

异构传感器网络能量空洞分析与避免研究*

刘安丰⁺, 任 炬, 徐 娟, 曾志文, 陈志刚

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

Analysis and Avoidance of Energy Hole Problem in Heterogeneous Wireless Sensor Networks

LIU An-Feng⁺, REN Ju, XU Juan, ZENG Zhi-Wen, CHEN Zhi-Gang

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

+ Corresponding author: E-mail: anfengliu@sina.com

Liu AF, Ren J, Xu J, Zeng ZW, Chen ZG. Analysis and avoidance of energy hole problem in heterogeneous wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2012, 23(9): 2438–2448 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4167.htm>

Abstract: Since nodes near the sink burden the data load for nodes far away in wireless sensor networks, its energy consumption is higher and easy to form the energy hole. In this paper, for cluster based heterogeneous wireless network in which the node with higher initial energy as the cluster head and nodes with lower initial energy as common nodes, the study proposes an energy hole avoid strategy by working with unequal cluster radius. The core idea of this strategy is that the cluster radius near the sink is smaller and cluster radius away from the sink is bigger, so that more cluster heads with higher initial energy are deployed near the sink, and then weaken the impact of energy hole, so as to balance the energy consumption. This paper aims at mitigating energy hole by deploying fewer nodes under the network lifetime constraint, and gives the detailed calculation and optimization method of the unequal cluster radius values. Theoretical analysis and experimental results show that the strategy in this paper has greatly improve the network lifetime and performance, and can be a good guidance for deployment of heterogeneous wireless networks.

Key words: wireless sensor network; energy hole; unequal cluster-radius; non-uniform distribution; network lifetime

摘 要: 在无线传感器网络中,由于 sink 附近的节点承担远方节点数据的转发,故能量消耗较高,容易在 sink 附近形成能量空洞而使网络提前死亡.针对由初始能量较大节点充当簇头节点与初始能量较小的节点作为普通节点组成的异构分簇无线传感器网络,提出了不等簇半径工作能量空洞避免策略.策略的核心是让近 sink 的簇半径较小,而远 sink 的簇半径较大,这样,近 sink 部署的初始能量较大的簇头节点较多,因而能够减弱能量空洞的影响,以达到能量消耗均衡的目的.将能量空洞避免问题转化为在保证网络寿命满足应用需求约束前提下如何使部署的节点最小的优化问题,并详细给出了不等簇半径的取值与优化方法.理论分析与实验结果表明,所提出的策略对网络寿命与性能有较大的改善,对于异构传感器网络建设有较好的指导意义.

* 基金项目: 国家自然科学基金(61073104, 61073186); 高等学校博士学科点专项科研基金(20090162120074); 湖南省自然科学基金(09JJ6095); 中国博士后基金(20100471789)

收稿时间: 2009-01-19; 定稿时间: 2011-11-30

关键词: 传感器网络;能量空洞;不等簇半径;非均匀分布;网络寿命

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

无线传感器网络具有广泛的应用前景并得到了大量的研究^[1],数据收集是无线传感器网络的重要应用之一^[2,3].在无线传感器网络中,sink 节点作为数据收集的中心,sink 附近的节点承担了更多的路由数据转发,其能量消耗水平高于其他区域,称为热区(hotspot)^[4].热区内的节点过早消耗完自己的能量而死亡,从而使网络失效,称为能量空洞(energy hole)^[4]现象.能量空洞形成后,会导致空洞附近的节点需承担已经死亡节点的数据转发,从而会使其能量消耗水平增大而导致空洞快速扩大,这称为漏斗效应(funneling effect)^[4],最后使整个网络过早死亡或陷于瘫痪.有关研究表明,由于能量空洞的影响,大多数网络死亡后,网络中剩余的能量大于 70%,中等以上网络甚至高达 90%^[5].因此,如何充分利用网络能量、避免能量空洞、延长网络寿命具有重要的应用前景与实际价值.

分簇网络作为一种能量高效的网络被提出了出来^[6,7].文献[8,9]提出了一种异构网络结构,在这样的网络中,存在两类节点:能量较大充当簇头的节点和能量较小只进行数据采集的普通节点.这种方法适合于分簇网络中簇头节点能量消耗较大的特点,有助于提高网络效率.但是,即使在采用了初始能量较大的节点充当簇头节点,由于无线传感器网络“多对一”数据收集的特征,近 sink 的簇头节点依然消耗的能量较多,从而异构传感器网络中依然存在能量空洞现象.

本文主要从理论分析出发,提出了簇头节点非等距离(非均匀)部署的能量空洞避免策略.与以往非等距离部署只定性研究不同的是:本文从理论上给出了较为准确的非等簇半径的计算方法;除了达到能量消耗均衡外,还强调如何通过网络优化来提高每单位部署成本所带来的网络寿命(network lifetime per unit deployment cost)^[10].从能量均衡与能量高效两个方面同时进行能量空洞避免优化,使得到的网络性能较为全面优化,优化效果明显.

1 能量空洞避免的相关研究

能量空洞现象作为无线传感器网络中特有的一种现象引起了人们广泛的研究兴趣^[4,5,7].早期的研究往往关注使网络的总能量消耗最小,但随着研究的深入,研究人员发现:虽然降低了网络的总能量消耗,但其网络寿命并没有得到相应的提高,其实质原因在于网络寿命为网络中第一个死亡节点的寿命^[7].因此,负载最重的节点往往是整个网络的瓶颈,决定了整个网络的寿命.促使研究人员意识到只单纯地从减少网络的总能量到同时从能量均衡出发来对网络进行优化.由于能量空洞避免的相关研究极其多样,下面仅介绍与本文研究相关的一些能量空洞避免的相关研究.

(1) 基于节点密度控制的能量空洞避免策略.其原理是:因为能量空洞的形成是由于 sink 附近的能量消耗大,因此,如果将 sink 节点附近部署更多的节点,这样就有更多的节点用于中继远方的数据,能够减少能量空洞的影响,这就是所谓的节点非均匀分布策略.节点密度控制策略的另一种表现是:在可能出现能量空洞的地方部署初始能量更多的节点^[8,9],也能够有助于能量空洞的避免.

Olariu 和 Stojmenovic^[11]首先给出了关于能否避免能量空洞问题的理论结果,得到的结论是:如果网络中被划分的圆环等宽,路由上的能耗能够降到最低,那么此时网络中可能会出现能量空洞.他们证明:当能量衰减系数 $\alpha > 2$ 时,通过调整圆环的宽度可以避免能量空洞出现;而 $\alpha = 2$ 时,则网络无法避免能量空洞形成.

文献[12]设 WSN 中节点不均匀分布,从理论上推导出完全避免能量洞的产生不可行;但除最外层之外各环(ring)的能量平衡是可达成的.提出了一种能量均衡的路由算法,可使得 SN 所消耗的能量可以下降至 10%.

文献[13]假定在一个矩形节点均匀分布的网络中,为了提高网络的能量效率,提出一种节点初始能量非均匀分布的方法,使距离 Sink 较近的节点有较多的初始能量储备;他们同时提出一种基于移动 Sink 的路由算法.基于节点密度控制来避免能量空洞是一种有效的方法,但是目前的这类研究还主要集中于平面网络.而分簇网络由于具有更高的效率因而其能量空洞避免的研究往往更具有意义,因而下面介绍与本文研究相关的分簇网

网络的能量空洞避免研究.

(2) 不等分簇网络的能量空洞避免策略.不等簇半径的研究是分簇网络能量空洞避免的经典研究,类似的研究非常多.例如文献[14]指出,在分簇网络中,由于近 sink 的簇需要转发远方数据,因而能量消耗高.但是,如果使近 sink 的簇半径较小,那么簇头节点承担簇内数据收集的能量消耗就较小,因而就可以节省下一部分能量来转发远方的数据中继,因而能够减弱能量空洞的影响.

我们也对另一种形式的不等簇半径工作方式进行了研究^[15],其思想是:采用不同的簇半径时,网络的最大能量消耗的位置是不同的,因而如果采用一组不同的簇半径轮换工作的话,最大能量消耗就会分布在不同的区域,从而均衡了能量消耗.在一定程度上避免了采用单一簇半径时,能量消耗最高的区域总是固定在某一位置容易形成能量空洞的不足,进而能够提高寿命.

在文献[7]中,我们对分簇网络中采用多种优化路由方式(包括不等簇路由方式)来提高网络寿命算法的性能进行理论分析,详细地给出多种分簇网络的第一个节点死亡寿命与全部节点寿命的理论上限.我们得到结论,如果仅通过分簇网络的路由优化进行能量空洞避免,其效果有限.

本文研究的背景与文献[8,9]类似,在这类异构分簇网络中,存在两类节点:有一类节点,初始能量较大充当簇头节点;另一类节点初始能量较小,充当普通节点,感知与收集数据.显然,在异构网络中,如果簇头节点均匀部署的话,依然存在能量空洞.但是,如果在近 sink 附近部署更多的簇头节点,也就是簇半径不等,就能够有效地减弱能量空洞的影响.这种思想已经有相关的研究,本文与这些研究的关系是:本文与文献[12]的不同是:文献[12]中的节点密度不同,但发射半径固定;而本文的簇头节点密度(簇半径)与发射半径都可变.本文的簇半径大小不同,这又与文献[14]的研究有相似之处.但与文献[14]不同的是:本文研究的是一种异构网络,而且本文主要是从理论上推导出距离 sink 节点不同距离处簇半径的大小,以指导传感器网络的建设;而文献[14]主要提出了不等簇工作的具体路由策略,对于究竟距离 sink 节点多远其簇半径的取值大小没有深入的研究.本文不仅仅关注的网络能量消耗均衡,更关注的是网络效率最大化^[10],并首次从理论上分析得到了异构不均网络优化的簇半径计算方法,对传感器网络的建设具有较好的指导意义.

2 系统模型

A. 网络结构模型

考虑一个由 n 个普通传感器节点形成的圆形网络区域,用 s_i 表示第 i 个普通节点,相应的普通节点集合为 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, $|S|=n$, 其节点密度为 λ_1 , 初始能量为 E_c . 而另一类节点叫簇头节点,它不感知与监测环境,只汇集簇内的数据与中继远方簇头节点转发的数据,其初始能量为 E_h . 这两类节点的发射功率是可控的,共有发射功率级的集合为 $\{1, \dots, A\}$ ^[15], 节点可根据接收者的距离远近,自由调整其发射功率以节约能量消耗.例如, Berkeley Motes 节点具有 100 个发射功率等级^[5]. sink 节点位于圆心,网络半径为 R , 簇半径为 \mathcal{R} , 普通节点发射功率对应的发射半径为 r . 网络应用场景为周期性的数据收集,即每一个周期内普通节点将采集一个数据,并传送给簇头节点.

B. 能量消耗模型

采用典型能量消耗模型^[15], 发送数据的能量消耗见公式(1), 接收数据的能量消耗见公式(2):

$$\begin{cases} E_t = lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2, & \text{if } d < d_0 \\ E_t = lE_{elec} + l\epsilon_{amp}d^4, & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_r(l) = lE_{elec} \quad (2)$$

其中, E_{elec} 表示发射电路损耗的能量. 若传输距离小于阈值 d_0 , 功率放大损耗采用自由空间模型; 当传输距离大于等于阈值 d_0 时, 采用多路径衰减模型. $\epsilon_{fs}, \epsilon_{amp}$ 分别为这两种模型中功率放大所需的能量. 节点接收 l 比特的数据消耗的能量见公式(2). 在本文中, 以上参数的具体设置取自文献[15], 见表 1.

C. 网络的几个重要定义

定义 1(网络寿命). 从传感器网络开始工作, 到第 1 个节点死亡时, 传感器网络所成功完成数据收集的次数. 这是被广泛接受的一种网络寿命的定义^[7].

定义 2(网络效率). 这是指网络寿命与部署网络所花费的成本的比值.

Table 1 Network parameters

表 1 网络参数

| Parameter | Value |
|------------------------------------|---------|
| Threshold distance (d_0) (m) | 87 |
| Sensing range r_s (m) | 15 |
| E_{elec} (nJ/bit) | 50 |
| e_{fs} (pJ/bit/m ²) | 10 |
| e_{amp} (pJ/bit/m ⁴) | 0.001 3 |
| E_{df} (nJ/(bit·signal)) | 5 |
| Initial energy (J) | 0.5 |

3 基于非等簇半径的能量空洞避免策略

3.1 异构网能量空洞避免问题描述

本节提出的非等簇头半径的能量空洞避免策略的思想是:离 sink 近的簇半径较小,簇内数据收集的能量消耗小,同时,在簇头节点间中继数据的距离就较近,中继单位数据所需的能量就较少,那么就能够中继更多的数据;而远离 sink 的簇头半径较大,则簇头节点间中继数据的距离较大,这样,中继单位数据所需要的能量消耗就大,但中继的数据少,这样就有可能做到能量消耗均衡,提高网络性能.下面对能量空洞避免问题进行较为准确的定义与描述.

首先,对网络以 sink 为圆心、以簇直径为圆环的环径划分为大小不等的圆环.第一个圆环的直径为 \mathcal{R}_0 ,此圆环内的普通节点产生的数据直接发送到 sink;其他环的数据先发往簇头,然后通过簇头间的中继发送到 sink.这样,各环的环径依次为 $2\mathcal{R}_1, 2\mathcal{R}_2, \dots, 2\mathcal{R}_j$, 且 $\mathcal{R}_1 = \mathcal{R}_0$. 那么有如下等式成立:

$$R = \mathcal{R}_0 + 2\mathcal{R}_1 + 2\mathcal{R}_2 + \dots + 2\mathcal{R}_j \quad (3)$$

设簇头部署在圆环的中心,则对于第 i 个圆环的簇头其发射半径为 $t_i = \mathcal{R}_i + \mathcal{R}_{i-1} | i \in \{1, \dots, j\}$.

第 1 个圆环的面积为 $\pi(2\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0)^2 - \pi\mathcal{R}_0^2$, 而此圆环内簇头节点的半径为 \mathcal{R}_1 , 每个簇头节点覆盖的面积为 $\pi\mathcal{R}_1^2$, 那么此圆环内应该部署的簇头节点个数为

$$n_c^1 = \frac{\pi(2\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0)^2 - \pi\mathcal{R}_0^2}{\pi\mathcal{R}_1^2} \quad (4)$$

依此类推,可得到第 i 个圆环的簇头节点个数为

$$n_c^i = \frac{\pi(2\mathcal{R}_i + 2\mathcal{R}_{i-1} + \dots + 2\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0)^2 - \pi(2\mathcal{R}_{i-1} + \dots + 2\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0)^2}{\pi\mathcal{R}_i^2} \quad (5)$$

对于给定的 R , 对于某一性能优化指标,其簇头节点的总个数为 N_n , 那么有下式成立:

$$n_c^1 + n_c^2 + n_c^3 + \dots + n_c^i + \dots + n_c^j = N_n \quad (6)$$

簇头节点接收的数据分为两种:一种是本簇内产生的数据,二是外围簇头发送过来的数据.由于第 $i+1$ 环的所有簇头节点的数据都必须经过第 i 环内的簇头节点中继,即第 i 环所有簇头节点接收的簇外数据的总和就是网络中除了第 i 环以及小于第 i 环以内节点产生的数据,其他环节点产生的数据都要经过第 i 环中继,所以第 i 环簇头节点接收外环簇头节点转发过来的数据总量为

$$\rho\{\pi\mathcal{R}^2 - \pi(2\mathcal{R}_i + 2\mathcal{R}_{i-1} + \dots + 2\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0)^2\} \quad (7)$$

第 i 环内共有簇头 n_c^i 个,则第 i 环内每个簇头接收的外环簇头节点中继过来的数据量为

$$d_o^i = \rho\{\pi\mathcal{R}^2 - \pi(2\mathcal{R}_i + 2\mathcal{R}_{i-1} + \dots + 2\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0)^2\} / n_c^i \quad (8)$$

第 i 环内簇头节点接收的簇内数据的个数为

$$d_i^i = \rho\pi\mathcal{R}_i^2 \quad (9)$$

这样,第 i 环每个簇头接收的总数据个数为上面两式的和

$$D_r^i = d_o^i + d_i^i = \rho\{\pi R^2 - \pi(2\mathcal{R}_i + 2\mathcal{R}_{i-1} + \dots + 2\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0)^2\} / n_c^i + \rho\pi\mathcal{R}_i^2 = \frac{\rho\{\pi R^2 - \pi(2\mathcal{R}_i + 2\mathcal{R}_{i-1} + \dots + 2\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0)^2\}}{\pi(2\mathcal{R}_i + 2\mathcal{R}_{i-1} + \dots + 2\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0)^2 - \pi(2\mathcal{R}_{i-1} + \dots + 2\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0)^2} + \rho\pi\mathcal{R}_i^2 \tag{10}$$

由此,第 i 环簇头节点向第 $i-1$ 环簇头节点发送数据的距离为 $t_i = \mathcal{R}_i + \mathcal{R}_{i-1} | i \in \{1, \dots, j\}$. 依据上述条件可以得到第 i 环簇头节点所消耗的能量公式为公式(11), 式中的 a 依据发送距离的不同而选择 2 或者 4(参见公式(1)):

$$E_i = D_r^i (2E_{elec} + \varepsilon_a t_i^a) \tag{11}$$

当簇头节点的能量消耗均衡时,其能量效率最高,因此有下式成立:

$$E_1 = E_2 = E_3 = \dots = E_i = \dots = E_j \tag{12}$$

那么现在的问题是:对于一个给定的异构网络——其网络规模为 R 、普通节点的密度为 λ_1 、应用需要保证的监测寿命为 Γ , 由于普通节点的密度是确定的,因此优化的问题就可以表述为:如何求得最佳的一组簇半径 $\{\mathcal{R}_0, \mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_j\}$, 使网络的寿命 $T > \Gamma$, 且所需的簇头节点个数 N_n 最小. 综合以上,不等簇半径工作的求解就是联合使下式成立:

$$\begin{cases} \max(T) = \min(E_i), \min(N_n) \\ \text{s.t. } T \geq \Gamma, E_1 = E_2 = E_3 = \dots = E_i = \dots = E_j \\ R = \mathcal{R}_0 + 2\mathcal{R}_1 + 2\mathcal{R}_2 + \dots + 2\mathcal{R}_j \\ N_n = n_c^1 + n_c^2 + n_c^3 + \dots + n_c^i + \dots + n_c^j \end{cases} \tag{13}$$

3.2 簇头节点能量消耗均衡策略的求解

网络寿命优化的实质就是对公式(13)的求解,首先我们分析公式(13)的可解性. 对此,有如下定理 1 的结论.

定理 1. 本文的异构网络的优化目标表达式(13)是可解的.

证明:由于簇头节点的发送半径的级别是属于有限的集合 $\{1, \dots, A\}$. 对于一个给定的 \mathcal{R}_0 , 如果能够计算出此时的网络寿命 T 与所需的簇头节点个数 N_n 的话,那么簇头节点依次从 $\{1, \dots, A\}$ 中选取不同的发送半径作为 \mathcal{R}_0 , 就能够通过比较的方法选择最优的 \mathcal{R}_0 , 从而得到最优的 T 与 N_n . 因此,只要证明公式(14)有解即可:

$$\begin{cases} E_1 = E_2 = E_3 = \dots = E_i = \dots = E_j \\ R = \mathcal{R}_0 + 2\mathcal{R}_1 + 2\mathcal{R}_2 + \dots + 2\mathcal{R}_j \\ N_n = n_c^1 + n_c^2 + n_c^3 + \dots + n_c^i + \dots + n_c^j \end{cases} \tag{14}$$

由于 E_i 只与 $\mathcal{R}_i | i \in \{0, i\}$ 有关,那么对于一个给定的 \mathcal{R}_0 , 依据 $E_1 = E_2 = E_3 = \dots = E_i = \dots = E_j$, 就可以推导出任意的 \mathcal{R}_i 与 \mathcal{R}_0 的关系,并可以把所有的 \mathcal{R}_i 都用 \mathcal{R}_0 来表示,即可以把式 $R = \mathcal{R}_0 + 2\mathcal{R}_1 + 2\mathcal{R}_2 + \dots + 2\mathcal{R}_j$ 化为 R 只与 \mathcal{R}_0 和 j 相关.

而由于 $n_c^i = \frac{\pi(2\mathcal{R}_i + 2\mathcal{R}_{i-1} + \dots + 2\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0)^2 - \pi(2\mathcal{R}_{i-1} + \dots + 2\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0)^2}{\pi\mathcal{R}_i^2}$, 这样,每一个 n_c^i 都可以化为只与 \mathcal{R}_0 相

关,则可以将式 $N_n = n_c^1 + n_c^2 + n_c^3 + \dots + n_c^i + \dots + n_c^j$ 也化为 N_n 只与 \mathcal{R}_0 和 j 相关.

那么,下面分析对于一个确定的 \mathcal{R}_0 , 必能够得到一组 \mathcal{R}_i 的值以及簇头节点总数量 N_n .

(A) 第 1 种情况:如果 $t_i < 87$, 这时 $\varepsilon_a = \varepsilon_{fs}, a = 2$, 其能量消耗计算公式:

$$E_i = D_r^i (2E_{elec} + \varepsilon_a t_i^a) = \rho\pi \left\{ \frac{R^2 - (2\mathcal{R}_i + \kappa_i)^2}{4\mathcal{R}_i^2 + 4\mathcal{R}_i\kappa_i} + \mathcal{R}_i^2 \right\} \times (2E_{elec} + \varepsilon_a (\mathcal{R}_i + \mathcal{R}_{i-1})^2) \tag{15}$$

其中, $\kappa_i = (2\mathcal{R}_{i-1} + \dots + 2\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0)$.

令 $x_i = \mathcal{R}_i$, 则上式又可以化为

$$E_i = \rho\pi \left\{ R^2 - (2x_i + \kappa_i)^2 \frac{x_i}{4x_i + 4\kappa_i} + x_i^2 \right\} \times (2E_{elec} + \varepsilon_a (x_i + \mathcal{R}_{i-1})^2) \tag{16}$$

又令 $\nabla = E_1 = \{\rho\{\pi R^2 - 9\pi \mathcal{R}_0^2\}/8 + \rho\pi \mathcal{R}_0^2\}(2E_{elec} + \varepsilon_a(2\mathcal{R}_0)^a)$. 则依据公式(14),有

$$E_1 = E_2 = E_3 = \dots = E_i = \dots = E_j = \nabla \tag{17}$$

也就是

$$\rho\pi \left\{ \left\{ R^2 - (2x_i + \kappa_i)^2 \right\} \frac{x_i}{4x_i + 4\kappa_i} + x_i^2 \right\} \times (2E_{elec} + \varepsilon_a(x_i + \mathcal{R}_{i-1})^2) = \nabla \tag{18}$$

经过简化后为

$$\varepsilon_{efs}\rho\pi\{R^2 - \kappa_i^2\}x_i^3 + 2\varepsilon_{efs}\rho\pi\{R^2 - \kappa_i^2\}\mathcal{R}_{i-1}x_i^2 + \{2E_{elec} + \varepsilon_{efs}\mathcal{R}_{i-1}^2 + 4\nabla\}x_i + 4\kappa_i\nabla = 0 \tag{19}$$

如果 \mathcal{R}_0 已经得知,那么 ∇ 是可得到的,而 κ_i 与 $\mathcal{R}_0, \mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_{i-1}$ 相关,因此依据公式(19),在 \mathcal{R}_0 给出的情况下能够计算出 \mathcal{R}_1 的话,那么就可依据 $\mathcal{R}_0, \mathcal{R}_1$ 计算出 \mathcal{R}_2 ,依此类推,可以计算所有的 \mathcal{R}_i .这样,只要假设式样公式(19)在 x_i 为未知数的情况下可解,就可以证明问题是可解的.而公式(19)可以通过简化为一元三次方程,求得方程的解.

令 $a = \varepsilon_{efs}\rho\pi\{R^2 - \kappa_i^2\}, b = 2\varepsilon_{efs}\rho\pi\{R^2 - \kappa_i^2\}\mathcal{R}_{i-1}, c = \{2E_{elec} + \varepsilon_{efs}\mathcal{R}_{i-1}^2 + 4\nabla\}, d = 4\kappa_i\nabla$, 则上述方程简记为

$$ax_i^3 + bx_i^2 + cx_i + d = 0.$$

可化为 $\left(x_i + \frac{b}{3a}\right)^3 + \left(\frac{3ac - b^2}{3a^2}\right)\left(x_i + \frac{b}{3a}\right) + \frac{27a^2d - 9abc + 2b^3}{27a^3} = 0$. 即,该方程的解可表示成公式(19).可见,在第1种情况下是可解的.

$$\begin{cases} x_i = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} - \frac{b}{3a}, & \text{if } \left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3 \geq 0 \\ x_i = \frac{2}{3}\sqrt{-3p} \cos\left(\frac{1}{3}\arccos\frac{-3q\sqrt{-3p}}{2p^2}\right) - \frac{b}{3a}, & \text{if } \left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3 < 0 \\ p = \frac{3ac - b^2}{3a^2}, \quad q = \frac{27a^2d - 9abc + 2b^3}{27a^3} \\ a = \varepsilon_{efs}\rho\pi\{R^2 - \kappa_i^2\}, \quad b = 2\varepsilon_{efs}\rho\pi\{R^2 - \kappa_i^2\}\mathcal{R}_{i-1} \\ c = \{2E_{elec} + \varepsilon_{efs}\mathcal{R}_{i-1}^2 + 4\nabla\}, \quad d = 4\kappa_i\nabla \end{cases}$$

其中, $\nabla = \{\rho\{\pi R^2 - 9\pi \mathcal{R}_0^2\}/8 + \rho\pi \mathcal{R}_0^2\}(2E_{elec} + \varepsilon_a(2\mathcal{R}_0)^2), \kappa_i = (2\mathcal{R}_{i-1} + \dots + 2\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0), x_i = \mathcal{R}_i$.

(B) 第2种情况:如果 $t_i > 87$, 则 $\varepsilon_a = \varepsilon_{amp}, a = 4$. 那么能量计算公式化为

$$E_i = D_r^i(2E_{elec} + \varepsilon_{amp}t_i^4) = \rho\pi \left\{ \frac{R^2 - (2\mathcal{R}_i + \kappa_i)^2}{4\mathcal{R}_i^2 + 4\mathcal{R}_i\kappa_i} + \mathcal{R}_i^2 \right\} \times (2E_{elec} + \varepsilon_{amp}(\mathcal{R}_i + \mathcal{R}_{i-1})^4) \tag{20}$$

其中, $\kappa_i = (2\mathcal{R}_{i-1} + \dots + 2\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0)$.

经过简化后为

$$ax_i^5 + 4a\mathcal{R}_{i-1}x_i^4 + 6a\mathcal{R}_{i-1}^2x_i^3 + 4a\mathcal{R}_{i-1}^3x_i^2 + bcx_i - 4\kappa_i\Delta = 0 \tag{21}$$

其中, $a = \varepsilon_{amp}\rho\pi(R^2 - \kappa_i^2), b = \rho\pi(R^2 - \kappa_i^2), c = (2E_{elec} + \varepsilon_{amp}(\mathcal{R}_i + \mathcal{R}_{i-1})^4 + 4\Delta)$.

公式(21)是一般的一元五次方程,由相关数学知识知道:一般来说,只有一些可以通过分解因式降次的五次方程才可以解,对于一般的五次方程而言是没有公式解的,即不能用任何一种初等函数表示其解.但对于确定系数的五次方程,可以通过数值方法求出其 \mathcal{R}_i 的近似解^[9].

综上所述,可以得到如下:

- (1) 对于确定的第一环簇半径 \mathcal{R}_0 , 必能够得到一组 \mathcal{R}_i 的值以及簇头节点总数量 N_n ;
- (2) 由 \mathcal{R}_0 的值依据下式可以得到第1个环内簇头节点的能量消耗为

$$E_1 = \{\rho\{\pi R^2 - 9\pi \mathcal{R}_0^2\}/8 + \rho\pi \mathcal{R}_0^2\}(2E_{elec} + \varepsilon_a(2\mathcal{R}_0)^a).$$

而依据上面计算的一组 \mathcal{R}_i 值,且必有 $E_1=E_2=E_3=\dots=E_i=\dots=E_j$. □

下面通过一个计算实例来说明定理 1.实验的网络规模 $R=500m$.已知 \mathcal{R}_0 ,依据公式(14)可以计算出在不同初始簇半径(指最接近 sink 的簇半径) \mathcal{R}_0 下的能量消耗,如图 1 所示;知道其能量消耗,依据上面的定理 1 进而可以得到网络寿命,如图 2 所示.

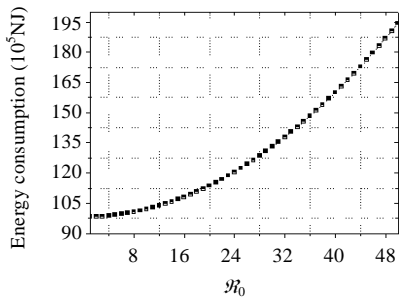


Fig.1 Energy consumption under difference \mathcal{R}_0

图 1 不同 \mathcal{R}_0 下的能量消耗

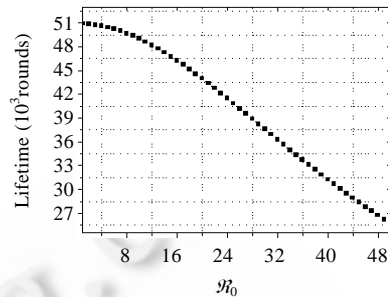


Fig.2 Network lifetime under difference \mathcal{R}_0

图 2 不同 \mathcal{R}_0 下的网络寿命

根据初始簇半径 \mathcal{R}_0 ,依据上面的定理 1 就可以得到不同的簇半径个数,以及一组 $\{\mathcal{R}_0, \mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_j\}$ 和簇头节点总数量 N_n .其中,图 3 表示了不同 \mathcal{R}_0 下 j 的取值,而图 4 表示了不同簇半径 \mathcal{R}_0 下每一个 $\{\mathcal{R}_0, \mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_j\}$ 的取值.图 5 表示了在不同初始 \mathcal{R}_0 下的总簇头节点的个数 N_n .有了图 2 的网络寿命和簇头节点的总个数,就可得到图 6 所示每簇头节点的网络寿命,即网络效率.

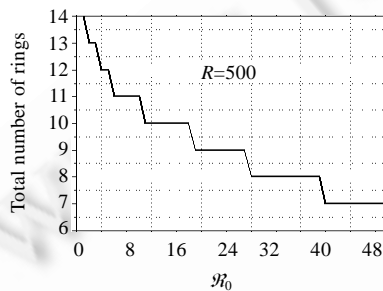


Fig.3 Total number of rings under difference \mathcal{R}_0

图 3 不同 \mathcal{R}_0 下整个网络划分为多少个不同的簇半径

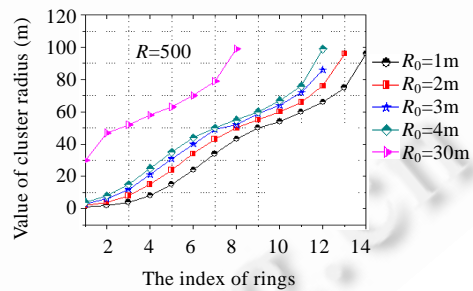


Fig.4 Value of cluster radius

图 4 簇半径的取值

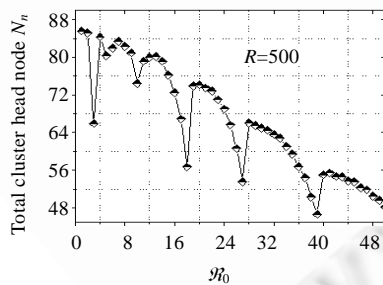


Fig.5 N_n under difference \mathcal{R}_0

图 5 不同 \mathcal{R}_0 下所需的簇头节点数量

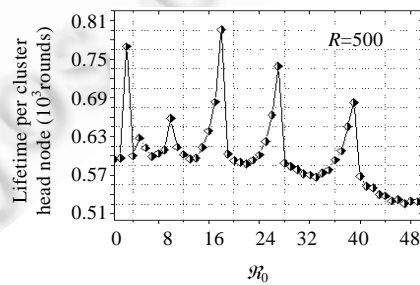


Fig.6 Network lifetime per cluster head node

图 6 每个簇头节点的网络寿命

从图 5 可以看出一个有趣的现象.一般地直观认为:随着初始簇半径 \mathcal{R}_0 的增长,因为随后依据能量均衡计算

得到的 $\{\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_j\}$ 都与 \mathcal{R}_0 满足一定的关系,如果初始簇半径 $\mathcal{R}_0^{(1)} < \mathcal{R}_0^{(2)}$,则初始簇半径为 $\mathcal{R}_0^{(2)}$ 时得到那组 $\{\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_j\}^{(2)}$ 大于 $\{\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_j\}^{(1)}$,那么总簇头节点的个数 $N_n^{(1)} > N_n^{(2)}$.换句话说就是,随着初始簇半径的增长,网络寿命是下降的,但部署网络所需的簇头节点个数也是下降的.

但从计算结果的图5来看并不是这样的,在图5中,随着初始簇半径 \mathcal{R}_0 的增长,总簇头节点的个数并不是逐渐下降,而是下降后再上升,然后逐渐下降再上升的一种波动的曲线.这是因为当初簇半径取到最佳值时,这时依据能量消耗公式计算得到网络效率最高,从而能够达到既减少簇头节点的数量又能够提高网络寿命的目的.从中可以得到,簇头节点在不等距离的部署中存在一组最优的不等发射半径,使得系统得到的网络效率最高,如图6所示的网络效率中.可见,不同的 $\{\mathcal{R}_0, \mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_j\}$ 发射半径组得到的网络效率不相同,而且是一种有多个极值点的非线性关系.

对此,提出了算法1来求解上面的问题.算法1的思路是这样的:先让初始簇半径为一个最小的簇半径取值,即 $\mathcal{R}_0 = \mathcal{R}_0^{\min}$.利用下式计算在此 \mathcal{R}_0 下的网络寿命 $\Gamma(\mathcal{R}_0)$:

$$\Gamma(\mathcal{R}_0) = \frac{E_{\text{初}}}{E_1} \left| E_1 = \{\rho\{\pi R^2 - 9\pi \mathcal{R}_0^2\} / 8 + \rho\pi \mathcal{R}_0^2\} (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_a (2\mathcal{R}_0)^a) \right.$$

进而采用公式(14)的求解方法,可以得到此 \mathcal{R}_0 下一组簇半径的值 $\{\mathcal{R}_0, \mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_j\}$ 以及簇头节点的总个数 $n(\mathcal{R}_0)$.如果此时得到网络寿命 $\Gamma(\mathcal{R}_0) > \Gamma$,这说明按照这种部署方案可以满足应用的需求.但这时求得的簇头节点部署方案并不一定是最优的,因此让初始簇半径增长一个较小的步长,即 $\mathcal{R}_0 = \mathcal{R}_0 + \varepsilon$.重复上面的求解过程,直到得到一个 $\Gamma(\mathcal{R}_0) < \Gamma$,这时表示以后的初始簇半径 \mathcal{R}_0 均不满足应用的需求.这时,取使前面已经求得 $N_n(\mathcal{R}_0)$ 中的最小值就是满足应用需求的最小簇头节点的数量.所对应的 $\{\mathcal{R}_0, \mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_j\}$ 即为部署方案,对应的 $\Gamma(\mathcal{R}_0)$ 即为网络寿命.下面的算法给出了如何计算得到最优的保证应用需求的最优簇头节点部署方案.

算法1. 输入参数为网络普通节点密度 λ_1 ,网络规模 R 以及应用需要保证监测寿命 Γ ;输出结果要求簇头节点的网络寿命大于 Γ : $\min(\text{life}(n_c^i)) > \Gamma$ 以及簇头节点簇半径的部署方案 $\{\mathcal{R}_0, \mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_j\}$,并满足 $R = \mathcal{R}_0 + 2\mathcal{R}_1 + 2\mathcal{R}_2 + \dots + 2\mathcal{R}_j$ 和簇头节点个数最小 $\min(N_n) = n_c^1 + n_c^2 + n_c^3 + \dots + n_c^i + \dots + n_c^j$.

Step 1. let $\mathcal{R}_0 = \mathcal{R}_0^{\min}$ // \mathcal{R}_0 为初始簇半径中最小的值.

Step 2. 依据 $E_1 = \{\rho\{\pi R^2 - 9\pi \mathcal{R}_0^2\} / 8 + \rho\pi \mathcal{R}_0^2\} (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_a (2\mathcal{R}_0)^a)$, 计算 $\Gamma(\mathcal{R}_0) = \frac{E_h}{E_1}$.

If $\Gamma(\mathcal{R}_0) < \Gamma$ then 转到 step 7 进行择优. // 此时,计算得到的 \mathcal{R}_0 是最大的 \mathcal{R}_0 ,再增大 \mathcal{R}_0 ,其网络寿命就不符合应用的需求了.

Step 3. 依据上面的分析得到一组 \mathcal{R}_i // 确定距离 sink 不同距离处簇半径的大小.

Step 4. 有了 \mathcal{R}_i ,依据公式(14)得到不同簇半径下的簇头节点的个数 $n_c^1, n_c^2, n_c^3, \dots, n_c^i, \dots, n_c^j$ 以及簇头节点的总个数 $N_n(\mathcal{R}_0) = n_c^1 + n_c^2 + n_c^3 + \dots + n_c^i + \dots + n_c^j$.

Step 5. let $\mathcal{R}_0 = \mathcal{R}_0 + \varepsilon$ // ε 为增长的步长.

Step 6. goto step 2.

Step 7. 对得到满足条件的一组 $N_n(\mathcal{R}_0)$ 进行比较,选择其中最小的 $N_n(\mathcal{R}_0)$ 所对应的 \mathcal{R}_0 为满足应用的最优的第一个簇的簇半径.其最优的部署方案为 \mathcal{R}_0 所对应的一组 $\{\mathcal{R}_0, \mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_j\}$ 为所求,所需簇头节点个数为最小的 $N_n(\mathcal{R}_0)$.

Step 8. 输出 $n_c(\mathcal{R}_0), \{\mathcal{R}_0, \mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_j\}$.

Step 9. End

4 计算实例与实验结果

4.1 实验场景设置

采用 OMNET++ 来进行实验验证,OMNET++ 是一个为大型网络提供开源的、基于组件的、模块化的开放

网络仿真平台,在非商业化的仿真软件中拥有大量的用户,得到学术界的广泛认可^[16].实验参数如果没有特别指出都是基于如下:普通传感器节点的能量 $E_c=0.5J$,而簇头节点的能量是普通节点的 7 000 倍,即 $E_h=3500J$.传感器能量消耗模型中的参数取值见表 1.

4.2 实验结果

图 7 给出的是,在不同初始簇半径 \mathcal{R}_0 下,等簇与不等簇工作方式下的网络寿命对比情况.从图 7 可以看出,采用等簇与不等方式下,由于网络寿命都是取决于距 sink 最近的簇的寿命,因此初始簇半径 \mathcal{R}_0 相等的情况下,那么两个方法的寿命基本相等;而且网络寿命是随着簇半径的增大而降低,只是不等簇方式下降的趋势比较缓和.虽然这两种方式的网络寿命基本接近,但是等簇工作方式下,远离 sink 的簇半径也是 \mathcal{R}_0 ,因而其所需部署的簇头节点多得多;而不等簇方式,远离 sink 的簇半径较大,因而所需要的簇头节点要少得多,图 8 给出了这种对比.

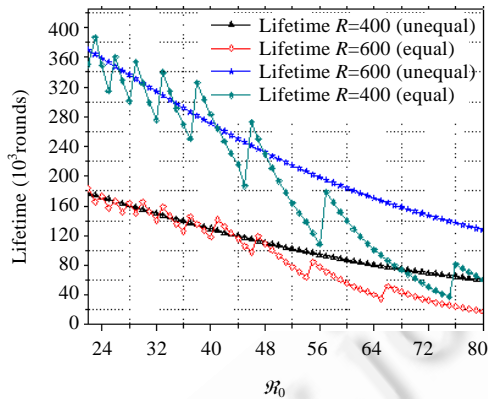


Fig.7 Lifetime of unequal vs. equal
图 7 在非等簇方式和非等簇方式下的节点寿命对比

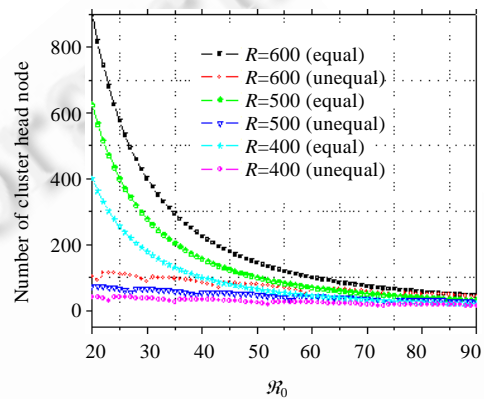


Fig.8 Number of cluster head node of unequal vs. equal
图 8 在非等簇方式和非等簇方式下所需簇头节点的数量

从图 8 可以看出,在本文的非等簇方式下,网络规模相差很大的情况下,所需部署的簇头节点个数变化较小.造成这种现象的原因是:在优化的簇半径下,远 sink 的簇半径变得较大,因此网络规模增大时,增加的簇个数并不多.依据图 7 和图 8,可以很容易得到网络效率的结果如图 9 所示.从图 8 和图 9 可以看出,本文提出的策略可较好地提高网络效率,证明了其有效性.图 10 给出的是本文的理论分析与实验结果的对比情况,从图 10 可以看出,本文的理论分析结果与实验结果较为一致,说明本文理论分析的正确性.

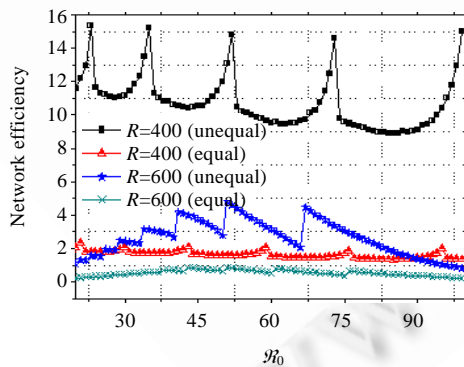


Fig.9 Network efficiency unequal vs. equal
图 9 在非等簇方式和非等簇方式的网络效率对比

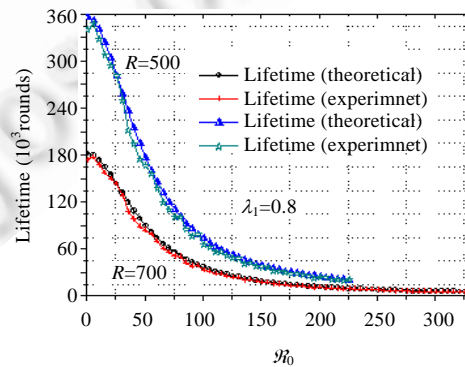


Fig.10 Network lifetime per cluster head node
图 10 理论推导与实验结果的对比

5 结束语

无线传感器网络是近几年来兴起的研究热点,其中,无传感器网络的能量和寿命问题是人们最为关心的核心问题之一.本文提出了采用不等簇半径工作来提高网络效率的策略,并详细给出了其性能分析,给出了优化的算法.经过理论分析与实验,结果表明了该策略的有效性.对比以往研究,本文的主要创新点还在于以网络效率的提高为策略的出发点,从而更适于实际的无线传感器网络的应用.进一步的工作可以从数据收集模式上,比如考虑移动 sink、多 sink 方式的网络能量空洞避免的策略与机制研究.

References:

- [1] Ok CS, Lee S, Mitra P, Kumara S. Distributed routing in wireless sensor networks using energy welfare metric. *Information Sciences*, 2010,180(3):1656–1670. [doi: 10.1016/j.ins.2010.01.019]
- [2] Malhotra B, Nikolaidis I, Nascimento MA. Aggregation convergecast scheduling in wireless sensor networks. *Wireless Network*, 2011,17(2):319–335. [doi: 10.1007/s11276-010-0282-y]
- [3] Shi LQ, Fapojuwo AO. TDMA scheduling with optimized energy efficiency and minimum delay in clustered wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2010,19(7):927–940. [doi: 10.1109/TMC.2010.42]
- [4] Li J, Mohapatra P. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks. *Pervasive and Mobile Computing*, 2007,3(3):233–254. [doi: 10.1016/j.pmcj.2006.11.001]
- [5] Song C, Liu M, Cao JN, Zheng Y. Maximizing network lifetime based on transmission range adjustment in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2009,32(11):1316–1325. [doi: 10.1016/j.comcom.2009.02.002]
- [6] Xu XH, Li XY, Mao XF, Tang SJ, Wang SG. A delay-efficient algorithm for data aggregation in multihop wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2011,23(1):163–175. [doi: 10.1109/TPDS.2010.80]
- [7] Liu AF, Zhang PH, Chen ZG. Theoretical analysis of the lifetime and energy hole in cluster based wireless sensor networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2011,71(10):1327–1355. [doi: 10.1016/j.jpdc.2011.05.003]
- [8] Mhatre V, Rosenberg C, Kofman D, Mazumdar R, Shroff N. A Minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2005,4(1):4–15. [doi: 10.1109/TMC.2005.2(410)%204]
- [9] Yang WG, Guo TD, Zhao TA. Optimal lifetime model and its solution of a heterogeneous surveillance sensor network. *Chinese Journal of Computers*, 2007,30(4):532–538 (in Chinese with English abstract).
- [10] Chen YX, Chuah CN, Jan PZ. Network configuration for optimal utilization efficiency of wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2008,6(1):92–107. [doi: 10.1016/j.adhoc.2006.09.001]
- [11] Olariu S, Stojmenovic I. Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM*. 2006. 1–12. [doi: 10.1109/INFOCOM.2006.296]
- [12] Wu XB, Chen GH, Das SK. Avoiding energy holes in wireless sensor networks with nonuniform node distribution. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2008,19(5):710–720. [doi: 10.1109/TPDS.2007.70770]
- [13] Lian J, Chen L, Naik K, Otzu T, Agnew G. Modeling and enhancing the data capacity of wireless sensor networks. In: Phoha S, La Porta TF, Griffin C, eds. *Proc. of the IEEE Monograph on Sensor Network Operations*. Washington: IEEE Press, 2004. 91–183.
- [14] Li CF, Chen GH, Ye M, Wu J. An uneven cluster-based routing protocol for wireless sensor networks. *Chinese Journal of Computers*, 2007,30(1):27–36 (in Chinese with English abstract).
- [15] Liu AF, Wu XY, Chen ZG, Gui WH. Research on the energy hole problem based on unequal cluster-radius for wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2010,33(3):302–32. [doi: 10.1016/j.comcom.2009.09.008]
- [16] Varga A. The OMNET++ discrete event simulation system. Version 3.3. <http://www.omnetpp.org>

附中文参考文献:

- [9] 杨文国,郭田德,赵彤.异构监测传感器网络寿命最大化模型及其求解. *计算机学报*,2007,30(4):532–538.
- [14] 李成法,陈贵海,叶懋,吴杰.一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议. *计算机学报*,2007,30(1):27–36.



刘安丰(1971—),男,湖南汉寿人,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为无线网络,服务计算.



曾志文(1968—),男,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络,分布式计算.



任炬(1987—),男,硕士生,CCF 学生会会员,主要研究领域为无线传感器网络.



陈志刚(1964—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为无线网络,分布式计算.



徐娟(1981—),女,硕士,主要研究领域为无线传感器网络.

www.jos.org.cn

www.jos.org.cn