

# 大规模分簇超宽带传感网的生存期渐近界

徐 娟<sup>1,2</sup>, 方 钰<sup>1,2</sup>, 许华杰<sup>1,2,3</sup>

(1. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学嵌入式系统与服务计算教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 广西大学计算机与电子信息学院, 广西南宁 530004)

**摘 要:** 本文考虑了  $n$  个传感节点和一个 Sink 组成的跳时脉冲无线电超宽带 (TH-IR UWB) 传感网, 其中  $n$  个传感节点按照 Poisson 点过程分布在正方形上. 推导结果表明密集分簇 TH-IR UWB 传感网的生存期界随着节点数的增加而增加; 而扩展网络的生存期界随着节点数的增加而减小. 研究也表明分簇网络的生存期界远大于非分簇网络的生存期上下界, 因此分簇能极大地提高网络生存期. 并且节点服从 Poisson 分布的分簇网络生存期界与节点服从均匀分布的分簇网络生存期界不同, 因此节点的分布方式会显著影响网络的生存期界.

**关键词:** 无线传感网; 超宽带; 生存期; 分簇; 能量消耗

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 10-2263-06

## Asymptotic Bounds on Lifetime of Large Scale Clustering UWB Sensor Network

XU Juan<sup>1,2</sup>, FANG Yu<sup>1,2</sup>, XU Hua-jie<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. Key Laboratory of Embedded System and Service Computing of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
3. School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

**Abstract:** Considering time hopping impulse radio ultra wide band (TH-IR UWB) sensor networks composed  $n$  sensor nodes which are placed according to a Poisson point process on a square and a Sink. The results demonstrate that the bounds on the lifetime of dense network increase with the increase of the number of nodes  $n$ , and that of extended network decrease with the increase of the number of nodes  $n$ . The results also indicate the bounds on the lifetime of clustering sensor networks is far more than that of non-clustering network, thus clustering can evidently improve network lifetime. Furthermore, the bounds on the lifetime of clustering TH-IR UWB sensor network which the nodes are distributed according to a Poisson point process are different from that of clustering network which the nodes are placed according to uniform distribution, thus the behavior of nodes deploying can remarkably affect the lifetime bound.

**Key words:** wireless sensor network; ultra wide band; lifetime; clustering; energy dissipation

## 1 引言

无线传感网 (WSN, Wireless Sensor Networks) 由于其广阔的应用前景和对社会生活可能产生的巨大影响, 已成为目前的研究热点. 随着研究工作的不断深入和发展, 相信各种无线传感网络最终将遍布我们的生活环境, 从而真正实现“无处不在的计算”. 无线传感网由具有感知、计算和无线通信能力的传感节点和一个汇聚节点组成. 传感节点的一个重要特征就是低功耗、低成本、

小体积和能量受限. 跳时脉冲无线电超宽带 (TH-IR UWB, Time Hopping Impulse Radio Ultra-Wide Band) 无线传输技术由于其具有低功耗、低成本和低复杂性的收发信机、易于全数字化、空间传输容量大、与现有系统频谱共享、精确的定位能力和强的抗多径衰落能力等独有的特性, 因此是无线传感网物理层的首选方案<sup>[1]</sup>. 而且超宽带传感节点使用非常低功率的微波来收集数据, 即采用无损探测技术, 因此 TH-IR UWB 传感网特别适用于一些特殊场合的应用, 诸如表面穿透雷达、土木工程中的

收稿日期: 2010-07-18; 修回日期: 2011-05-03

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 90818023, No. 61003222); 国家 973 重点基础研究发展计划 (No. 2010CB328101, No. 2011CB302804); 国家 863 高技术研究发展计划 (No. 2008BAH37B09); 长江学者和教育部创新团队; 上海市科技创新计划 (No. 10DJ1400300, No. 08GG08, No. 09510701300); 教育部新教师基金 (No. 20090072120048); 中国博士后科学基金 (No. 20100480623)

无损检测、工业感知和医学成像等。

无线传感网的一个基本挑战是能量受限,因此网络生存期是能量受限的无线传感网最关心的课题.当传感节点随机地部署在给定的区域时,对可获得的网络生存期进行粗略地估计是非常必要的.考虑到无线传感网的特点之一是节点数量众多,而通过试验来研究大规模随机传感网的生存期(即节点数  $n$  趋于无穷)是不可行的,因此需要从理论上研究传感网的生存期渐近界.生存期渐近界是指当网络内的节点初始能量用完之前节点的生存期大小与节点数  $n$  的关系,因此从理论上研究得到的生存期渐近界能为传感网的可扩展性及部署大规模传感网提供理论依据,为研究大规模传感网能量高效的路由协议和拓扑控制提供理论支撑.近年来人们已开始研究不同类型的无线传感网的生存期渐近界<sup>[2-7]</sup>.

为了降低能量消耗或延长传感网生存期,分簇协议经常在传感网中用于高效地协调数据分发.在分簇网络中,每个簇由一个簇头和多个簇成员组成.从传感节点收集的数据首先被发送到簇头,然后再转发给汇聚节点.分簇经常使用数据融合以进一步降低能量消耗.最近几年,已提出了许多旨在使网络生存期最大化或能耗最小化的分簇协议<sup>[8,9]</sup>.

因此从理论上研究大规模分簇 TH-IR UWB 传感网的生存期渐近界具有重大意义.目前人们已对不同类型的无线传感网的生存期渐近界进行了研究<sup>[2-7]</sup>,文献[2,3]考虑的是节点采用传统无线电进行数据传输,而文献[4,5]则分别研究了节点服从 Poisson 分布的非分簇 TH-IR UWB 传感网的生存期上界和下界.文献[6,7]研究了节点在部署区域内服从均匀分布的分簇 TH-IR UWB 传感网生存期的上下界,其中文献[6]主要考虑了完全分簇密集网络的生存期界,而文献[7]则分别考虑了常规分簇和完全分簇的扩展网络的生存期下界.本文将研究节点服从泊松分布的完全分簇 TH-IR UWB 传感网的生存期渐近界.据作者所知,目前关于这方面的研究尚未见诸报道.

通常在理论研究或仿真中,大规模传感网的节点分布都假设服从随机分布,并且当使用飞行器将大量传感节点抛撒到需要监测的区域内时,节点也是随机分布的.而节点服从泊松分布是节点随机部署的一种典型模型.因此研究节点服从泊松分布的完全分簇 TH-IR UWB 传感网的生存期渐近界,既具有理论研究意义也具有实际应用价值.

目前有两种典型方法使节点数  $n$  趋于无穷.一种方法使部署区域面积  $S$  保持常数,而使节点密度  $\lambda$  趋于无穷(称之为密集网络);另一种方法使节点密度  $\lambda$  保持常数,而使面积  $S$  趋于无穷(称之为扩展网络).本

文将分别给出密集和扩展的完全分簇 TH-IR UWB 传感网的生存期渐近界.在保证不引起歧义的情况下,下文将“完全分簇”简称为“分簇”.

## 2 系统模型

### 2.1 网络模型

网络模型假设是由  $n$  个传感节点(下文简称节点)和一个汇聚节点(Sink)组成的一个随机 TH-IR UWB 传感网.对于密集网络,将  $n$  个节点按照密度参数为  $n/S$  的 Poisson 点过程放置在面积为  $S$  的正方形  $Q$  上,其中  $S$  是一个与  $n$  无关常数;对于扩展网络,将  $n$  个节点按照密度参数为  $1/\lambda$  的 Poisson 点过程放置在面积为  $S(n) = \lambda n$  的正方形  $Q$  上,其中  $\lambda$  是一个与  $n$  无关常数.节点被分层次地组成很多簇.节点或簇头发送数据分组到位于正方形中心的汇聚节点,并假设节点或簇头产生的数据分组都具有相同的长度,即都包含  $M$  比特.

令  $X_i$  代表节点及其所在的位置,令  $H_i$  代表簇头及其所在的位置.令  $P_{i_i} \geq 0$  是节点  $X_i$ (簇头  $H_i$ ) 的发射功率,  $P_{j_j} \geq 0$  为节点  $X_j$ (簇头  $H_j$ ) 的接收功率.设节点  $X_i$ (簇头  $H_i$ ) 的初始能量为  $\epsilon_i \geq 0$ .为简单起见,假设这是一个同质网络,即所有节点有相同的硬件和处理能力.因此有  $P_{i_i} = P_t, P_{j_j} = P_r, \epsilon_i = \epsilon, \forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ .

### 2.2 空间棋盘布置

为了便于分析,引入一个关于正方形  $Q$  的正方形空间棋盘形布置  $\Gamma$ .正方形空间棋盘形布置  $\Gamma$  由许多边长为  $l(n)$  的小正方形  $c$  组成.称每一个小正方形  $c$  为一个单元.对于密集网络,将面积为  $S$  的正方形  $Q$  划分为许多面积为  $S(\log m_d / m_d)^2$  的小正方形单元,其边长为  $l_d(n) = S^{1/2} \log m_d / m_d$ ,其中  $m_d = (n/2)^{1/2} / t_d$ ,  $t_d$  是一个与  $n$  无关的常数.对于扩展网络,将面积为  $S(n) = \lambda n$  的正方形  $Q$  划分为许多面积为  $2\lambda(t_e \log m_e)^2$  的小正方形单元,其中  $m_e = (n/2)^{1/2} / t_e$ ,  $t_e$  是一个与  $n$  无关的常数.包含 Sink 的单元称为中央单元.如果两个单元间共享一个顶点或一条边,则称这两个单元为邻居单元.将中央单元的所有邻居单元组成集合称为正方环  $A_k$ ,使用  $A_k (k > 1)$  来表示围绕  $A_{k-1}$  的单元集合.

易知,正方环(Aunulus)具有如下性质:

(a) 正方环  $A_k$  内包含的单元数  $q_k$  为  $8k$ ;

(b) 如果  $m_d$  或  $m_e$  很大时,则总的正方环数为  $u = m / (2 \log m)$ ,对于密集网络有  $m = m_d$ ,对于扩展网络有  $m = m_e$ .

本文假设一个单元代表一个簇,并假设正方环  $A_k$  中的每个簇头接收来自本簇内其它节点发送的数据以及其前一跳簇头(位于正方环  $A_{k+1}$  中)发送的数据,然后对所收到的所有数据分组进行融合并将融合后的数

据分组发往其下一跳簇头(位于正方环  $A_{k-1}$  中)。

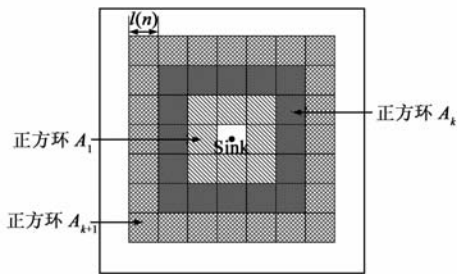


图1 空间棋盘形布置图

下面的引理 1 和引理 2 将分别给出密集和扩展网络中每个单元包含的节点数。

**引理 1** 如果将面积为  $S$  的正方形划分为  $n/(2(t_d \log m_d)^2)$  个面积为  $S(\log m_d/m_d)^2$  的单元,则每个单元的节点数  $N_n$  满足

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Pr(\beta_d (\log m_d)^2 \leq N_n \leq 2t_d^2 (\log m_d)^3) = 1 \quad (1)$$

式中,  $\beta_d$  是一个与  $n$  无关的常数。

证明过程类似于文献[5]定理 2 的证明。

**引理 2** 如果将面积为  $\lambda n$  的正方形划分为  $n/(2(t_e \log m_e)^2)$  个面积为  $2\lambda(t_e \log m_e)^2$  的单元,则每个单元的节点数  $N_n$  满足

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Pr(\beta_e (\log m_e)^2 \leq N_n \leq 2t_e^2 (\log m_e)^3) = 1 \quad (2)$$

式中,  $\beta_e$  是一个与  $n$  无关的常数。

证明过程类似于引理 1 的证明。

### 2.3 生存期的定义及性能度量

由于无线传感网的应用广泛,对于不同的应用情境可以有不同的生存期定义。本文的生存期定义为:定每个节点的初始能量  $\epsilon$ ,且假设网络中  $n$  个节点均产生等长度的数据分组,并规定网络中的所有节点各将一个数据分组发给 Sink 为一个任务,则生存期为当网络内最早耗完能量的节点在其耗完能量之前执行任务的最大次数。

本文将分别研究静态传感网和理想情形下的网络生存期,下面将分别给出两种情形下的生存期定义的数学表达式。

静态传感网生存期  $LT(n)$  的定义为

$$LT(n) = \epsilon / E\{\bar{e}_{\max}(n)\} \quad (3)$$

式中,  $\epsilon$  为节点的初始能量,  $\bar{e}_{\max}$  为在假定网络中  $n$  个节点均产生长度为  $M$  比特的数据分组并通过多跳将分组发送到 Sink 时,网络内的节点为传递数据分组所消耗的最大平均能量;  $E\{\bar{e}_{\max}(n)\}$  表示对  $\bar{e}_{\max}(n)$  求期望。

在理想情形下,即每个节点的能量消耗都相同的情形,传感网生存期  $LT(n)$  的定义为

$$LT(n) = n\epsilon / E\{e_{\text{tot}}(n)\} \quad (4)$$

式中,  $e_{\text{tot}}(n)$  为网络内  $n$  个节点均产生长度为  $M$  比特的数据分组并通过多跳将分组发送到 Sink 时的网络总

耗能;  $E\{e_{\text{tot}}(n)\}$  表示对  $e_{\text{tot}}(n)$  求期望。

本文将研究节点随机分布在服务区域内的 TH-IR UWB 传感网生存期  $LT(n)$  的渐近界。  $LT(n)$  是  $n$  的函数,又由于网络是随机的,所以网络生存期  $LT(n)$  也是随机的。因此生存期  $LT(n)$  的渐近界可以从概率意义上来表示。具体而言,如果存在与  $n$  无关的常数  $c_1 > c_0 > 0$ , 满足

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Pr(LT(n) = c_0 f(n) \text{ is feasible}) = 1 \quad (5)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Pr(LT(n) = c_1 f(n) \text{ is feasible}) < 1 \quad (6)$$

则称生存期的界为  $\Theta(f(n))$ 。如果仅有式(5)满足,则称生存期的下界为  $\Omega(f(n))$ ;如果仅有式(6)满足,则称生存期的上界为  $O(f(n))$ 。

### 3 密集分簇网络的生存期渐近界

本节将分别研究密集分簇 TH-IR UWB 传感网生存期的上界和下界。

#### 3.1 网络生存期的上界

簇内通信以及不同簇之间通信可以采用单跳或多跳。对于单跳通信,每个节点能直接将数据发送到其目的节点,而对于多跳通信,节点路由数据经过若干跳直到其达到最终目的节点。在本文,簇内通信采用单跳因为节点与簇头的距离比较近而且可以采用较为简单的调度策略。由于 TH-IR UWB 通信系统中节点的发射能耗和接收能耗均与收发节点间距离的  $\alpha$  次方成正比,因此不同簇头之间的通信采用多跳转发,因为有些簇头距离 Sink 比较远,利用多跳通信以降低能耗。

为了平衡簇内每个节点的能耗,每个节点在每轮中等概率地成为一个簇头。所有的簇头将组成一个通信骨干网用于整个传感网的通信。每个单元中仅有簇头可接收来自本簇内其它节点发送的数据以及来自前一跳簇头的数据,然后簇头对所接收到的所有数据分组进行融合,最后将融合后的数据分组发射到其下一跳簇头。簇内的其它传感节点能在大部分时间内处于睡眠状态,仅在需要感知环境或发射自己数据分组才醒来。由于在执行一次任务时正方环  $A_k$  中的每个簇头需要平均中继的次数为  $(k+1)/k$ ,显然在所有的簇头中正方环  $A_1$  中的簇头能量消耗最大。

**引理 3** 密集分簇 TH-IR UWB 静态传感网的正方环  $A_1$  中每簇头的平均中继能耗的期望值为

$$E\{\bar{e}_{\text{rel}}(n)\} \geq t_1(1 + P_r/P_t) M \delta \eta (\sqrt{S} \log m_d / m_d)^\alpha \quad (7)$$

当  $n \rightarrow \infty$ , 其中  $\alpha > 2$  且  $t_1$  是一个与  $n$  无关的常数。

**证明** 假设簇头  $H_i$  以多跳中继的方式将数据分组发送到汇聚节点  $X_d$ 。令  $R_i$  为源簇头  $H_i$  和  $X_d$  之间的路由,  $L_i$  表示沿着路由  $R_i$  的跳距长度之和,则  $L_i$  可表示为

$$L_i = \sum_{j=0}^{T-1} \|H_j - H_{j+1}\| \geq \|H_i - X_d\| = D_i \quad (8)$$

式中,  $T$  是沿着源簇头  $H_i$  和汇聚节点  $X_d$  之间路由  $R_i$  上的跳数,  $D_i$  是  $H_i$  和  $X_d$  之间的欧几里德距离,  $H_0 = H_i$ ,  $H_T = X_d$ .

为了防止总能耗额外的增加和不能接受的延迟, 需要将源汇聚节点对路由上的中继节点限定在一定的范围之内. 令  $B_i$  为  $H_i$  和  $X_d$  之间的直线. 定义在平面上的一个区域  $G(B_i)$  如下:

$$z \in G(B_i) \quad \text{iff} \quad \exists y \in B_i \quad \text{s.t.} \quad \|y - z\| \leq \sqrt{2}l_d(n) \quad (9)$$

式中,  $y$  和  $z$  为正方形  $Q$  上的点,  $l_d(n) = S^{1/2} \log m_d / m_d$ .

$G(B_i)$  定义了围绕源汇聚节点对直线  $B_i$  的一个覆盖区: 与直线  $B_i$  相交的所有单元将被完全包含在该覆盖区内. 由于连接簇头  $H_i$  和汇聚节点  $X_d$  之间的直线仅能与完全包含在  $G(B_i)$  中的单元相交, 所以包含在  $G(B_i)$  的单元数为

$$N_{\text{cell}}(n) = (\pi(\sqrt{2}l_d(n))^2 + 2\sqrt{2}l_d(n)D_i) / l_d^2(n) = 2\pi + 2\sqrt{2}D_i / l_d(n) \quad (10)$$

根据文献[4, 5]给出的 TH-IR UWB 通信系统的能耗模型, 可得源簇头  $H_i$  发送长度为  $M$  比特的数据分组沿着路由  $R_i$  到达汇聚节点  $X_d$  所消耗的总能量为

$$e_{i-\text{rel}}(n) = \sum_{j=0}^{T-1} (1 + P_r/P_t) M \delta \eta \|H_j - H_{j+1}\|^\alpha \geq (1 + P_r/P_t) M \delta \eta L_i^\alpha / (2\pi + 2\sqrt{2}D_i / l_d(n))^{\alpha-1} \quad (11)$$

式中,  $\delta = [Q^{-1}(P_b)]^2$ ,  $P_b$  是比特错误概率,  $Q(x) = \text{erfc}(x/\sqrt{2})/2$ ,  $\eta/2$  是加性高斯白噪声信道的双边功率谱密度,  $\alpha$  为路径损耗指数,  $\alpha > 2$  且  $T \leq N_{\text{cell}}(n)$ . 为简单起见, 在式(11)包含了汇聚节点的接收能量消耗. 式(11)推导过程中利用了凸函数  $y^\alpha$  的性质, 其中  $\alpha > 2$ .

在路由  $R_i$  上任一簇头用于中继的平均能量消耗可表示为

$$\bar{e}_{\text{rel}}(n) \geq e_{i-\text{rel}}(n) / N_{\text{cell}}(n) \geq (1 + P_r/P_t) M \delta \eta f(L_i) \quad (12)$$

式中,  $f(L_i) = L_i^\alpha / (2\pi + 2\sqrt{2}D_i / l_d(n))^\alpha$ .

由于  $f(L_i)$  是一个递增函数, 所以  $\bar{e}_{\text{rel}}(n)$  的期望值可表示为

$$E\{\bar{e}_{\text{rel}}(n)\} \geq (1 + P_r/P_t) M \delta \eta E\{f(L_i)\} \geq (1 + P_r/P_t) M \delta \eta E\{f(D_i)\} \quad (13)$$

式中,  $f(D_i) = D_i^\alpha / (2\pi + 2\sqrt{2}D_i / l_d(n))^\alpha$ .

对于密集网络, 有  $E\{D_i\} = \Theta((1)^{1/2})$ . 因此当源目的节点对的距离  $D_i$  大于一个  $\xi$  时,  $E\{2\sqrt{2}D_i m_d / (\sqrt{S} \cdot \log m_d)\} \gg 2\pi$  以高概率成立, 则正方形环  $A_1$  中的一簇头

用于中继的平均能量消耗期望以高概率满足

$$E\{\bar{e}_{\text{rel}}(n)\} \geq t_1(1 + P_r/P_t) M \delta \eta (\sqrt{S} \log m_d / m_d)^\alpha \quad (14)$$

式中,  $t_1$  是一个与  $n$  无关的常数.

**定理 1** 密集分簇 TH-IR UWB 静态传感网的生存期上界为  $O((\log n^{1/2})^{-\alpha} (n/S)^{\alpha/2})$ , 当  $n \rightarrow \infty$ , 其中  $\alpha > 2$ .

**证明** 由文献[10]可知, 若节点服从 Poisson 分布, 则某节点与其第  $k$  个最近邻居节点的平均欧几里德距离为  $\sqrt{\frac{\pi}{\rho} \frac{(2k)!}{(2^k k!)^2}}$ . 利用 Stirling 近似值, 可渐近表示为  $\sqrt{k/\rho}$ , 其中对于二维密集网络有  $\rho = \pi n/S$ , 而对于二维扩展网络有  $\rho = \pi/\lambda$ .

单元内所有节点的总能耗包括除簇头之外所有节点发送数据分组到簇头的发射能耗和簇头用于接收本单元内其他节点数据时的接收能耗, 文中称这种类型的能耗为单元内通信能耗, 其期望值为

$$E\{e_{\text{cell}}(n)\} \geq E\left\{(1 + P_r/P_t) M \delta \eta \sum_{j=1}^{N_n} \|X_0 - X_j\|^\alpha\right\} \geq (1 + P_r/P_t) M \delta \eta t_2 (N_n)^{\alpha/2+1} (S/\pi n)^{\alpha/2} \quad (15)$$

式中,  $N_n$  为单元内的节点数, 由引理 1 可知满足  $\beta_d (\log m_d)^2 \leq N_n \leq 2t_d^2 (\log m_d)^3$ ,  $t_2$  是一个与  $n$  无关的常数.

考虑到单元内的每个节点在每轮中有相同的概率成为簇头, 当  $n \rightarrow \infty$  时, 每节点用于单元内通信的平均能耗期望值为

$$E\{\bar{e}_{c-n}(n)\} = E\{e_{\text{cell}}(n)\} / N_n = (1 + P_r/P_t) M \delta \eta t_2 (N_n)^{\alpha/2} (S/\pi n)^{\alpha/2} \geq t_3 (1 + P_r/P_t) M \delta \eta (\log m_d)^\alpha (S/n)^{\alpha/2} \quad (16)$$

式中,  $t_3$  是一个与  $n$  无关的常数.

由引理 1 及引理 3 可得正方形环  $A_1$  内每节点用于中继的平均能耗的期望为

$$E\{\bar{e}_{r-n}(n)\} \geq E\{\bar{e}_{\text{rel}}(n)\} / 2t_d^2 (\log m_d)^3 \geq t_4 (1 + P_r/P_t) M \delta \eta \frac{1}{(\log m_d)^3} \left(\frac{\sqrt{S} \log m_d}{m_d}\right)^\alpha \quad (17)$$

式中,  $t_4$  是一个与  $n$  无关的常数.

当  $n \rightarrow \infty$  时, 有  $\log m_d \gg 1$ , 因此每节点用于单元内通信的平均能耗期望值远大于每节点用于中继的平均能耗期望值. 所以由式(3)和(16)可得, 密集分簇的 TH-IR UWB 静态传感网生存期的上界为

$$LT(n) = \epsilon / E\{\bar{e}_{\text{max}}(n)\} \leq \epsilon / E\{\bar{e}_{c-n}(n)\} = O((\log n^{1/2})^{-\alpha} (n/S)^{\alpha/2}) \quad (18)$$

当  $n \rightarrow \infty$ , 其中  $\alpha > 2$ .

**定理 2** 密集分簇 TH-IR UWB 传感网理想情形下的生存期上界为  $O((\log n^{1/2})^{-\alpha}(n/S)^{\alpha/2})$ , 当  $n \rightarrow \infty$ , 其中  $\alpha > 2$ .

**证明** 整个传感网内所有节点的总通信能耗的期望为

$$\begin{aligned} E\{e_{tot}(n)\} &= E\left\{\sum_{i=1}^u 8i\bar{e}_{rel}(n)\right\} + E\left\{\sum_{i=1}^u 8ie_{cell}(n)\right\} \\ &\geq 4(u^2 + u)\{E\{\bar{e}_{rel}(n)\} \\ &\quad + t_2(\beta_d(\log m_d)^2)^{\alpha/2+1}(1 + P_r/P_t) \\ &\quad \cdot M\delta\eta(S/\pi n)^{\alpha/2}\} \end{aligned} \quad (19)$$

当  $n \rightarrow \infty$  时, 有  $(\log m_d)^2 \gg 1$ , 因此所有节点的总通信能耗的期望可简化为

$$E\{e_{tot}(n)\} \geq t_5(1 + P_r/P_t)M\delta\eta m_d^2 (\sqrt{S}\log m_d/m_d)^{\alpha} \quad (20)$$

式中,  $t_5$  是一个与  $n$  无关的常数.

因此基于式(4)和式(20), 可得理想情形下的密集分簇 TH-IR UWB 传感网的生存期上界为

$$LT(n) = n\varepsilon/E\{e_{tot}(n)\} = O((\log n^{1/2})^{-\alpha}(n/S)^{\alpha/2}) \quad (21)$$

当  $n \rightarrow \infty$ , 其中  $\alpha > 2$ .

### 3.2 网络生存期的下界

由于 TH-IR UWB 通信系统中节点的发射能耗和接收能耗与收发节点间距离的  $\alpha$  次方成正比, 因此簇头使用多跳路由能降低网络的通信能耗, 为此需要给出一种可行的多跳路由方案来得到生存期的下界. 根据前面给出的空间棋盘形布置可以采用如下所述的多跳转发路由方案:

用一条直线连接位于正方环  $A_k$  某个单元内的簇头  $H_k$  和 Sink, 则这条直线将与正方形  $Q$  中  $k-1$  个正方环相交. 由簇头  $H_k$  产生的数据分组路由选择依据从一个正方环跳到其相邻的另一个正方环, 则路由近似在一条直线上, 与直线相交的单元被选择为簇头  $H_k$  的中继单元. 中继单元内的簇头才可充当中继节点. 如果这条直线与同一个正方环内的两个单元相交, 则可选其中一个单元为中继单元. 因此由簇头  $H_k$  产生的分组到达 Sink 时恰好为  $k$  跳.

为确保在邻接单元中的任两个节点总能彼此到达, 最大的转发范围应为  $r_f = 2^{3/2}l_d(n)$ .

**定理 3** 对于采用多跳转发路由方案的密集分簇 TH-IR UWB 静态传感网, 其生存期的下界是  $\Omega((\log n^{1/2})^{-\alpha}(n/S)^{\alpha/2})$ , 当  $n \rightarrow \infty$ , 其中  $\alpha > 2$ .

**证明** 由于正方环  $A_k$  的簇头需要接收来自正方环  $A_{k+1}$  中的簇头产生的数据分组, 并将融合后的数据分组发射到正方环  $A_{k-1}$  中的簇头. 因此正方环  $A_k$  用于中继

的总能耗为

$$e_{k-rel}(n) \leq M\delta\eta(2\sqrt{2}l_d(n))^{\alpha}(8k + 8P_r(k+1)/P_t) \quad (22)$$

由于每个节点等概率地成为簇头, 因此在同一个正方环内的每个节点的平均能耗是相同的. 正方环  $A_k$  内每节点用于中继的平均能耗  $\bar{e}_{k-n}(n)$  为

$$\begin{aligned} \bar{e}_{k-n}(n) &\leq e_{k-rel}(n)/(8k\beta_d(\log m_d)^2) \\ &\leq M\delta\eta(2\sqrt{2}l_d(n))^{\alpha} \\ &\quad \cdot (1 + P_r(1+1/k)/P_t)/\beta_d(\log m_d)^2 \end{aligned} \quad (23)$$

显然,  $\bar{e}_{k-n}(n)$  是  $k$  的单调递减函数, 因此正方环  $A_1$  内节点用于中继的能量消耗最大.

每节点的平均单元内通信能耗为

$$\begin{aligned} \bar{e}_{c-n}(n) &\leq M\delta\eta(\sqrt{2}l_d(n))^{\alpha}(N_n - 1)(1 + P_r/P_t)/N_n \\ &\leq M\delta\eta(\sqrt{2}l_d(n))^{\alpha}(1 + P_r/P_t) \end{aligned} \quad (24)$$

式中,  $N_n$  表示单元内的节点数.

由式(23)和(24)可知, 每节点的平均单元内通信能耗远大于每节点用于中继的平均能耗, 因此静态网络的生存期下界为

$$\begin{aligned} LT(n) &= \frac{\varepsilon}{E\{\bar{e}_{max}(n)\}} = \frac{\varepsilon}{E\{\bar{e}_{c-n}(n)\}} \\ &= \Omega((\log n^{1/2})^{-\alpha}(n/S)^{\alpha/2}) \end{aligned} \quad (25)$$

当  $n \rightarrow \infty$ , 其中  $\alpha > 2$ .

**定理 4** 使用多跳转发方案的密集分簇 TH-IR UWB 传感网在理想情形下的生存期下界是  $\Omega((\log n^{1/2})^{-\alpha}(n/S)^{\alpha/2})$ , 当  $n \rightarrow \infty$ , 其中  $\alpha > 2$ .

**证明** 密集分簇 TH-IR UWB 传感网内所有节点的总通信能耗为

$$\begin{aligned} e_{tot}(n) &\leq M\delta\eta(l_d(n))^{\alpha}((2\sqrt{2})^{\alpha} \sum_{k=1}^n (8k + 8P_r(k+1)/P_t) \\ &\quad + (\sqrt{2})^{\alpha}(n - \sum_{k=1}^n k(1 + P_r/P_t))) \\ &\leq M\delta\eta(\sqrt{2}l_d(n))^{\alpha}(t_6(1 + P_r/P_t)u^2 + (1 + P_r/P_t)n) \\ &\leq t_7M\delta\eta(\sqrt{2}l_d(n))^{\alpha}(1 + P_r/P_t)n \end{aligned} \quad (26)$$

式中,  $t_6$  和  $t_7$  都是与  $n$  无关的常数, 上式推导中利用了当  $n \rightarrow \infty$  时  $n \gg u^2$ .

因此理想情形下的网络生存期的下界为

$$LT(n) = n\varepsilon/E\{e_{tot}(n)\} = \Omega((\log n^{1/2})^{-\alpha}(n/S)^{\alpha/2}) \quad (27)$$

当  $n \rightarrow \infty$ , 其中  $\alpha > 2$ .

**定理 5** 静态网络或理想情形下的密集分簇 TH-IR UWB 传感网生存期界均为  $\Theta((\log n^{1/2})^{-\alpha}(n/S)^{\alpha/2})$ , 当  $n \rightarrow \infty$ , 其中  $\alpha > 2$ .

显然由定理 1~4 即可得到该结论.

定理 5 表明密集分簇 TH-IR UWB 静态传感网的生

存期界与在理想情形下的网络生存期界相同;生存期界随着节点数的增加而增加,因此密集网络适用于大规模部署.

由于节点服从均匀分布的密集分簇 TH-IR UWB 静态传感网的生存期界为  $\Theta(n/(S \log n)^{\alpha/2})^{[6]}$ ,因此节点的分布方式能极大影响网络的生存期界.

#### 4 扩展分簇网络的生存期渐近界

类似于密集网络关于引理 3 和定理 1~5 的证明,可得到如下关于扩展网络生存期渐近界的一些定理.

**定理 6** 扩展分簇 TH-IR UWB 静态传感网的生存期上界为  $O((\log n^{1/2})^{-\alpha})$ ,当  $n \rightarrow \infty$ ,其中  $\alpha > 2$ .

类似于定理 1 的证明.

**定理 7** 扩展分簇 TH-IR UWB 传感网理想情形下的生存期上界为  $O((\log n^{1/2})^{-\alpha})$ ,当  $n \rightarrow \infty$ ,其中  $\alpha > 2$ .

类似于定理 2 的证明.

类似于文献[4]关于节点服从 Poisson 分布的三维扩展非分簇 TH-IR UWB 传感网生存期上界的推导,可得二维扩展非分簇 TH-IR UWB 静态传感网的生存期上界为  $O(n^{-1})$ ,理想情形下的生存期上界为  $O(n^{-1/2})$ ,因此分簇静态网络的生存期上界比非分簇静态网络提高了  $n/(\log n^{1/2})^\alpha$  倍,理想情形下的分簇网络生存期上界比理想情形下的非分簇网络提高了  $n^{1/2}/(\log n^{1/2})^\alpha$  倍.通过推导,可得到密集分簇网络的生存期上界与密集非分簇网络的生存期上界之间的关系也存在与扩展网络相同的结论.因此分簇能极大地提高网络生存期上界.

**定理 8** 对于采用多跳转发路由方案的扩展分簇 TH-IR UWB 静态传感网,其生存期的下界是  $\Omega((\log n^{1/2})^{-\alpha})$ ,当  $n \rightarrow \infty$ ,其中  $\alpha > 2$ .

类似于定理 6 的证明.

**定理 9** 采用多跳转发方案的扩展分簇 TH-IR UWB 传感网在理想情形下的生存期下界是  $\Omega((\log n^{1/2})^{-\alpha})$ ,当  $n \rightarrow \infty$ ,其中  $\alpha > 2$ .

类似于定理 4 的证明.

由文献[5]可知,节点服从 Poisson 分布的非分簇扩展 TH-IR UWB 静态传感网的生存期下界为  $\Omega((\log n^{1/2})^{2-\alpha}/n)$ ,理想情形下的生存期下界为  $\Omega(1/(n^{1/2}(\log n^{1/2})^2))$ ,因此分簇静态网络的生存期下界比非分簇静态网络提高了  $n/(\log n^{1/2})^2$  倍,理想情形下的分簇网络生存期下界比非分簇网络提高了  $n^{1/2}(\log n^{1/2})^{2-\alpha}$  倍.另外由文献[5]推导思路可得服务区域面积为  $S$  的非分簇密集 TH-IR UWB 静态传感网的生存期下界为  $\Omega((n/S)^{\alpha/2}/(n(\log n^{1/2})^{\alpha-2}))$ ,理想情形下的生存期下界为  $\Omega((n/S)^{\alpha/2}/(n^{1/2}(\log n^{1/2})^2))$ ,从而可得到密集分簇网络的生存期下界与密集非分簇网络的

生存期下界之间的关系也存在与扩展网络相同的结论.因此分簇也能极大地提高生存期下界.

**定理 10** 静态网络或理想情形下的扩展分簇 TH-IR UWB 传感网生存期界均为  $\Theta((\log n^{1/2})^{-\alpha})$ ,当  $n \rightarrow \infty$ ,其中  $\alpha > 2$ .

#### 5 结论

本文分别推导了密集和扩展分簇 TH-IR UWB 传感网生存期的渐近界.得到不论是静态网络还是理想情形,密集分簇网络的生存期界为  $\Theta((\log n^{1/2})^{-\alpha}(n/S)^{\alpha/2})$ ,扩展网络的生存期渐近界为  $\Theta((\log n^{1/2})^{-\alpha})$ .显然,密集网络的生存期界随着节点数的增加而增加,因此增加部署区域内的节点数有利于延长网络生存期;而扩展网络的生存期界随着节点数的增加而减小,因此为延长网络生存期,不适宜采用大规模网络.

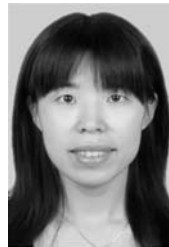
研究结果表明分簇能极大地提高网络生存期.而且,节点的分布方式也会显著影响网络的生存期渐近界.

#### 参考文献

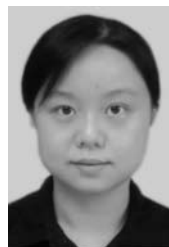
- [1] K Daniel Wong. Physical layer considerations for wireless sensor networks[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control[C]. San Francisco: IEEE Computer Society, 2004. 1201 - 1206.
- [2] M Bhardwaj, A Chandrakasan. Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM[C]. San Francisco: IEEE Computer Society, 2002. 1587 - 1596.

(下转第 2281 页)

#### 作者简介



徐娟女,1973年4月出生,浙江江山人.副教授、硕士生导师,CCF会员.2008年于同济大学获工学博士学位.现为同济大学教师,从事无线传感网及认知网络等方面的研究工作.  
E-mail: jxujuan@tongji.edu.cn



方钰女,1977年6月出生,河南洛阳人.副教授、硕士生导师.2006年获得同济大学工学博士学位.现为同济大学教师,主要从事移动计算、传感器网络和智能交通等方面的研究工作.

- [13] N R Pal, S K Pal. Entropy thresholding[J]. Signal Process, 1989, 16(1): 97 - 108.
- [14] Chein-I Chang, Kebo Chen, Jianwei Wang, Mark L G Althouse. A relative entropy-based approach to image thresholding[J]. Pattern Recognition, 1994, 27(9): 1275 - 1289.
- [15] C Chang, Y Du, J Wang, S Guo, P Thouin. Survey and comparative analysis of entropy and relative entropy thresholding techniques[J]. IEEE Proc. - Vis Image Signal Process, 2006, 153(6): 837 - 850.
- [16] 范九伦, 赵凤. 灰度图像的二维 Otsu 曲线阈值分割法[J]. 电子学报, 2007, 35(4): 751 - 755.  
FAN Jiu-lun, ZHAO Feng. Two-Dimensional otsu's curve thresholding segmentation method for gray-level images[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 35(4): 751 - 755. (in Chinese)
- [17] 范九伦, 赵凤, 张雪峰. 三维 Otsu 阈值分割方法的递推算算法[J]. 电子学报, 2007, 35(7): 1398 - 1402.  
FAN Jiu-lun, ZHAO Feng, ZHANG Xue-feng. Recursive algorithm for three-dimensional otsu's thresholding segmentation method[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 35(7): 1398 - 1402. (in Chinese)

- [18] W A Yasnoff, J K Mui, J W Bacus. Error measures for scene segmentation[J]. Pattern Recognition, 1977, 9(1): 217 - 231.

### 作者简介



范九伦 男, 1964 年 11 月出生于陕西省西安市, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为模糊集理论、模糊信息处理、模式识别与图像处理、信息安全。

E-mail: jiulunf@xupt.edu.cn



任 静 女, 1985 年 11 月出生于陕西省咸阳市, 2008 年毕业于西安邮电学院信息与控制系, 现为西安邮电学院信号与信息处理专业在读硕士研究生, 主要研究方向为智能信息处理、数字图像处理。

E-mail: rjkristen@sohu.com

### (上接第 2268 页)

- [3] H Zhang, J Hou. On deriving the upper bound of lifetime for large sensor networks[A]. Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing[C]. Boston: ACM Press, 2004. 121 - 132.
- [4] J Xu, CJ Jiang, et al. Upper bounds on lifetime of three dimensional extended UWB sensor networks[J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 19(2): 307 - 312.
- [5] J Xu, CJ Jiang et al. Lower bounds on lifetime of ultra wide band wireless sensor networks[J]. ACM/Springer Wireless Networks (WINET), 2010, 16(8): 1739 - 1748.
- [6] J Xu, YF Hong, CJ Jiang. Bounds on lifetime of cluster-based ultra-wide band wireless sensor network[J]. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2008, 3(3): 159 - 166.
- [7] 徐娟, 洪永发, 蒋昌俊. 分簇的扩展超宽带传感网生存期的下界[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(4): 558 - 565.  
Xu Juan, Hong Yongfa, Jiang Changjun. Lower bounds on lifetime of clustering extended ultra wide band sensor network[J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(4):

558 - 565. (in Chinese)

- [8] 李斌, 林亚平, 胡玉鹏, 等. 无线传感器网络一种基于聚合收益的动态成簇算法[J]. 电子学报, 2010, 38(2A): 128 - 132.  
Li Bin, Lin Ya-ping, Hu Yu-peng, et al. A dynamic clustering algorithm based on polymerization proceeds for wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(2A): 128 - 132. (in Chinese)
- [9] 韩志杰, 王汝传, 凡高娟, 等. 一种基于 ARMA 的 WSN 非均衡分簇路由算法[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 865 - 869, 893.  
Han Zhi-jie, Wang Ru-chuan, Fan Gao-juan, et al. An unequal clustering algorithm in wireless sensor networks based on ARMA[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 865 - 869, 893. (in Chinese)
- [10] HR Thompson. Distribution of distance to nth neighbour in a population of randomly distributed individuals[J]. Ecology, 1956, 37(2): 391 - 394.