P_{rx}] \quad (7)$$

其中,  $P_{PRR_i}$ 是发送信息传输信道的链路质量.为保证发送信息能够被其所支配的链路质量最差的邻节点接收到,则  $P_{PRR_i} \leq \min\{P_{PRR_{v_1}}, P_{PRR_{v_2}}, \dots, P_{PRR_{v_n}}\}$ ;  $P_{PRR_{v_i}}$ 代表节点 $u$ 与其所支配的邻节点 $v_i$ 之间的链路质量.

若 $u$ 节点为非支配节点,因其无需担负起数据转发任务,所以由公式(6)可得其能量消耗量 $E_{commu}(u)$ 为

$$E_{commu}(u)=A+(L/(R \cdot P_{PRR_i}))(P_{tx}+B \cdot r^n(u)) \quad (8)$$

结合公式(7)、公式(8),由定义 4 易得,若节点  $u$  成为支配节点,则其区域能量消耗率  $AECR(u)$ 可表示为

$$AECR(u) = \frac{A(2n_0 + 1) + (L/(R \cdot P_{PRR_i}))(P_{tx} + B \cdot r^n(u)) + \sum_{i=1}^{n_0} (L/(R \cdot P_{PRR_{v_i}}))(P_{rx} + P_{tx} + B \cdot r^n(v_i))}{\left[ E_{cr}(u) + \sum_{i=1}^{n_0} E_{cr}(v_i) \right]} \quad (9)$$

可见,网络中任意节点  $u$  担负支配任务后,其区域能量消耗率仅与自身和其所支配的邻节点个数、当前能量值、有效通信范围和通信链路质量有关.

## 2 AECR-CDS 拓扑控制算法

### 2.1 AECR-CDS算法组成

基于区域能量消耗率的拓扑控制算法 AECR-CDS 主要由 3 个阶段构成:

- 信息交换:各传感器节点通过信息交换的方式获得邻节点信息,实现邻居信息列表的建立;
- 支配集构建:依据节点区域能量消耗率,综合极大独立集思想,实现网络支配集拓扑的构建;
- 连接节点选取:各传感器节点依据其两跳内邻居信息选取恰当连接节点,形成连通支配集,实现异构网络最小能耗拓扑的近似.

#### 2.1.1 信息交换

网络中的所有节点依次以最大发射功率广播Hello消息,包括节点 $Id$ ;任意收到Hello的节点回复Answer消息,包括接收到的 $Id$ 、自身 $Id$ 、当前剩余能量值 $E_{cr}$ 及通信范围 $r$ ;当收到包含自身 $Id$ 的Answer消息的节点,测得Answer信息通信链路质量 $P_{PRR}$ ,并一并存储相应的Answer包信息于邻居列表,然后依据邻居列表存储的有信息,由公式(8)计算自身成为支配节点后的区域能量消耗率 $AECR$ ,并将此 $AECR$ 值和自身 $Id$ 打包,广播Reconfirm信息;收到Reconfirm消息的节点,若其邻居列表中已存在Reconfirm中的 $Id$ 项,则存储Reconfirm信息于相应的邻居列表中,否则不作任何处理.以任意节点 $u$ 为例,其邻居信息列表 $Neighbor-List(u)$ 是:

$Id(v_i)$	$E_{cr}(v_i)$	$r(v_i)$	$P_{PRR_{v_i}}$	$AECR(v_i)$	$State(v_i)$	$High(v_i)$

$Id(v_i)$ 表示 $u$ 的任意邻居 $v_i$ 的 $Id$ ;  $E_{cr}(v_i)$ 表示 $v_i$ 的当前剩余能量值;  $r(v_i)$ 表示 $v_i$ 的有效通信范围;  $P_{PRR_{v_i}}$ 表示 $u$ 和 $v_i$

之间通信链路的收包率;  $AECR(v_i)$ 表示 $v_i$ 的区域能量消耗率;  $State(v_i)$ 表示 $v_i$ 状态位:若节点处于初始状态,则 $State$ 记为 0;若处于支配状态,  $State$ 记为 1;若处于被支配状态,  $State$ 记为 2;若处于连接节点状态,  $State$ 记为 3;  $High(v_i)$ 表示节点 $v_i$ 高度标记,初始标记皆为 0,后续进行修改.该阶段程序如图 2 所示.

```

Information Exchange():
1 for (each node  $u$ ) do
2 while (receive Hello from  $v_i$ ) do
3   sent Answer include  $Id(u)$ ,  $E_{cr}(u)$ ,  $r(u)$  and  $Id(v_i)$ 
4   while (receive Answer from  $v_i$ ) do
5     insert a new line into  $Neighbor-List(u)$ 
6      $Id=Id(v_i)$ ;  $E_{cr}=E_{cr}(v_i)$ ;  $r=r(v_i)$ 
7     calculate  $AECR(u)$ 
8     sent Reconfirm include  $Id(u)$  and  $AECR(u)$ 
9     while (receive Reconfirm from  $v_i$ ) do
10      if  $v_i$  is in  $Neighbor-List$  do
11         $AECR=AECR(v_i)$ 
12      end if
13    end while
14  end while
15 end while
16 end for

```

Fig.2 Procedure of information exchanging stage

图 2 信息交换阶段程序

### 2.1.2 支配集构建

本阶段采用网络广度优先搜索树BFS(breath-fist search tree)<sup>[6]</sup>实现网络中各节点所在树中的高度标记,保证全网节点皆存在一个非零的高度标识 $High$ ,并基于此完成网络极大独立集的构建.该阶段程序如图 3 所示,具体描述如下.

网络中  $State$  为 0 的节点若自身  $AECR$  值小于所有同高度且  $State$  标记为 0 的邻节点的  $AECR$  值,或其邻居信息列表中已无满足同高度且  $State$  为 0 的邻节点,则将其自身状态  $State$  标记修改为 1,成为支配节点,发送 dominating 消息,包括节点  $Id$  和状态标识  $State$ ;收到 dominating 消息的所有  $State$  为 0 的邻节点存储相应接收的邻节点  $State$  值,并将自身  $State$  修改为 2,成为非支配节点,发送 dominated 消息,包括节点  $Id$  和状态标识  $State$ ;接收到 dominated 信息的节点,相应修改其邻居信息列表中所接收的邻节点  $State$  状态.

```

Dominating Set Constructed():
1 Carry out the BFS
2 for (each node  $State(u)=0$ ) do
3   for ( $\forall v_i \in N(u)$ ,  $High(v_i)=High(u)$  and  $State(v_i)=0$ ) do
4     if ( $AECR(u) \leq AECR(v_i)$ ) do
5       update  $State(u)=1$ ; broadcast dominating information include  $Id(u)$  and  $State(u)$ 
6     end if
7   end for
8   while receive dominated information from  $v_i$  do
9      $State=State(v_i)$ 
10  end while
11  while receive dominating information from  $v_i$  do
12     $State=State(v_i)$ ; update  $State(u)=2$ ; broadcast dominated information include  $Id(u)$  and  $State(u)$ 
13  end while
14  for ( $\forall v_i \in N(u)$ ,  $High(v_i)=High(u)$  and  $State(v_i) \neq 0$ ) do
15    update  $State(u)=1$ 
16  end for
17 end for

```

Fig.3 Procedure of dominating set building stage

图 3 支配集构建阶段程序

如此,网络中所有节点被分为两类:支配节点和非支配节点.由于在网络每一高度级都选取了具有相对较低区域能量消耗率的节点担负支配任务,所以构建的网络极大独立集不仅能够确保同级或相邻级支配节点间都能够通过两跳路径实现通信,而且有利于最大化整个网络寿命.

### 2.1.3 连接节点选取

为了搭建一个数据转发优化的实用网络结构,各节点在获得其两跳远支配节点信息的基础上构建低能耗连通支配集,实现异构网络最小能耗拓扑的近似.该阶段程序如图 4 所示,实现过程描述如下.

网络中  $State$  为 2 的所有节点统计其相邻支配节点数目,若其存在两个或两个以上的相邻支配节点,则广播 connector 消息,包括节点  $Id$ 、 $AECR$  值和相邻支配节点的  $Id$  集合;收到 connector 消息的支配节点,存储其接收到的邻节点 connector 消息于两跳远支配节点列表 2HDD(2 hop distance dominator):

$Id(v_i)$	$AECR(v_i)$	$Id(w \in N(v_i) \ \& \ State(w) == 1)$
-----------	-------------	---

并依据  $AECR$  递增顺序排列该列表,以  $AECR$  值从小到大依次选取相应邻节点担任连接任务,发送 connecting 消息,包括连接节点  $Id$ ,直到与其两跳远支配节点皆建立通信链路为止;收到 connecting 消息的  $State$  为 2 的节点,若其  $Id$  包含于 connecting 消息中,则成为连接节点, $State$  修改为 3,并发送 F-connect 消息,包括自身  $Id$  和  $State$  状态;收到 F-connect 消息的  $State$  为 1 的节点,存储相应 F-connect 信息,并将与该连接节点相连的支配节点  $Id$  从其 2HDD 中删除.

```

Connector Selected():
1 for (each node  $State(u) == 2$ ) do
2   if dominator numbers of  $u$  more than 1
3     broadcast connector information include  $Id(u)$ ,  $AECR(u)$  and  $Ids$ 
4   end if
5   while receive connecting information from  $v$ 
6     if  $Id(u)$  included in connecting information
7       update  $State(u) = 3$ ; broadcast F-connect information include  $Id(u)$  and  $State(u)$ 
8     end if
9   end while
10 end for
11 for (each node  $State(u) == 1$ ) do
12   if receive connector information from  $v$ 
13     insert a new line into 2HDD
14      $Id = Id(v)$ ;  $AECR = AECR(v)$ ;  $Id = Ids$ ; select connector  $v_i$ ; broadcast connecting information include  $Id(v_i)$ 
15   end if
16   while receive F-connect information from  $v$ 
17     store  $State(v) = 3$ ; delete  $w \in N(v) \ \& \ State(w) == 1$  from 2HDD
18   end while
19 end for

```

Fig.4 Procedure of connector selecting stage

图 4 连接节点选取阶段程序

## 3 性能评价

下面通过对 AECR-CDS 算法得到的网络拓扑性能进行分析,论证该算法的正确性和有效性.

### 3.1 理论证明

**定理 1.** 异构网络中,若图  $G(V, E)$  是连通的,则  $G_{AECR-CDS}(V, E_{AECR-CDS})$  也是连通的.其中,  $G(V, E)$  是各节点以其最大发射功率通信的初始网络拓扑,  $G_{AECR-CDS}(V, E_{AECR-CDS})$  是 AECR-CDS 算法生成的网络子拓扑.

**证明:** 依据 AECR-CDS 算法的支配集构建阶段可知,图  $G_{AECR-CDS}(V, E_{AECR-CDS})$  将网络中所有节点标记为两类:支配节点与非支配节点.如果非支配节点与支配节点之间存在通信链路.同时,支配节点之间也存在通信链路,那么网络中任意两节点间都能够通过“非支配节点  $\leftrightarrow$  支配集  $\leftrightarrow$  非支配节点”的通信链路进行数据传输.由于支配集构建阶段不仅确保了网络中任意非支配节点都至少存在一个支配节点与其相连,而且能够保证同级或相邻级支配节点间以两跳链路实现通信,在此基础上,经连接节点选取阶段,又建立了任意相距两跳远的支配节点间通信链路,所以由定义 2 易知,若  $G(V, E)$  连通,则  $G_{AECR-CDS}(V, E_{AECR-CDS})$  也连通.  $\square$

**引理 1.** 异构网络中,对于  $\forall u \in V$ , 存在  $|N_{ID}(u)| \leq 9.84[\ln K / \ln(2 \cos(\pi/4.92))]$ . 其中,  $N_{ID}(u)$  表示节点  $u$  的独立邻居

集,  $K=r_{\max}/r_{\min}$ .

证明:不失一般性,假设  $r_{\min}$  为单位 1,且节点  $u$  的通信范围大于其所有邻节点的通信范围,则节点  $u$  的相邻节点  $v$  的发射范围至少为  $d(u,v)$ ,至多为  $K$ .因此,与节点  $u$  相邻的所有邻节点  $v_i$  皆位于以节点  $u$  为圆心、以 1 单位和  $K$  单位为半径的圆环域内,如图 5(a)所示.

假设节点  $x$  和  $y$ ,  $x$  和  $z$  互为邻节点(图 5(b)),  $\angle yxz=\alpha, d(x,y)\leq d(x,z)$ ,则节点  $y$  的通信范围至少为  $d(y,x)$ ,节点  $z$  的通信范围至少为  $d(z,x)$ .为保证节点  $y$  和  $z$  也互为邻节点,则需满足  $d(y,z)\leq d(x,y)$ ;当  $d(y,z)=d(x,y)$  时,  $\angle yxz=\alpha, d(x,z)=2d(x,y)\cos(\alpha)$ .可见,此时是节点  $y, z$  互为邻居的临界条件.

基于上述分析,以节点  $u$  为圆心、分别以  $1, 2\cos(\alpha), 2\cos(\alpha)^2, \dots, 2\cos(\alpha)^p$  为半径,划分以  $u$  为圆心、 $K$  为半径的圆域,保证  $2\cos(\alpha)^p \leq K$ ,即  $p \leq \ln K / \ln(2\cos(\alpha))$ .所以,该圆域被划分为  $p$  个环带,如图 5(a)所示,射线  $ua, ud$  交环带  $2\cos(\alpha)^k \rightarrow 2\cos(\alpha)^{k+1}$  于点  $a, b, c, d$ .设节点  $m$  在区域  $abcd$  内.由于  $d(u,c)/d(u,b)=d(u,d)/d(u,a)=2\cos(\alpha)$ ,由图 5(b)分析可知,此时满足点  $a$  和  $b, c$  和  $d$  相连的临界条件.所以,  $abcd$  域内任何节点都和节点  $m$  互为邻节点.

因此,  $abcd$  域的划分个数就等价于节点  $u$  的独立邻居集大小.所以,节点  $u$  的独立邻节点集  $|N_{ID}(u)| \leq \lceil \ln K / \ln(2\cos(\alpha)) \rceil \cdot (2\pi/\alpha)$ ,当  $0 < \alpha < \pi/3$  时,在  $\alpha=\pi/4.92$  处,  $f(\alpha)=\lceil \ln K / \ln(2\cos(\alpha)) \rceil \cdot (2\pi/\alpha)$  存在最小值,即  $|N_{ID}(u)| \leq 9.84 \lceil \ln K / \ln(2\cos(\pi/4.92)) \rceil$ . □

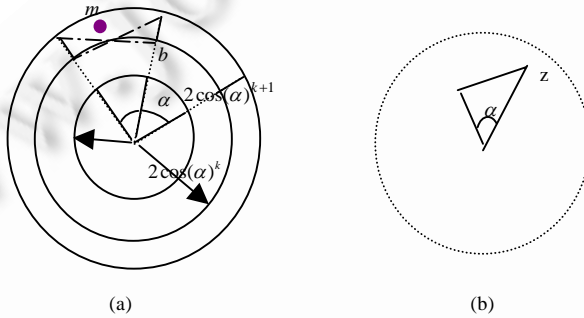


Fig.5 Independent neighbor graph of node  $u$   
图 5 节点  $u$  的独立邻居图

**引理 2.** 异构网络中,对于  $\forall u \in V, v \in V$ , 以及  $(u,v) \in E$ , 存在  $|N_{ID}(u)+N_{ID}(v)| \leq 16.3 \lceil \ln K / \ln(2\cos(\pi/4.92)) \rceil$ .

证明:不失一般性,假设  $r(u) > r(v)$ ,如图 6 所示.由于  $d(u,A) > d(v,A)$ ,所以  $\angle uvA \geq \pi/3, \angle AvB \geq 2\pi/3$ .即节点  $v$  的通信领域内至少  $2\pi/3$  的区域被节点  $u$  的独立邻居所覆盖,  $|N_{ID}(v)| \leq (4\pi/3\alpha) \cdot \lceil \ln K / \ln(2\cos(\alpha)) \rceil$ .由引理 1 可知,  $|N_{ID}(u)+N_{ID}(v)| \leq [(2\pi/\alpha)+(4\pi/3\alpha)] \cdot \lceil \ln K / \ln(2\cos(\alpha)) \rceil$ ,即  $|N_{ID}(u)+N_{ID}(v)| \leq 16.3 \lceil \ln K / \ln(2\cos(\pi/4.92)) \rceil$ . □

**定理 2.** 异构网络中,通过 AECD-CDS 算法构建的连通支配集  $G_{AECD-CDS}(V, E_{AECD-CDS})$  满足:

$$\sum_{i=1}^n AECD(u_i) \leq k \sum_{j=1}^{opt} AECD(v_j),$$

其中:  $k=3+9.36\beta(\ln K / \ln(2\cos(\pi/4.92))-1)$ ,  $\beta=\max_{i,j \in E} AECD(i)/AECD(j)$ ;  $n$  为  $G_{AECD-CDS}(V, E_{AECD-CDS})$  的骨干节点个数;  $u_i$  为  $G_{AECD-CDS}(V, E_{AECD-CDS})$  中骨干节点;  $opt$  代表最小能耗意义下的虚拟骨干集  $G_{MIN-CDS}(V, E_{MIN-CDS})$  规模;  $v_j$  代表  $G_{MIN-CDS}(V, E_{MIN-CDS})$  中的骨干节点.

证明:设  $G_{MIN-CDS}(V, E_{MIN-CDS})$  为网络最小能耗意义下的虚拟骨干集.考虑  $G_{AECD-CDS}(V, E_{AECD-CDS})$  骨干网由 AECD-CDS 算法选取的支配节点集和连接节点集组成,下面分两部分来论证该定理的正确性:

(1) 支配节点集:假设节点  $u$  是  $G_{MIN-CDS}(V, E_{MIN-CDS})$  上任意节点,那么在  $G_{AECD-CDS}(V, E_{AECD-CDS})$  拓扑中,节点  $u$  要么为支配节点,要么为非支配节点.若节点  $u$  为支配节点,则由节点  $u$  的一般性可得,  $G_{AECD-CDS}(V, E_{AECD-CDS})$  骨干网区域能量消耗率等于  $G_{AECD-MIN}(V, E_{AECD-MIN})$  区域能量消耗率;若节点  $u$  为非支配节点,依据引理 1 和引理 2 可知,若节点  $u$  在其邻居节点中具有最大有效通信范围,则  $u$  节点的独立邻居节点集满足 Case 1, 否则满足 Case 2:

Case 1.  $|N_{ID}(u)| \leq 9.84[\ln K / \ln(2\cos(\pi/4.92))]$ ;

Case 2.  $|N_{ID}(u)| \leq 6.56[\ln K / \ln(2\cos(\pi/4.92))]$ .

由图 6 可知,网络中任意节点  $u$  至多存在 5 个符合 Case 1 的相互独立邻节点,所以,设  $n$  代表  $G_{MIN-CDS}(V, E_{MIN-CDS})$  上满足 Case 1 的节点个数,则  $n/(opt-n) \leq 5$ . 分别记节点  $u$  的独立邻节点为  $v_1, v_2, \dots, v_p$ , 由  $G_{AECR-CDS}(V, E_{AECR-CDS})$  支配集的构建依据可得,至少存在一个独立邻节点其区域能量消耗率小于  $AECR(u)$  成为支配节点,其余独立节点权值至多为  $\beta \cdot AECR(u)$ . 所以,节点  $u$  依据其有效通信范围(Case 1 或 Case 2),获得的相邻独立节点集区域能量消耗率分别满足:

Case 1-1.  $AECR(|N_{ID}(u)|) \leq [1 + \beta(9.84(\ln K / \ln(2\cos(\pi/4.92))) - 1] \cdot AECR(u)$ ;

Case 2-1.  $AECR(|N_{ID}(u)|) \leq [1 + \beta(6.56(\ln K / \ln(2\cos(\pi/4.92))) - 1] \cdot AECR(u)$ .

由节点  $u$  的一般性,可以推广到整个  $G_{MIN-CDS}(V, E_{MIN-CDS})$  上. 易见,  $G_{AECR-CDS}(V, E_{AECR-CDS})$  支配集  $U$  满足:

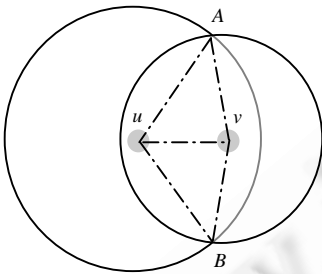


Fig.6 Independent neighbor graph of  $(u, v)$   
图 6  $(u, v)$  独立邻居图

$$AECR(|U|) \leq [1 + 9.36\beta(\ln K / \ln(2(\cos \pi / 4.92)) - 1)] \cdot \sum_{j=1}^{opt} v_j.$$

(2) 连接节点集: 设  $G(V, E)$  中  $u_i v_1, v_2 \dots v_n u_j$  是节点  $u_i$  和  $u_j$  间区域能量消耗率最小链路.

由于  $G_{AECR-CDS}(V, E_{AECR-CDS})$  拓扑中任何非支配节点皆至少存在一个支配节点与其相邻,所以记  $u_1, u_2, \dots$  等为非支配节点  $v_1, v_2, \dots$  的相应支配节点. 考虑到  $G_{AECR-CDS}(V, E_{AECR-CDS})$  中任意相距 2 跳远的支配节点间皆局部选取了区域能量消耗率最小的邻节点担任连接节点任务,所以,相距两跳远支配节点  $u_1$  和  $u_2$  之间的连接节点  $c_{i,i+1}$  满足  $AECR(c_{i,i+1}) \leq AECR(v_i) + AECR(v_{i+1}), 1 \leq i \leq n$ .

因此,  $G_{AECR-CDS}(V, E_{AECR-CDS})$  骨干网中连接节点集  $I$  满足  $AECR(|I|) \leq 2 \sum_{j=1}^{opt} v_j$ . 即  $G_{AECR-CDS}(V, E_{AECR-CDS})$  骨干网

的区域能量消耗率满足  $AECR(|U| + |I|) \leq [3 + 9.36\beta(\ln K / \ln(2(\cos \pi / 4.92)) - 1)] \cdot \sum_{j=1}^{opt} v_j$ . □

### 3.2 实验分析

通过理论分析已经证明了 AECR-CDS 算法构建的网络拓扑具有连通和低能耗的良好特性,下面通过实验对由 AECR-CDS 算法构建的拓扑的相关性能进行验证.

Thai 等人提出的最小连通支配集近似算法 TTA 与 AECR-CDS 一样,从实用角度出发,基于通信范围异构网络模型,可适用于异构网络的拓扑控制.因此,采用 TTA 为比较对象,选择网络链路可靠性、节能程度和生命周期等性能指标对 TTA 算法和 AECR-CDS 算法构建的网络拓扑进行性能比较和评价.

实验场景参数设置:传感器节点个数为  $N$ ,随机分布于  $1000m \times 1000m$  的监测区域内;基站放置于监测区域中心;节点采用全向天线,假定传输范围为  $[200m, 250m]$  半径的圆;初始能量为  $[1.0J, 1.5J]$  范围内的随机值;状态切换时间  $T_{sw} = 100\mu s$ ,传输包长  $L = 1000bits$ ,路径损耗指数  $n = 3$ ,阴影衰落变量  $X_{dB}$  服从方差  $\sigma = 4$  的对数正态分布,信道噪声  $P_n = -106dBm$ ,噪声带宽  $B = 400kHz$ ,参考距离  $d_0 = 1m$ ,  $d_0$  处的路径损耗值  $PL(d_0) = 55dBm$ ,数据传输速率  $R = 250kbps$ ,灵敏度  $S_r = -94dBm$ ,发送/接收单元电路消耗  $P_{tx/rx} = 50nJ/bit$ ,数据融合耗能  $E_{DA} = 5nJ/bit$ ,放大器的放大倍数  $\epsilon_{amp} = 100pJ/(bit \cdot m^2)$ ,载波波长  $\lambda = 5.77 \times 10^{-4}m$ ,发送/接收天线增益  $G_1 = G_2 = 10dBi$ ,节点能量阈值为  $0.1J$ .

#### 3.2.1 网络链路可靠性对比

就 WSN 路由协议的设计而言,选取高可靠的通信链路进行数据传输至关重要.因此,拓扑链路可靠性是一个很重要的网络性能评价指标.收包率是最明确反映链路质量的指标<sup>[14]</sup>,节点间的收包率值越接近 1,数据包的丢失量越小,即节点间的链路质量越好.链路质量方差反映了网络中各通信链路质量与网络平均链路质量之间的偏差程度,其值越小,网络整体链路质量越均衡.为了对比 TTA 和 AECR-CDS 算法构建的拓扑链路可靠性,仿真实验采用对数正态阴影模型(log-normal shadowing model)作为物理层无线传播模型,在  $1000m \times 1000m$  的监测区域



内随机播撒传感器节点构建网络,依次改变节点总数 $N$ 为 80,120,160,200,240,280,320,360 和 400.采用上段给出的实验场景参数值,在不同的规模下分别执行 TTA 和 AECR-CDS 算法各 100 次,利用无线传播模型计算信号经衰落信道到达接收端的能量损耗,进而基于收包率与接收端信号强度的理论关系<sup>[15]</sup>获得网络通信链路的收包率并求取其均值和方差,结果如图 7 所示.

由图 7(a)可见,依据 TTA 和 AECR-CDS 协议构建的网络拓扑,其通信链路收包率均值随网络规模递增皆存在上升趋势,且在大中型网络规模下,AECR-CDS 拓扑链路收包率均值明显优于 TTA.这主要是因为随着节点总数的增加,节点间距减小,高收包率的通信链路增多,网络链路质量总体呈上升趋势.节点间通信链路质量受节点发射功率与节点间距离共同作用,节点发射功率越大,节点间通信距离越小,节点间的链路质量越好.由于小规模网络中节点数目少,节点间距离较大,依据发射功率最大值选取节点构建骨干集的 TTA 算法能够克服较大节点间通信距离对网络链路质量的影响.而 AECR-CDS 算法以节能为拓扑优化目标,考虑网络的能耗均衡,避免选择大功率节点担负支配任务,因而较 TTA 而言,在小规模网络场景下,受网络节点间距较大的影响,其链路质量优势不明显.但随着网络节点数目的递增,节点间距离减小,TTA 通过选择大发射功率节点构建支配集提升链路质量的效果逐渐减弱.同时,由于 AECR-CDS 利用区域能量消耗率构建的拓扑中网络节点间通信距离较 TTA 算法要短,尽管没有选择发射功率较大的节点构建支配集,但算法以构建具有较短距离通信链路的拓扑结构,优化网络端到端收包率的优势逐渐突出.从而大中型网络规模下,AECR-CDS 拓扑较 TTA 表现出更为优越的可靠链路特性.

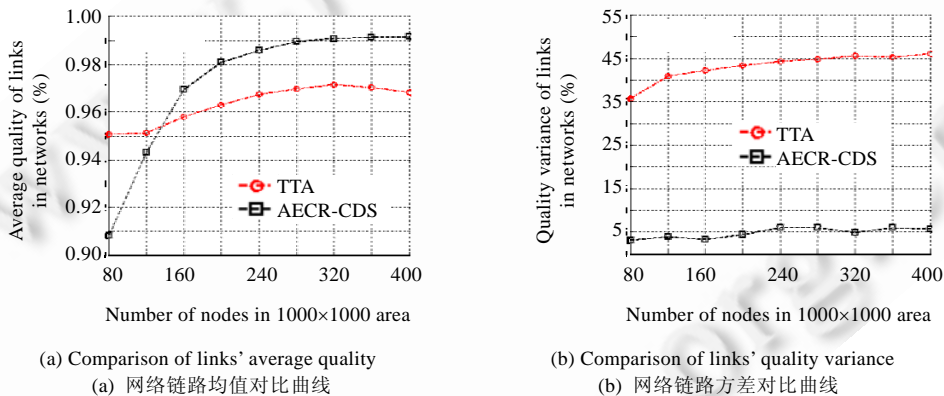


Fig.7 Comparisons of the link reliability for networks

图 7 网络链路可靠性对比曲线

### 3.2.2 网络节能程度对比

WSN 拓扑控制的最主要目标就是尽可能地降低网络能耗.每轮信息通信时,网络中节点最大能耗能够反映网络的能耗均衡性,即进行一次信息采集.网络中节点最大能耗越低,表明网络能耗越均衡;而网络总能耗越低,表明网络节能特性越好.仿真实验同样将 WSN 部署在 1000m×1000m 的监测区域内,改变网络中节点总数依次为 80,120,160,200,240,280,320,360 和 400.对应不同规模的网络分别执行 TTA 和 AECR-CDS 算法各 100 次,基于异构网络能量消耗模型(见公式(7)),统计每轮信息通信,网络中节点最大能耗均值及网络总能耗均值的结果如图 8、图 9 所示.

观察图 8 可知,随着网络节点个数的增加,执行 TTA 算法和 AECR-CDS 算法得到的网络,在每轮信息通信时,节点最大能耗量均呈逐渐递增趋势,然而 AECR-CDS 算法节点最大能耗远低于 TTA 算法.由于 TTA 算法依据节点最大有效通信范围构建拓扑,选取的骨干节点往往与非骨干节点距离过大或者支配过多的非骨干节点,因而出现这种节点能耗过大情况.而 AECR-CDS 算法综合考虑节点度、剩余能量、链路质量及通信距离的影响,以区域能量消耗率构建网络骨干集,避免了骨干节点过度使用情况的出现,有利于网络能耗的均衡.同时,结

合图 9 的网络总能耗曲线可知,无论网络规模如何变化,AECR-CDS 算法网络总能耗均始终低于 TTA 算法.由此可见,AECR-CDS 算法在能耗均衡和网络总能耗两方面都具有良好的性能,说明从网络局部区域能量有效性出发,优化网络整体能效是可行的.

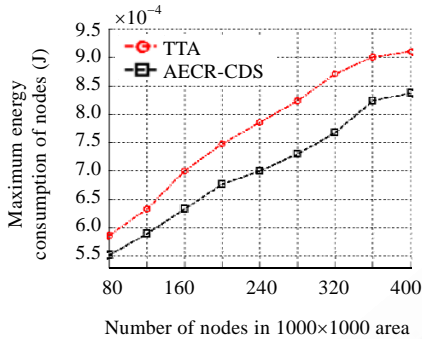


Fig.8 Comparison of nodes' maximum energy consumption in rounds

图 8 节点最大能耗量对比

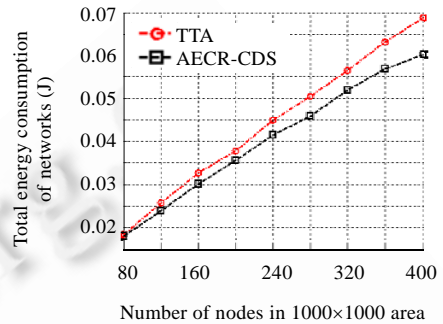


Fig.9 Comparison of network' total energy consumption in rounds

图 9 网络总能耗量对比

### 3.2.3 网络生命周期对比

针对以往虚拟骨干集拓扑构建多遵循网络连通支配集规模越小,网络总能耗也越小,网络生命周期越长的思想,本文继续对节点个数取 80,120,160,200,240,280,320,360 和 400 时的 WSN,分别执行 TTA 和 AECR-CDS 算法各 100 次,然后统计网络连通支配集大小,得到网络骨干节点数目随网络总节点个数的变化曲线,如图 10 所示.随后,对上述算法在不同网络规模下的网络生命周期进行对比,以第 1 个节点“失效”前传感器网络有效数据采集轮数来衡量网络生命周期.基于异构网络节点能量消耗模型计算节点能耗,当节点剩余能量低于预设能量阈值,认为该节点“失效”,最终得到网络生命周期随网络节点个数的变化曲线,如图 11 所示.

由图 10 易见,AECR-CDS 算法构建的网络连通支配集规模略大于 TTA;但随着网络节点数目的递增,TTA 和 AECR-CDS 连通支配集规模均呈下降趋势,并趋向一致.可见,TTA 和 AECR-CDS 两个算法皆能够确保构建小规模的网络连通支配集拓扑结构.同时,由图 11 对比发现,AECR-CDS 算法构建的网络,其生命周期随着网络规模的递增呈现先增后减的变化趋势.这是因为节点能耗取决于其通信距离和节点度,小规模网络中,网络平均节点度较小,但是节点间距大,节点受网络较大的节点间距影响通信能耗比较大;随着节点数目增多,节点间距减小,对节点能耗的影响也逐渐减小.并且 AECR-CDS 算法从网络区域能效出发,综合考虑节点度和通信距离对节点能耗的影响,避免了通信范围过大和节点度过高的节点担任支配任务,从而延长了节点生存时间,使网络生命期呈现增加趋势;但随着网络规模的进一步增大,节点度对节点能耗的影响也随节点数目的递增逐渐增强,成为影响节点能耗的主要因素.因此,继续增大网络规模,节点通信能耗也相应增加,网络生命期又随之呈现递减趋势;而 TTA 忽略了节点度和通信距离对节点能耗的影响,无论网络规模如何变化,始终以通信范围的最大值选取支配节点,因此其网络生命期随网络规模的递增逐渐递减.但无论网络规模大小如何,依据 AECR-CDS 算法构建的网络拓扑,网络生命周期明显优于 TTA.相对 TTA 而言,网络生命周期大约提高了 4~8 倍.这主要是因为最小连通支配集仅是单方面优化了整个网络能量,而忽略了单个节点的能量优化问题,造成某些骨干节点负载过大,过早“失效”,影响网络生命周期.因此,尽管 TTA 算法构建的支配集较 AECR-CDS 略小,但网络生命周期却远远低于 AECR-CDS,从而也证明了异构网络中支配集规模最小的拓扑并不一定是最小能耗拓扑,还应综合考虑支配节点的通信代价问题去构建最小能耗支配集,实现节点和网络能量的同时优化.

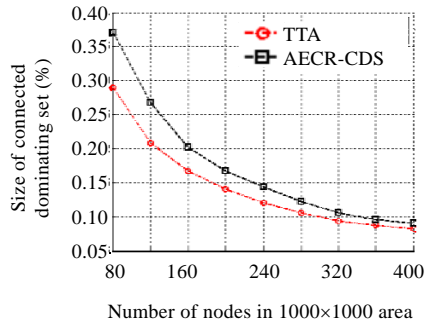


Fig.10 Comparison of connected dominating set's size

图 10 网络连通支配集规模对比曲线

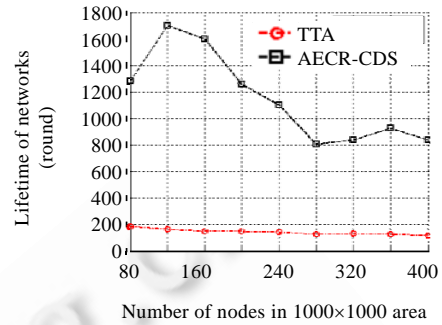


Fig.11 Comparison of network's lifetime

图 11 网络生命周期对比曲线

## 4 结论

本文通过分析传感器节点通信能力异构特性对无线传感器网络能耗的影响,综合节点间的相互协作,提出了以节点区域能量消耗率衡量节点能量有效性的拓扑构建思想,并设计了一种分布式连通支配集拓扑控制算法 AECR-CDS.对算法进行理论分析得出,该算法不仅能够保证全局连通,而且构建的网络连通支配集还具有能量消耗率受限于常数倍的最小能耗意义拓扑特性.实验结果还表明,AECR-CDS 相比 TTA 拓扑具有链路可靠性更高、网络生命周期更长的特点,实现了异构无线传感器网络低能耗拓扑构建的目的.

## References:

- [1] Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2003,14(7):1282–1291 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>
- [2] Mhatre V, Rosenberg C. Homogeneous vs heterogeneous clustered sensor networks: A comparative study. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Communications*. Paris: IEEE Press, 2004. 3646–3651. [doi: 10.1109/ICC.2004.1313223]
- [3] Sunil J, Prabhat R. A survey: Topology control for wireless sensor networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Signal Processing Communications and Networking*. (ICSCN). Chennai: IEEE Press, 2008. 422–427. [doi: 10.1109/ICSCN.2008.4447231]
- [4] Smaragdakis G, Matta I, Bestavros A. SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks. In: *Proc. of the Int'l Workshop on Sensor and Actuator Network Protocols and Applications (SANPA)*. 2004. <http://www.cs.bu.edu/faculty/matta/Papers/sep-sanpa04.pdf>
- [5] Qing L, Zhu QX, Wang MW. Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2006,29(12):2230–2237. [doi: 10.1016/j.comcom.2006.02.017]
- [6] Thai MT, Wang F, Liu D, Zhu SW, Du DZ. Connected dominating sets in wireless networks with different transmission ranges. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2007,6(7):721–730. [doi: 10.1109/TMC.2007.1034]
- [7] Zhang RH, Jia ZP, Yuan DF. Lifetime analysis in heterogeneous wireless sensor networks. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2008,38(5):1136–1140 (in Chinese with English abstract).
- [8] Li N, Hou JC. Topology control in heterogeneous wireless networks: Problems and solutions. In: *Proc. of the Conf. on Computer Communications (INFOCOM)*. Hongkong: IEEE Press, 2004. 232–243. [doi: 10.1109/INFOCOM.2004.1354497]
- [9] Tiwari R, Mishra T, Li YS, Thai MT.  $K$ -Strongly connected  $m$ -dominating and absorbing set in wireless ad hoc networks with unidirectional links. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Wireless Algorithm, Systems and Applications (WASA)*. Chicago: IEEE Press, 2007. 103–112. [doi: 10.1109/WASA.2007.25]
- [10] Wang LR, Liu BY, Goeckel D, Towsley D, Westphal C. Connectivity in cooperative wireless ad hoc networks. In: *Proc. of the Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*. Hong Kong: Association for Computing Machinery Press, 2008. 121–130. [doi: 10.1145/1374618.1374636]

- [11] Xing K, Cheng W, Park EK. Distributed connected dominating set construction in geometric  $k$ -disk graphs. In: Proc. of the Int'l Conf. on Distributed Computing System (ICDCS). Beijing: IEEE Press, 2008. 673–680. [doi: 10.1109/ICDCS.2008.39]
- [12] Li WX, XU JY, Ren FY. Techniques for Wireless Sensor Networks. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007. 120–126 (in Chinese).
- [13] Andrew YW. Lower power RF transceiver modeling and design for wireless microsensor networks [Ph.D. Thesis]. Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [14] Zuniga M, Krishnamachari B. Analyzing the transitional region in low power wireless links. In: Proc. of the IEEE Communications Society Conf. of Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (IEEE SECON). Santa Clara: IEEE Press, 2004. 517–526. [doi: 10.1109/SAHCN.2004.1381954]
- [15] Hao XC, Dou JJ, Liu B. Path-Loss based distributed topology control algorithm for wireless sensor networks. Journal of Software, 2009,20(12):3213–3222 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3414.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03414]

#### 附中文参考文献:

- [1] 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络.软件学报,2003,14(7):1282–1291. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>
- [7] 张瑞华,贾智平,袁东风.异构型无线传感器网络的生命周期.吉林大学学报(工学版),2008,38(5):1136–1140.
- [12] 李晓维,徐勇军,任丰原.无线传感器网络技术.北京:北京理工大学出版社,2007.120–126.
- [15] 郝晓辰,窦晶晶,刘彬.基于路径损耗的无线传感器网络分布式拓扑控制算法.软件学报,2009,20(12):3213–3222. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3414.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03414]



孙超(1983—),男,河北秦皇岛人,博士,讲师,主要研究领域为无线传感器网络拓扑控制.



窦晶晶(1985—),女,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络路由协议.



尹荣荣(1985—),女,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络拓扑控制.



刘彬(1953—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为智能传感器设计,无线传感器网络.



郝晓辰(1980—),男,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络跨层拓扑控制.