

单位代码: 10293 密 级: 公开

南京邮电大学

硕士学位论文



论文题目: WSN 中改进的 EEUC 路由协议研究

学 号	<u>1010010525</u>
姓 名	<u>王燕</u>
导 师	<u>唐加山 教授</u>
学 科 专 业	<u>信号与信息处理</u>
研 究 方 向	<u>现代通信中的智能信号处理技术</u>
申请学位类别	<u>工学硕士</u>
论文提交日期	<u>二〇一三年三月</u>

Research on an Improved EEUC Routing Protocol for WSN

Thesis Submitted to Nanjing University of Posts and
Telecommunications for the Degree of
Master of Engineering



By

Wang Yan

Supervisor: Prof. Tang Jiashan

March 2013

南京邮电大学学位论文原创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京邮电大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

本人学位论文及涉及相关资料若有不实，愿意承担一切相关的法律责任。

研究生签名：_____ 日期：_____

南京邮电大学学位论文使用授权声明

本人授权南京邮电大学可以保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档；允许论文被查阅和借阅；可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索；可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编本学位论文。本文电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。论文的公布（包括刊登）授权南京邮电大学研究生院办理。

涉密学位论文在解密后适用本授权书。

研究生签名：_____ 导师签名：_____ 日期：_____

摘 要

无线传感器网络融合了多种技术，包括无线通信、传感、分布式计算和网络互联等多种技术，是一种全新的数据采集平台，在军用和民用等领域都具有巨大的应用空间。无线传感器网络的最大弱点是能量受限，而通信部分是消耗能量的主要部分，因此设计能量高效的路由协议可以延长网络生命周期。本文对无线传感器网络路由协议展开研究，主要工作内容如下：

(1) 介绍了路由协议的分类方法，并对 LEACH 协议与 EEUC 协议进行了仿真分析。

(2) 提出了一种改进的 EEUC 协议(I-EEUC 协议)，在新改进的协议中，我们借鉴 LEACH 协议中簇首选择策略对 EEUC 协议中候选簇首的选择进行改进，并且在选择下一跳簇首时综合考虑网络能量开销指标，下一跳节点剩余能量与下一跳节点簇内成员数目等因素。为了减少传输控制信息能耗且不降低网络能量使用的高效性，新协议采用每两次数据收集后重新构造簇。仿真结果表明，新改进的协议让节点轮流担任最终簇首，有效地均衡了网络中节点的能耗，延长网络的生命周期。

(3) 提出了能量消耗均衡的分簇协议(EBC 协议)，EBC 协议在第一轮中使用二次选举得出簇首，接下来让簇内剩余能量最多的成员担任下一轮的簇首。EBC 协议在路由建立过程中，使用单跳与多跳相结合的通信方式。仿真结果表明，EBC 协议使死亡节点均匀分布在网络中，并且与 LEACH 协议和 EEUC 协议相比，EBC 协议使网络中第一个节点死亡时间最晚。

关键词： 无线传感器网络，均匀分簇，非均匀分簇，路由协议

ABSTRACT

Wireless sensor networks (WSN) integrates varieties of technology including wireless communication technology, sensor technology, distributed computing technology and networking technology. It is a bran-new platform of data acquisition and has a great application future in the military, civil area and so on. The biggest weakness of WSN is that it has limited energy and communication is the major part of energy consumption, so the design of energy efficient routing protocol can prolong survival time of the network. This thesis focuses on routing protocols for WSN. The main work is as follows:

(1) This thesis introduces the classification of routing protocols, and analyses of LEACH protocol and EEUC protocol by simulating.

(2) An improved-EEUC (I-EEUC) is given in this thesis. The proposed routing protocol uses the strategy of selecting cluster heads in LEACH to improve uneven clustering routing protocol EEUC in selecting of tentative cluster heads and considers the network energy consumption index, residual energy of the next hop and the number of members in the next hop to establish multi-hop between cluster heads. In order to save energy in transferring control information and do not reduce using efficiency of the network energy, it reconstructs cluster after using each of two data collections. The simulation results show that the new routing protocol permits the nodes alternately served as the final cluster head, balances the energy consumption among nodes in the networks and achieves an extension on the networks lifetime effectively.

(3) Energy Balanced Clustering (EBC) is given in this thesis. The EBC protocol chooses the cluster head by two elections in the first round, and lets the members of cluster which have the largest residual energy as the cluster head in the next round. During the establishment of the route, it uses single hop and multi-hop for combination. The simulation results show that EBC lets the dead nodes distribute uniformly in the network, and it lets the first dead node die at latest than LEACH and EEUC.

Key words: wireless sensor networks, even clustering, uneven clustering, routing protocols

目 录

专用术语注释表	i
图表速查	ii
第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 无线传感器网络概述	2
1.2.1 发展历程	2
1.2.2 体系结构	3
1.2.3 网络特点	6
1.2.4 网络应用	6
1.3 本文的主要工作	8
1.4 本文的组织结构	9
第二章 无线传感器网络路由协议	10
2.1 路由协议考虑因素	10
2.2 路由协议分类	10
2.3 平面路由协议	11
2.4 层次路由协议	15
2.5 LEACH 与 EEUC 协议仿真分析	19
2.6 本章小结	21
第三章 I-EEUC 协议的设计与仿真	22
3.1 问题描述	22
3.2 I-EEUC 协议网络模型与通信能耗模型	22
3.2.1 网络模型	22
3.2.2 通信能耗模型	23
3.3 I-EEUC 协议簇的建立阶段	24
3.3.1 簇首的选举	24
3.3.2 簇的形成	26
3.4 I-EEUC 协议数据传输阶段	28
3.4.1 路由的建立	28
3.4.2 稳定的数据传输	29
3.5 消息复杂度分析	29
3.6 仿真实验与结果分析	30
3.6.1 仿真参数	30
3.6.2 簇的建立与路由的形成仿真	31
3.6.3 簇首能耗仿真分析	34
3.6.4 担任簇首次数分布	35
3.6.5 节点剩余能量分布	36
3.6.6 网络剩余能量	37
3.6.7 网络生命周期及能量效率	38
3.7 本章小结	39
第四章 EBC 协议的设计与仿真	40
4.1 问题描述	40
4.2 EBC 协议的设计	40
4.2.1 簇首的选举与簇内路由的建立	40
4.2.2 数据传输阶段	41

4.3 仿真实验与结果分析.....42

4.3.1 死亡节点分布.....42

4.3.2 网络剩余能量.....44

4.3.3 网络生命周期及能量效率.....44

4.4 本章小结.....45

第五章 总结与展望.....46

5.1 总结.....46

5.2 展望.....47

参考文献.....48

附录 1 攻读硕士学位期间撰写的论文.....50

致谢.....51

专用术语注释表

缩略词说明:

缩略语	全称	中文对应翻译	页码
CHLBC	Cluster Head Load Balanced Clustering	簇头负载均衡的分簇协议	19
CSMA	Carrier-Sense Multiple Access	非持续性载波侦听多路访问	27
DD	Directed Diffusion	定向扩散协议	12
EBC	Energy Balanced Clustering	能量消耗均衡的分簇协议	40
EERPUC	Energy Efficient Routing Protocol on Uneven Cluster	基于非均匀分簇的低能耗路由协议	19
EEUC	Energy-Efficient Uneven Clustering	能量高效的非均匀分簇协议	1
HDF-EEUC	Highly Data Fusion Unequal Clustering-EEUC	高数据融合的非均匀分簇 EEUC 协议	19
I-EEUC	Improved-EEUC	改进的 EEUC 协议	21
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy	低能耗自适应分簇协议	1
MAC	Medium Access Control	媒体访问控制协议	3
PEGASIS	Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems	高能效采集传感器信息系统协议	16
SPIN	Sensor Protocol for Information via Negotiation	基于协商机制的传感器网络协议	11
TDMA	Time Division Multiple Access	时分多址	27
ULCR	Unequal Level-Based Clustering Routing Algorithm	非均匀层次分簇路由算法	19
WSN	Wireless Sensor Networks	无线传感器网络	1

图表速查

图形速查:

图 1.1	无线传感器网络发展历程	2
图 1.2	传感器节点结构	3
图 1.3	传感器节点能耗分布	4
图 1.4	无线传感器网络结构	4
图 1.5	无线传感器网络协议模型	5
图 2.1	Flooding 信息爆炸现象	12
图 2.2	Flooding 信息重叠现象	12
图 2.3	SPIN 路由建立与数据传输	13
图 2.4	DD 协议路由的建立	14
图 2.5	LEACH 协议算法流程图	16
图 2.6	PEGASIS 协议数据传输链的形成	17
图 2.7	LEACH 协议网络拓扑结构图	20
图 2.8	EEUC 协议网络拓扑结构图	20
图 2.9	LEACH 与 EEUC 网络生命周期	21
图 3.1	第一顺序无线电模型	23
图 3.2	I-EEUC 协议簇首选举流程图	27
图 3.3	第一个节点死亡时间随 p 变化	31
图 3.4	传感器节点分布图	32
图 3.5	最终簇首分布图	32
图 3.6	簇的形成分布图	33
图 3.7	簇间路由的形成图	33
图 3.8	簇首消耗的能量之和	34
图 3.9	簇首消耗的能量方差	35
图 3.10	I-EEUC 协议中第一个节点死亡时所有节点担任簇首次数	36
图 3.11	I-EEUC 协议第 250 轮节点剩余能量	37
图 3.12	I-EEUC 协议网络剩余能量	38
图 3.13	I-EEUC 协议网络生命周期	39
图 4.1	LEACH 协议死亡节点分布	42
图 4.2	EEUC 协议死亡节点分布	43
图 4.3	EBC 协议死亡节点分布	43
图 4.4	EBC 协议网络剩余能量	44
图 4.5	EBC 协议网络生命周期	45

表格速查:

表 2.1	实验参数	30
-------	------	----

第一章 绪论

1.1 研究背景

无线传感器网络^[2,42](Wireless Sensor Networks, 简称为 WSN)是一种新兴的无线自组织网络,它涉及了多种高新技术,包括传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及通信技术和信号处理等多项关键技术^[13,37]。它是一个由分散在不同地理位置上分布较密集的大量传感器节点组成的网络系统,由于其在军事、农业、抢险救灾、城市交通管理等多种领域内应用前景的广阔^[8],使它成为 21 世纪最重要的技术之一^[7]。

近年来,由于传感器节点逐渐集成化和微型化,其大多采用能量受限的电池作为供电单元。并且传感器节点通常被部署在人类难以接近的特殊或危险的环境中,很难对它们进行能源的二次补给。与此同时,可再生能源技术目前还尚未达到成熟。因此,最大可能地延长网络生命周期已经成为无线传感器网络路由协议设计时主要的考虑因素^[37]。为了达到延长网络生命周期这个目的,在路由协议设计过程中不仅要考虑高效地利用节点能量,提高单个节点能量利用率,还要尽量使整个网络中能量消耗均衡,避免出现“热区”问题。而传统无线网络如 Ad Hoc 其首先考虑的因素是如何提高服务质量和如何公平高效的利用网络带宽,它们的技术要求与无线传感器网络不同,因此适用于传统无线网络的路由协议并不适于无线传感器网络。由于无线传感器网络路由协议具有应用相关性,在对其进行设计时应联系实际应用环境,针对特定的应用环境设计出特定的路由协议。

随着国内外对无线传感器网络路由协议的深入研究,人们已经提出了多种路由协议^[1]。已有的路由协议按节点参与通信的方式主要可以分为两个类型,即平面路由协议和层次路由协议。与平面路由协议相比,应用层次路由协议的网络具有很好的规模可扩展性、能量利用率和通信效率高。鉴于上述原因,层次路由协议设计思想已经成为无线传感器网络路由协议主流思想。在设计路由协议时,要综合考虑单个节点和整个网络的能量消耗,以得到一个符合应用需求、网络中所有节点能量消耗均衡,生命周期足够长的路由协议。

综上所述,设计高能效、能量消耗均衡的路由协议具有非常重要的意义与价值。本文对已有的部分平面路由协议进行简单分析,研究了典型分层路由协议,重点研究低能耗自适应分簇路由协议(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy 简称 LEACH)^[19]与能量高效的非均匀分簇 (Energy-Efficient Uneven Clustering, 简称 EEUC)^[27] 协议,在此基础上对现有路由协议中存在的不足进行改进,得到了两种新的能量高效的路由协议。

1.2 无线传感器网络概述

1.2.1 无线传感器网络发展历程

我们的生活环境由于各类科学技术的不断发展而发生了巨大的改变，生活质量有了很大程度的提高。在各类科学技术发展中，信息技术的影响尤其突出，其重要性也越来越显著，信息技术被广泛应用于我们的日常生活中，使得人们置身于信息时代。

在各类信息技术中，作为获取信息最重要的传感器技术得到了很大的发展。在一些新兴概念中，如物联网和智慧地球等，传感器技术担任了基础技术角色，并发挥着举足轻重的作用。过去人们获得信息的方式比较单一，传感器技术的发展改变了这种现象。获取信息的方式逐渐变得集成化、微型化与网络化，这种变化对无线传感器网络的发展产生了巨大的推动作用。

无线传感器网络从诞生以来经历了一个长期的发展过程，到目前为止它已经历了四个发展阶段^[46]。第一个发展阶段为 20 世纪 70 年代，出现以利用点对点传输技术和连接控制器将传感器连接起来为特征的传感器网络雏形；第二个发展阶段为 20 世纪 80 年代至 90 年代，该阶段特征为传感器网络已经具备了综合与处理信息的能力，节点与传感控制器之间的连接采用的是串/并接口；第三个发展阶段为 20 世纪 90 年代后期至 21 世纪初，传感器变得智能化，它能智能地采集多种类型信号，与传感控制器连接采用现场总线型连接方式；第四个发展阶段为 21 世纪，发展成为无线传感器网络，其特征是采用无线技术连接传感器，并且传感器具有多功能多信息信号获取能力。无线传感器网络发展历程如图 1.1 所示。

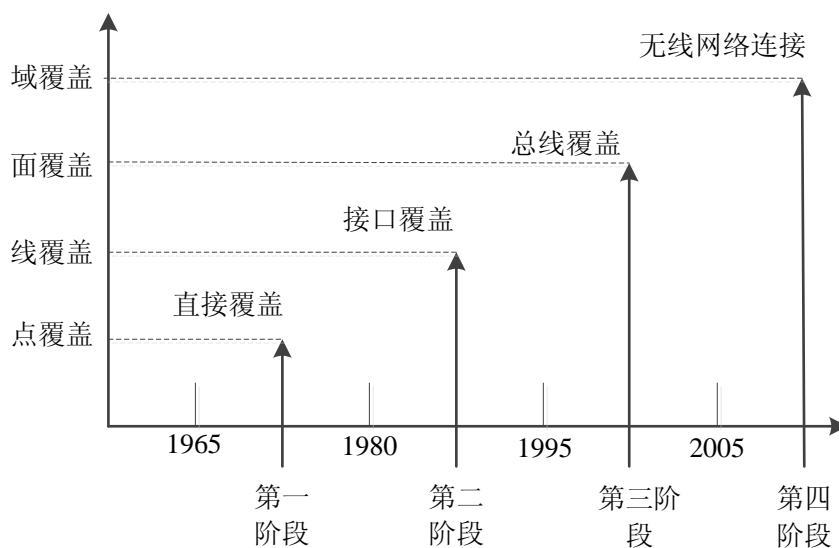


图 1.1 无线传感器网络发展历程^[9]

1.2.2 无线传感器网络体系结构

1. 传感器节点的结构

由于无线传感器网络是一个由分散在不同地理位置上分布较密集的大量传感器节点组成的网络系统，因此传感器节点是组成它的基本单元。传感器节点主要负责对监测区域数据的采集，并按一定规则完成对数据的传输。它在网络中起着关键性作用，因此节点技术的进步将直接影响无线传感器网络的发展。如图 1.2 所示^[40]，传感器节点由传感单元、处理单元、通信单元和电源部分组成。

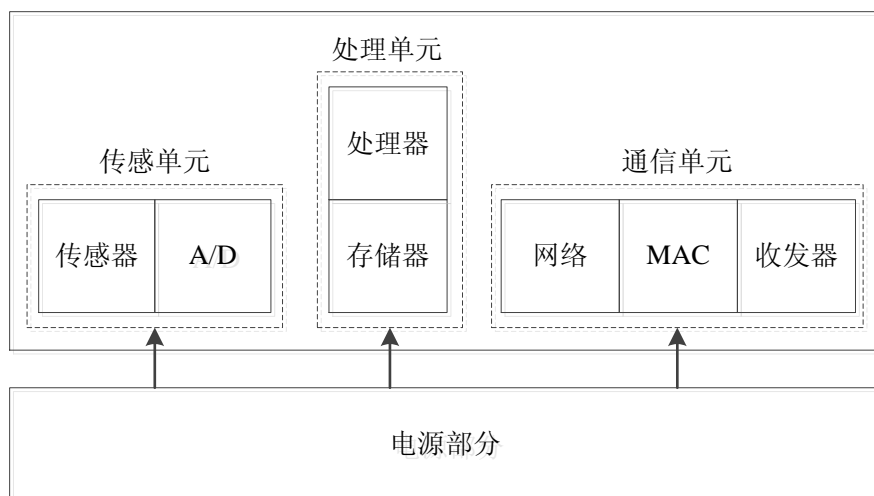


图 1.2 传感器节点结构^[40]

在网络中对监测区域数据的采集任务由传感单元中的传感器完成，传感单元中的模数转换功能模块主要负责数据类型的转换；处理单元包括处理器和存储器，它主要负责对采集到的数据和接收到的其他节点发送来的数据进行处理与存储，同时它还负责运行高层的网络协议；通信单元由网络、控制协议(Medium Access Control, 简称为 MAC)、收发器组成，完成数据的收发功能；电源部分为传感器节点提供能量，是影响节点寿命的关键因素。传感器节点携带能量有限的供电电池，它的处理能力、存储能力以及通信能力比较弱。

由图 1.2 可以看出，传感器节点的能量消耗主要来自传感、数据处理、通信三部分，其中通信部分有 4 种状态（发送、接收、空闲和睡眠状态）。典型的能量消耗分布如图 1.3 所示^[40]，从图中可以看出通信部分将消耗电源大部分能量^[12]。传感器节点处于空闲状态时，它将对无线信道的使用情况监听的同时监测是否有数据发送给自己。由图 1.3 可知，为了减少传感器节点能量消耗，在节点不需要工作时，尽量让其处在睡眠状态，此时它将节点关闭通信部分消耗能量较少。已有研究表明：将大小为 1 比特数据包发送 100 米远所消耗的能量大约相当于执行 3000 条指令所消耗的能量^[33]。通信单元和处理单元的功耗比通常高约在

1000 倍以上^[23]，因此采用高效的通信协议是降低无线传感器网络整体能耗，延长网络生命周期的关键。

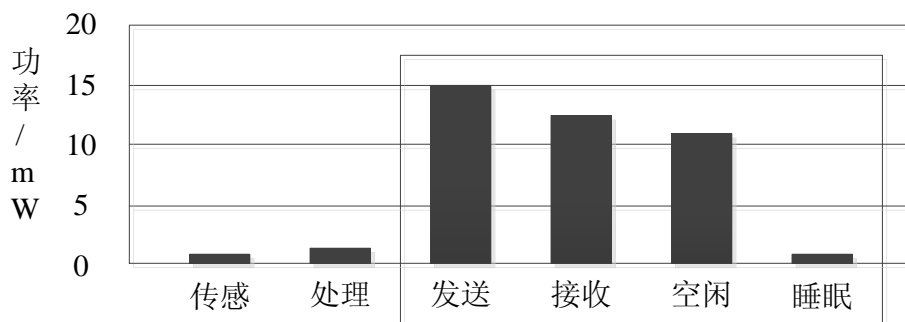


图 1.3 传感器节点能耗分布^[40]

2. 无线传感器网络结构

如图 1.4 所示，无线传感器网络主要有传感器节点、汇聚节点、目标、监测区域四种基本对象组成^[38]。无线传感器网络若要与外界进行通信，还需要基站、外部传输网络、远程任务管理单元、用户、网关节点（一般汇聚节点同时又是网关节点）。大量传感器节点被人们随机部署在待监测的目标附近，传感器节点对目标的变化进行监测，采集关于目标的数据，然后对数据进行简单处理，采用多跳方式传给汇聚节点。汇聚节点通过单跳链接或由无线网络节点组成的传输网络，将数据发送给基站，基站再通过因特网或卫星通信链路等外部网络，把数据传输给远程数据库，最后将经过处理后的数据提供给用户。同时用户也可以借助汇聚节点向传感器网络中各节点发布控制命令和查询请求^[34]。

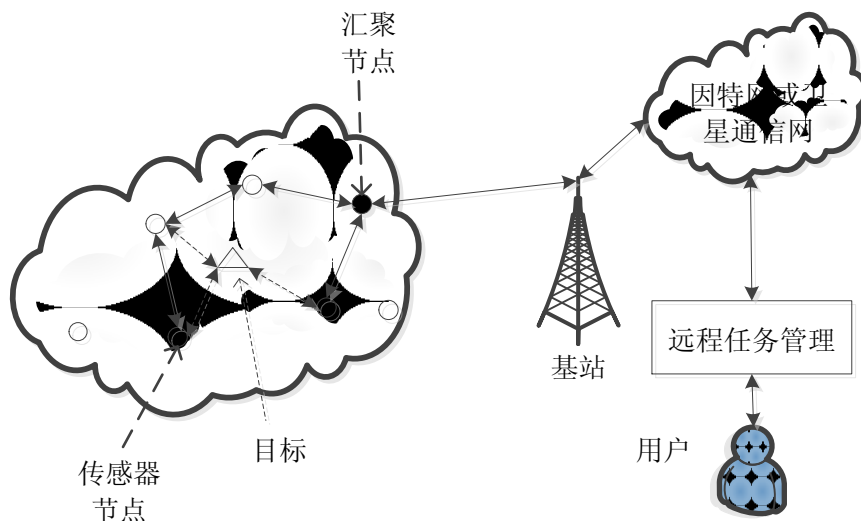


图 1.4 无线传感器网络结构

3. 无线传感器网络协议栈

无线传感器网络协议的结构模型参考了通用网络的 TCP/IP 模型和 OSI 模型^[6]，既包括了应用层、传输层、网络层、数据链路层和物理层等 5 个层，又包含了无线传感器网络特有的

3 个管理平面，即能量管理平面、移动性管理平面和任务管理平面。其整个模型主要包括 8 个部分，如图 1.5 所示^[38]。

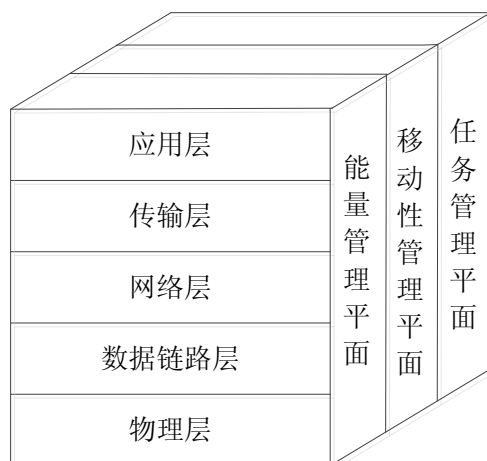


图 1.5 无线传感器网络协议模型^[38]

物理层位于无线传感器网络协议栈最下层，它负责统一数据传输的介质、规定工作频段、调制数据后进行发送与接收、信号编码、信号的调制解调和载波频率的产生等工作。数据传输的载波媒体有无线电波、激光和红外线等（以无线电波为主）。物理层以将传感器节点设计成低成本、低功耗和小体积节点为研究目标。

数据链路层除了负责数据成帧、媒体访问、帧检测和差错校验外，其主要任务是设计一个媒体访问控制协议来适应无线传感器网络。在无线传感器网络中由于传输介质不可靠，对 MAC 协议设计时要使其适应这样特征，并且 MAC 协议要充分利用休眠机制以提高节点的能量利用效率。

网络层最核心的内容是路由协议，路由协议用于监控无线传感器网络拓扑结构的变化，进行节点位置定位，路由的产生、路由的维护和路由的选择以及传感器节点间路由信息的交换。按最常见的分类方法，无线传感器网络路由协议被分为平面路由协议和层次路由协议。

传输层上主要有 TCP 和 UDP 两种协议，它主要负责将网络中采集到的数据传送给外部网络，由于无线传感器网络内部是以数据为基础寻址的，因此传感器网络要想与外界通信必须使用网关进行数据格式转换，将寻址方式转换为以 IP 地址为基础。对传输层的研究主要集中在差错控制、流量控制与线路管理等技术上。

位于无线传感器网络协议栈最上层的是应用层，它主要负责获取数据，并对获取的数据做简单加工，设计它时需要考虑具体环境下的要求，根据不同要求设计与之相应的应用层。

协议栈中的能量管理平面、移动性管理平面和任务管理平面都通过配置接口对相应机制进行配置和监控，它们的功能体现在协议栈的每个层次中。无线传感器网络提供的多种应用支撑服务都是通过数据传输信道实现的，反过来它又为协议栈中的五个层次提供信息支持。

1.2.3 无线传感器网络特点

无线传感器网络与传统无线网络有明显区别，主要表现在以下两点：第一点，传统无线网络在高度移动的环境中通过一系列措施实现带宽利用率的最大化，其首要设计目的是提供高性能的服务质量。而无线传感器网络中节点移动性低，且一般部署在人类难以接近的远程环境中，能源难以补充，因此均衡网络节点能量消耗，延长网络生命周期是网络设计的首要目的；第二点，它们有明显不同的技术要求，无线传感器网络以数据为中心，传统无线网络以传输数据为目的。传统无线网络仅要求中间节点负责数据的采集和传输，而无线传感器网络除了要求中间节点能采集和传输数据外，还要求它有一定数据融合能力^[25]。无线传感器网络与传统无线网络相比具有以下独特的特性^[38]：

(1) 节点资源有限。主要体现在计算能力和节点能量上，由于受价格、体积和功耗限制。与计算机相比，节点的计算能力较弱，内存与程序空间较小，这就决定了适用于节点的协议层次要相对简单。节点能量难以补充，使得传感器节点和网络寿命受到很大限制。

(2) 节点密度高。在无线传感器网络中要求大量节点分布得较密，以此来增强传感器网络的生存能力和可用性。由于节点众多，其相应的感知数据量非常巨大，这要求传感器网络的软件与硬件都要有较高的健壮性和容错性。

(3) 网络拓扑变化频繁。由于传感器节点的移动或能量耗尽，造成节点出现故障或失效。正常工作的节点由于外界环境干扰也可能出现通信链路带宽的改变。与此同时，被监测的目标和观察者在某些情况下也会产生移动。以上这些因素都会导致网络拓扑的变化，所以无线传感器网络拓扑变化是无法避免的。

(4) 以数据为中心寻址。在无线传感器网络的应用中，对于从监测区域获得的数据，人们不关心数据来自哪个节点，只关心数据本身。

(5) 网络的分布式特性。在整个网络中，所有节点地位一般都是平等的，并且网络中没有控制中心，是一个对等式网络。

(6) 多跳路由通信。传感器节点通信距离一般在几百米范围内甚至更小，因此在它们之间需要形成多跳路径来传输网络信息。

1.2.4 无线传感器网络应用

无线传感器网络具有巨大的应用价值，它在很多领域已经得到了广泛的应用。目前它的主要应用领域可以分为以下几种：军事领域、城市交通管理领域、环境领域、医疗领域等^[38]，

以下对无线传感器网络在这些领域的应用做简单介绍。

1. 军事领域

人们在军事领域最早的开始了无线传感器网络的研究，实验系统既有用于海洋声纳监测的大规模网络，也有用于监测地面物体的小型网络。目前在无线传感器网络的应用中，主要采用飞机撒播和特种炮弹发射等手段，将大量廉价的传感器节点密集地部署于人类难以到达的监测区域，如敌方阵地，用来采集有用的微观数据。无线传感器网络要求在一部分传感器节点失效情况下，整个网络仍能完成监测任务。

无线传感器网络由众多分布密集的节点组成，其具有极高的自组织性、高容错能力、隐蔽性、低成本等特点，不会由于一部分节点因为自身或外界原因失效而影响到全网络工作，从这一点上可以体现出无线传感器网络与传统的传感器网络相比的优势。因为其以上的优势，使得它非常适用于恶劣的战场环境，主要包括以下一些应用：完成战场、人员，装备等实时监控、目标定位、敌军进攻监测、战果评估等^[20]。无线传感器网络与传统卫星和地面雷达系统相比，它的信噪比高、容错能力强、数据准确而全面、监测区域广、可消除盲区。

2. 城市交通管理领域

随着社会生活中汽车数量的急剧增加，交通突发事件频繁发生，给人们生命安全与交通安全的管理带来挑战。交通突发事件是破坏正常交通秩序、引起交通拥挤及堵塞的主要因素。必须通过交通突发事件的应急管理来有效的减少突发事件危害、降低突发事件损失、提高道路运行效率。

在很多国家交通阻塞已严重阻碍了国民经济的发展，因此解决交通问题刻不容缓。目前交通传感系统主要由录像、雷达、声纳等成本太高、投资太大的电子设备组成，所以其应用范围受到了很大的限制。而采用由造价极低的无线传感器组成的无线传感器网络可以极大的降低投资，而且非常便利。传感器节点既可以测量车速，又可以检测路况等信息，从效益投资比来看，无线传感器网络比传统感应系统更有商业价值。在交通管理方面典型的应用有智能交通系统和智能公交系统。

3. 环境领域

随着人们对环境的逐渐关注，需要采集的环境数据也越来越多，无线传感器网络为获取环境数据提供了便利。通过传统方式采集环境数据既费时又费力，而且容易给环境带来侵入性破坏，无线传感器网络具有部署简单、成本低以及无需现场维护的等优点，因此被广泛应用于环境数据的采集，如跟踪候鸟和昆虫等鸟类的迁徙、大气、地理和海洋等的监视，土壤的成分，农作物的灌溉情况以及环境变化对农作物的影响等^[4]。

无线传感器网络在精细农业上也有很大的应用潜力，如在葡萄园上的应用。葡萄的质量

会受到气候细微变化的影响,从而影响葡萄酒的品质。科学家将传感器节点部署在葡萄园里,用来对葡萄生长过程中环境的细微变化进行长期检测。科学家通过综合与分析检测到的数据,可以得到葡萄的质量与日照、湿度、温度等环境变化的关系,以便控制环境的变化,提高葡萄的质量。

4. 医疗领域

无线传感器网络在医疗领域也发挥着积极的作用,目前国内外已经有多家组织研发出使用传感器网络技术的初级产品。在国外,Intel 公司研究了在患者家中部署传感器网络,用来对患者生理数据进行实时监测,实现了远程监测与护理。哈佛大学与波士顿医疗中心研究了无线传感器网络在医疗中的应用,包括入院前后的紧急治疗、灾难发生时的及时响应、中风病人的康复等。在国内,中科院计算机研究所 WSN 实验室和中兴软件公司、南京邮电大学、深圳微智系统等都在开展无线传感器网络在医疗领域应用的项目研究。

在医疗领域的很多方面显示了它的潜能,如对患者的持续护理、药物分析、肿瘤监测、医疗记录的安全共享、医疗设备的追踪以及不间断地改善数据显示和通信等^[45]。

1.3 本文的主要工作

本文集中于对无线传感器网络路由协议的研究,在深入分析了 LEACH 协议与 EEUC 协议后,做了如下工作:

(1) 详细介绍了路由协议的分类方法以及一些常见的路由协议,并对 LEACH 协议与 EEUC 协议进行了仿真分析。

(2) 针对 EEUC 协议中存在的候选簇首选择未考虑当选最终簇首次数、下一跳簇首选择主要考虑网络能量开销指标和频繁构造簇浪费能量等问题,提出了一种改进的 EEUC 协议(I-EEUC 协议)。在新改进的协议中,我们借鉴 LEACH 协议中簇首选择策略对 EEUC 协议中候选簇首的选择进行改进,并且在选择下一跳簇首时综合考虑网络能量开销指标,下一跳节点剩余能量与下一跳节点簇内成员数目等因素。为了减少传输控制信息能耗且不降低网络能量使用的高效性,新协议采用每两次数据收集后重新构造簇。通过仿真对 I-EEUC 协议与 LEACH 协议和 EEUC 协议进行性能比较。

(3) 针对 LEACH 协议和 EEUC 协议中死亡节点分布不均问题,提出能量消耗均衡的分簇协议(EBC 协议)。EBC 协议在第一轮中使用二次选举得出簇首,接下来让簇内剩余能量最多的成员担任下一轮的簇首。EBC 协议在路由建立过程中,使用单跳与多跳相结合的通信方式。通过仿真对 EBC 协议与 LEACH 协议和 EEUC 协议中死亡节点分布进行比较。

1.4 本文的组织结构

根据作者的研究内容，本文的章节结构安排如下：

第一章：介绍了本文的研究背景，对无线传感器网络进行简单介绍，最后对本人所作的相关工作和行文的章节安排进行了说明。

第二章：分析了无线传感器网络路由协议设计时所需考虑的因素，介绍了路由协议分类规则与典型的路由协议，最后对 LEACH 协议与 EEUC 协议进行仿真分析。

第三章：提出 I-EEUC 协议，对 I-EEUC 协议簇首的选举、簇的形成、路由的建立进行详细描述。I-EEUC 协议让节点轮流担任簇首，并且在选择下一跳簇首时综合考虑网络能量开销指标，下一跳节点剩余能量与下一跳节点簇内成员数目等因素。最后通过仿真对 I-EEUC 协议与 LEACH 协议和 EEUC 协议进行性能比较。

第四章：为了解决“热区”问题，提出 EBC 协议，它首先采用二次选举法产生簇首，然后让簇内剩余能量最大的节点担任下一轮簇首，以此来减少用于选择簇首的能耗。EBC 协议在路由建立过程中，使用单跳与多跳相结合的通信方式，来均衡节点间能耗。最后通过仿真验证了 EBC 协议较好地解决了“热区”问题。

第五章：总结与展望。本章对全文工作进行总结，并指出了该课题需要进一步改进的地方。

第二章 无线传感器网络路由协议

2.1 路由协议考虑因素

无线传感器网络路由协议设计是无线传感器网络的核心技术之一^[35]。它的任务是按既定路径将数据传输到目的地，此过程主要包括确定优化路径过程，和保证数据沿着既定路径传输过程。路由协议设计时主要考虑的因素如下^[38]：

(1) 能量特征：能量消耗问题是无线传感器网络路由协议最根本的问题，这是由具有有限能量的节点决定的，所以在设计路由协议的时候必须尽可能节省节点能量，降低其能量消耗，而且尽量保证所有节点能量消耗均衡，以延长网络的生存时间。

(2) 网络拓扑特征：由于节点移动，节点能量耗尽或其他外在原因都会导致无线传感器网络拓扑发生变化。网络拓扑的变化会对建立好的路由产生影响，当网络拓扑发生变化时路由协议要尽快适应这种变化。

(3) 数据传输特征：无线传感器网络数据传输方式有时间驱动方式、事件驱动方式和查询驱动方式，使用时间驱动方式的网络经过一个固定时间传输一次数据，其数据量比较稳定，它是一种周期性数据传输方式。相对时间驱动方式，事件驱动方式和查询驱动方式的数据量则是动态变化的，一般要根据检测对象的变化或外界发出查询请求来进行数据的传输，它们的流量是突发和不确定的。无线传感器路由协议设计过程中除了要考虑数据传输方式外，还要充分利用数据融合技术以减少网络中传输的数据量。

2.2 路由协议分类

目前人们已经提出了很多种路由协议，不同类型的路由协议适合不同的应用环境，具有不同的性能评价指标。根据不同的应用环境和以下特定的标准对路由协议进行分类，主要存在以下几种分类方法^[38]。

1. 按节点获取路径的方法

(1) 主动路由协议：此协议要求网络中数据传输路径必须提前建立好，所有节点每隔一个固定时间后便发送当前新的路由信息，节点内部要设置路由表来存储接收到的路由信息。一旦网络拓扑结构有所变化，节点要向全网广播最新的路由信息，使得每个节点的路由表得到不断的更新。此类协议周期性地发送路由信息消耗了网络中较多的能量。

(2) 按需路由协议：此类协议与主动路由协议不同，它不必提前建立传输路径，在有数据需要发送时才建立传输路径，它并不一定需要知道全网的拓扑结构信息，只要知道它所需要的一部分就可以完成任务。路由的维护仅在传输过程中进行，传输结束后不需要再对其进行维护。此类协议在路由建立和维护上开销较小，但时延相对较大。

(3) 混合路由协议：此类协议综合利用了前两种协议，在网络的某些部分中如果拓扑结构变化不大且传输数据较多，可以采用主动路由协议，相反在拓扑结构变化比较快或传输数据较少的那部分网络中可以采用按需路由协议。

2. 按节点参与通信的方式

(1) 平面路由协议：网络中所有节点的地位是平等的，节点通过多跳的方式传送数据，离目标节点近的节点由于转发其他节点数据，会比远离目标节点的节点消耗能量快。

(2) 层次路由协议：它将网络中所有节点分为不同的簇，每个簇由簇首与簇内成员组成。簇内成员负责采集数据，并将数据发送给簇首，簇首负责收集、融合和发送簇内数据。与其他路由协议相比，层次路由协议能够很好地满足网络可扩展性，更好的利用融合技术，减少网络中数据量的发送，降低节点能量消耗，延长网络生命周期。但是簇首的负担相对于簇内成员节点重，能量消耗快，因此要让网络中所有节点轮流担任簇首角色以均衡节点能耗。

3. 按路由的发现过程

(1) 以位置信息为中心的路由协议：假设网络中所有节点位置为已知，按节点位置信息将网络划分为不同的域，数据的传输只在需要的局部区域之间进行，降低了网络能量消耗，实现延长网络的生命周期目的。

(2) 以数据为中心的路由协议：对网络中数据进行命名，基于数据查询并依赖于数据命名进行数据的传送。与其他路由协议的通信依赖特定节点不同，这种路由协议依赖于网络中的数据，且通信一般在局部区域进行，网络中冗余数据大量减少，延长了网络的生命周期。

2.3 平面路由协议

在平面路由协议中，没有特殊的节点，所有节点的地位都是平等的，网络中通信流量也是平均分布的，路由协议具有较好的鲁棒性，但缺乏可扩展性，网络的规模受到限制。研究人员已经提出了多种平面路由协议，以下对典型的平面路由协议进行简单介绍。

1. Flooding 和 Gossiping 协议

洪泛路由协议(Flooding Protocol)^[15,17]是一种最早的路由协议，数据分组在网络中以广播的方式在节点与其所有邻居节点间传输。源节点要发送数据给目的节点，源节点需要向其所

有邻居节点发送此数据。收到此数据的邻居节点以同样的方式向其所有邻居节点（除了刚给它发送数据的节点）转发此数据。数据分组按照上述方式在网络中传输，直到目标节点接收到数据或数据分组的生命期限变为零为止。

洪泛路由协议的优点是实现起来简单，具有很高的健壮性，其缺点是存在以下问题：信息爆炸问题、部分信息重叠问题、盲目使用资源问题。如图 2.1 所示，节点 i 发送数据分组给邻居节点 m 和 n 后，节点 m 和 n 也要向它们的邻居节点 j 发送此数据分组，如此下去网络中所有节点都可能收到此数据分组。对于一个数据分组传输来说，网络中数据量并不太大，但是如果同时有大量节点需要发送各自数据分组，将导致网络中数据量急剧增加，从而出现信息爆炸问题，浪费了节点有限的能量和存储空间等宝贵资源。图 2.2 中，节点 i 采集区域 q 中的数据，节点 j 采集区域 p 中的数据，节点 i 与 j 将采集到的数据发送给目标节点 k ，则 k 收到区域 r 重复的信息，导致了信息的重叠，浪费了网络资源。

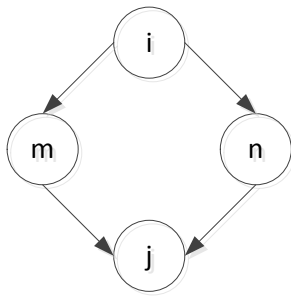


图 2.1 Flooding 信息爆炸现象

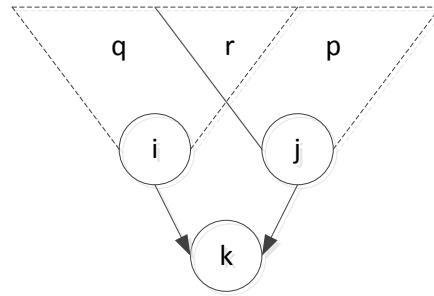


图 2.2 Flooding 信息重叠现象

闲聊路由协议(Gossiping Protocol)是对洪泛路由协议的改进，与洪泛路由协议不同，为了减少资源的浪费，节点转发数据分组时从所有邻居节点中随机选择一个进行数据分组的传输，收到数据分组的节点按照相同的方法继续向它的邻居节点传下去，直到到达目的地。当一个节点再次收到同一个数据分组时，它将不再广播此分组，而是将分组向发送给它的节点传回。

闲聊路由协议虽然避免了洪泛路由协议中出现的消息爆炸问题，但是它还存在部分信息重叠问题和盲目使用资源问题。在中间节点转发数据时由于采用随机选择接收节点，可能导致数据沿着与目的节点相反方向传输，传输平均时延被拉长，传输速度变慢，浪费了网络能量。

2. SPIN 协议

基于协商机制的传感器网络协议(Sensor Protocol for Information via Negotiation 简称 SPIN)^[26]是由 Heinzelman W 等人提出的，它是一种以数据为中心的自适应通信方式。为了能够很好地解决传统的 Flooding 协议和 Gossiping 协议中出现的消息爆炸、部分信息重叠和盲目使用资源问题，SPIN 协议采用基于数据描述的协商机制和能量自适应机制。

SPIN 协议在通信过程中采用 3 种类型的数据包，分别为 ADV、REQ 和 DATA 数据包。传感器节点在发送 DATA 数据包前，先广播对 DATA 数据进行描述的 ADV 信息，收到 ADV 信息的邻居节点，如果需要该 DATA 数据包，则向源节点传送 REQ 请求数据包。源节点收到 REQ 请求数据包后，向需要的邻居节点发送 DATA 数据包。如图 2.3(a)，信息源首先向所有邻居节点广播 ADV 信息；如图 2.3(b)，收到 ADV 信息的节点如果对此信息感兴趣，则向信息源发送 REQ 请求；最后信息源根据收到的请求，有选择地将 DATA 数据包发送出去，如图 2.3(c)所示。

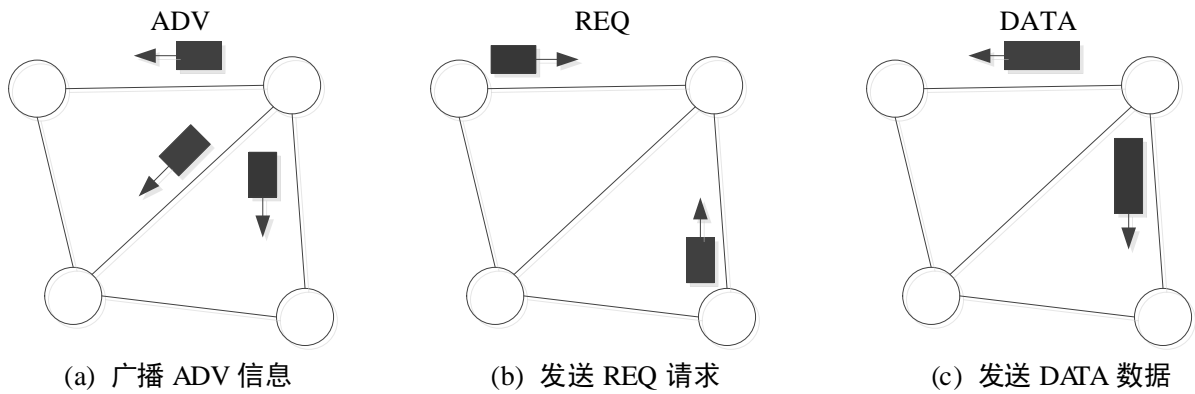


图 2.3 SPIN 路由建立与数据传输

与传统的 Flooding 协议和 Gossiping 协议相比，SPIN 协议虽然很好地解决了信息爆炸、部分信息重叠和盲目使用资源问题。它也存在的缺点，当源节点的邻居节点都对 DATA 数据包不感兴趣时，离源节点较远的节点即使需要获取该 DATA 数据信息，它也无法获取。

3. DD 协议

定向扩散 (Directed Diffusion 简称 DD)^[22]协议的实现机制与以上介绍的路由协议不同，该路由协议是基于查询并以数据为中心的，具有很好的节能和可扩展特性。定向扩散路由协议以周期划分网络工作过程，每个周期由兴趣的扩散、梯度建立、数据传输、路径加强等阶段组成，如图 2.4 所示。

运行 DD 协议的汇聚点通过传播兴趣消息发出查询请求，兴趣消息是基于属性命名机制对数据的一种描述。兴趣消息中有任务类型、时间区域、时间戳、数据发送速率等参数。汇聚点通过洪泛方式广播兴趣消息给整个网络或部分对其感兴趣的网络内的所有节点。网络中每个节点保存一个兴趣列表，用来记录发送兴趣消息的节点与每个兴趣消息的相关任务等信息。当兴趣消息在整个网络中扩散后，每个节点根据保存的兴趣列表建立其到汇聚点的梯度关系，节点将采集到的与兴趣相匹配的数据沿着梯度进行传送。汇聚点收到从源节点发来的数据后，启动建立汇聚点到源节点的加强路径，以后整个周期内网络中数据都将沿着加强路径以较高的数据速率进行传送。

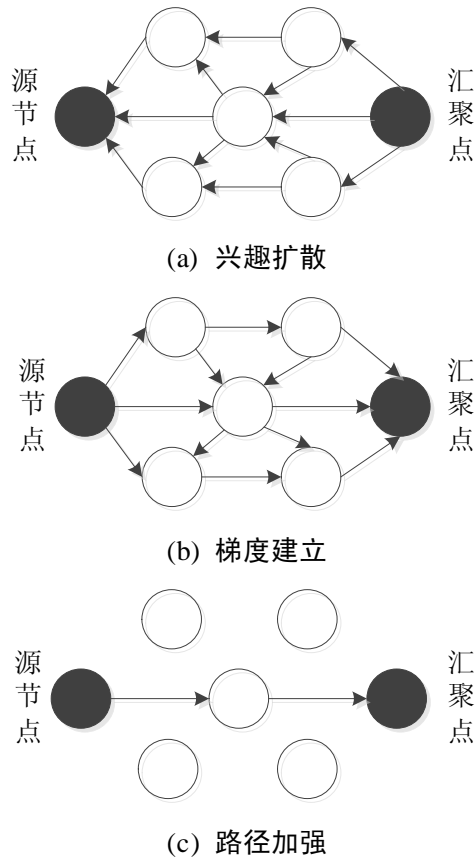


图 2.4 DD 协议路由的建立

无线传感器网络中节点会由于多种原因导致其失效，并且网络的拓扑结构也会随时发生变化。DD 协议为了适应这些变化需要周期性的重新建立路由。在路由建立过程中由于需要一个扩散的洪泛传播，使得 DD 协议在路由建立过程中能量和时间开销比较大。DD 协议和 SPIN 协议都是以数据为中心的路由协议，它们有以下两点不同^[40]：

(1) DD 协议是基于查询驱动的路由协议。汇聚点如果想获取监测区域内的信息，它必须通过洪泛方式将需求信息扩散到感兴趣的监测区域内，但是在 SPIN 协议中，源节点采用主动方式将采集到的信息发送给其它节点，最终转发至汇聚点。

(2) DD 协议中汇聚点需要维护全网拓扑结构，DD 协议利用数据融合技术来减少网络中数据的传输量，但是在 SPIN 协议中节点只需要知道它的邻居节点信息，拓扑结构具有局部性，并且中间节点仅简单转发数据，不进行其他处理。

4. Rumor 协议

由于 DD 协议在路由建立过程中有一个洪泛的传播过程，所以路由建立过程消耗的能量较多，占用的时间较长。基于以上原因 DD 协议不适合应用于数据传输量很少的无线传感器网络。为了解决此问题，人们提出了谣言路由协议(Rumor)^[5]，该协议利用了欧氏平面上任意两条曲线交叉的概率很大的思想。在无线传感器网络中，当节点监测到事件后，它创建一个生命周期较长的数据包，称为 Agent 的数据包，数据包中含有事件和源节点信息。然后节点

随机地选择一条或多条路径将 Agent 发送出去, 接收到此数据包的节点将建立反向传输路径, 同时融合自身已知信息后按同样的方法把更新后的数据包发送出去。当由汇聚点发送出的查询信息与源节点发出的 Agent 数据包相遇时, 则路由建立成功, 如果这两条路径不交叉, 汇聚点将按洪泛方式发送查询请求。

Rumor 协议在发生事件比较少, 查询请求数目较多的传感器网络中的应用能够取得理想的效果。但是 Rumor 协议不适用于发生事件较多的网络, 因为维护事件表和收发 Agent 使其在能量和空间上开销较大。使用 Rumor 协议不一定能得到最优的路径, 甚至会出现环路使数据无法到达汇聚点。

2.4 层次路由协议

应用层次路由协议的网络被划分为多个簇群, 每个簇群由至少一个成员节点组成, 形成高一级网络。在高一级网络中, 同样可以再划分簇群, 形成更高一级网络, 直到形成最高级网络。在层次路由协议中簇首除了负责收集和发送簇内数据外, 还要转发其它簇群的数据。层次路由协议与平面路由协议相比, 具有很多优点^[3,29,40]:

1. LEACH 协议

LEACH 协议^[19]是由 Heinzelman 和 Chandrakasan 等人在 2002 年为无线传感器网络提出的, 它是最先提出的分层无线传感器网络路由算法。LEACH 协议成为分层路由协议的典型, 为后来学者提出的大部分分层路由协议提供了一种设计思想。

LEACH 协议不需要集中管理控制, 它采用分布式成簇思想, 簇首由传感器节点自发的选举产生。LEACH 协议将网络工作过程划分为轮, 每轮由簇的建立阶段和稳定的数据传输阶段组成。簇的建立阶段又可划分为簇首的选举阶段和簇的形成阶段。此阶段详细过程为: 在第 r 轮开始时, 传感器节点生成一个 0~1 之间的随机数 t , 拿 t 与 $T(n)$ 进行比较, 若小于 $T(n)$, 那么当选为本轮簇首并向其它节点广播自己成为簇首的消息, $T(n)$ 计算见公式(2.1):

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p(r \bmod \frac{1}{p})}, & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (2.1)$$

其中, p 为簇首在所有节点中所占的百分数, r 为当前网络所进行的轮数, n 为传感器节点标识, G 是在过去前 $r \bmod(1/p)$ 轮中未成为簇首的节点集合。

由公式(2.1)可以看出, 网络每经过一轮, 当选过簇首的节点通过将自己的当选过簇首标

志置 1，使其阈值为 0，不参与下一轮簇首的竞争。 $1/p$ 轮后，所有节点将当选过簇首标志清零，按式(2.1)计算自己的阈值，重新获得竞争簇首的权力。没有担任过簇首的节点在下一轮簇首选举中，随着 $r \bmod(1/p)$ 的增加，它的阈值 $T(n)$ 将会增加，所以它成为簇首的概率将增加。当当前的轮数 r 使得 $r \bmod(1/p) = 1/p - 1$ 时，网络中所有未当选过簇首的节点都成为簇首，由此可见每 $1/p$ 轮网络中所有节点均依概率当选过一次簇首，避免部分节点当选簇首次数过多造成能量消耗过多，过早死亡。

簇首选举出来后向全网广播一个消息，声明自己已经成为簇首。普通节点选择接收到的信号最强的簇首加入。簇首接收完普通节点发送来的加入请求后，建立并广播时隙表。普通节点收到自己的时隙后，簇的形成阶段就完成了，LEACH 协议成簇算法的流程图如图 2.5 所示。

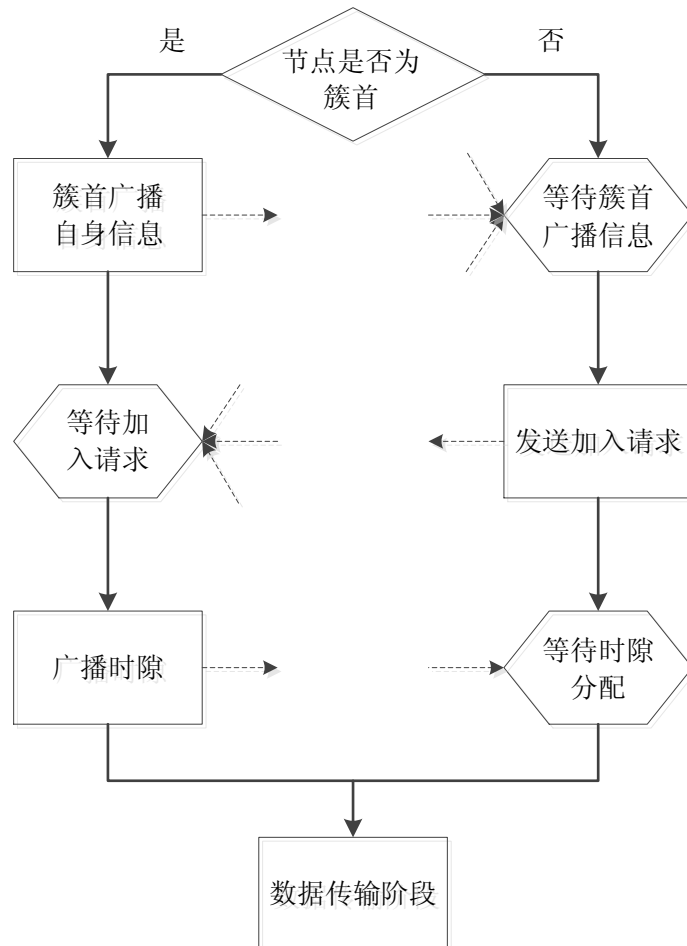


图 2.5 LEACH 协议成簇算法流程图

簇的建立阶段完成后，网络进入数据传输阶段。普通节点在自己所在的时隙内向所加入的簇首发送感知数据，这样不但保证了成员节点发送的数据无冲突，而且可以让成员节点在不发送数据时保持关闭状态以节省能量。簇首收集簇内数据后，对数据进行融合，然后发送

给汇聚点。数据传输持续一段时间以后，网络将进入新一轮的工作。

在 LEACH 协议中成簇时采用均匀分簇方式，由于簇首消耗能量比普通节点快，利用 $T(n)$ 使网络中所有节点轮流担任簇首，用来均衡节点能耗。但是簇首与汇聚点采用单跳传输方式，导致簇首能量消耗过快，并且由于簇首离汇聚点远近的不同，也会带来簇首间能量消耗不均衡问题，离汇聚点远的节点死亡过快。采用簇首与汇聚点单跳的通信方式，使得 LEACH 协议一般只适用于小型网络^[44]。

2. PEGASIS 协议

高效采集传感器信息系统 (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems 简称 PEGASIS)^[30]协议是在 LEACH 协议上提出的一种路由协议，PEGASIS 协议将整个网络看作一个簇，仅选择一个节点作为起始点，然后所有节点形成一条最优链，起始点对收集到的来自其它节点的数据信息与自身数据信息进行融合，最后起始点以单跳方式发送给汇聚点。

PEGASIS 协议中链的形成采用贪婪算法，如图 2.6 所示。在链的形成过程中为了保证每个节点都有其邻居节点，算法从离汇聚点最近的节点开始构建链。已经在链中的节点不能再被访问以防止形成环路，一旦链中有节点失效必须重新构建链。

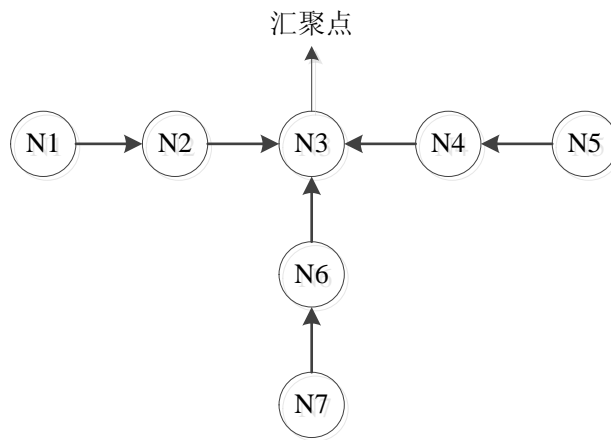


图 2.6 PEGASIS 协议数据传输链的形成

起始点采用令牌(Token)机制控制数据从结尾开始沿着链传输，Token 比较小，所以传输它消耗的能量较少。在图 2.6 中，N3 为起始点，将 Token 沿着链传给 N1，N1 将数据发送给 N2，N2 将收到的数据与自身数据进行融合，将形成的相同大小的数据包发送给 N3。接着 N3 将 Token 发送给 N5，以同样的方式收集 N5 和 N4 的数据，最后以同样方式收集 N7 和 N6 数据。N3 将收集到的所有数据融合后，发送给汇聚点。PEGASIS 协议通过设置剩余能量门限值来决定哪些节点可以作为起始点，用来增强网络的健壮性。由于起始点负担比较重，需要全网节点轮流作为链的起始点来均衡所有节点的能耗。PEGASIS 协议中每个节点都以最小功率发送数据包，并且采用了数据融合技术，采用该协议的网络生命周期比采用 LEACH 协议

的生命周期长。但是 PEGASIS 协议中起始点的失效将破坏整个网络的正常运行，并且如果网络规模较大，节点较多时，形成的链会很长，将会使数据延迟加重。为了降低数据延迟，人们提出了分层 PEGASIS 协议^[31]，该协议采用数据并行传输机制。

3. EEUC 协议

由文献[14]可知，采用簇首间多跳的通信方式，可以降低网络整体能耗。EEUC 协议^[27]是一种基于非均匀分簇的层次式无线传感器网络路由协议，它采用多跳防止离汇聚点远的簇首过早死亡，与 LEACH 协议相比，EEUC 协议有效地均衡了网络中簇首能耗，延长了网络生命周期。

EEUC 协议将网络工作过程划分为轮，每轮由簇的建立和数据传输两个阶段组成，其中簇的建立阶段又可细分为簇首的选举和簇的形成两个阶段。EEUC 协议通过二次选举方式决定最终簇首，首先在网络中产生候选簇首，再根据候选簇首剩余能量产生最终簇首，以实现簇首在网络中均匀分布与均衡节点能耗目的。

为了获得候选簇首，网络中每个节点均产生一个 0 到 1 之间的随机数 μ ，若 μ 小于预先设置的阈值 T ，则成为候选簇首，参与竞选最终簇首，未成为候选簇首的节点进入睡眠状态。竞选最终簇首时，候选簇首需要根据自身的竞争半径 R 来建立邻候选簇首集，假设 s_i 为一个节点，则其竞争半径计算公式如式(2.2)。式中， d_{\max} 和 d_{\min} 分别为网络中节点到汇聚点最大和最小距离， $d(s_i, DS)$ 为节点 s_i 到汇聚点距离， R_0 表示节点最大的竞争半径， c 为用于控制竞争半径取值范围的参数，其取值范围在 0 和 1 之间。

$$R = \left(1 - c \frac{d_{\max} - d(s_i, DS)}{d_{\max} - d_{\min}} \right) R_0 \quad (2.2)$$

候选簇首根据竞争半径建立邻候选簇首集 H_{CH} ，在这个集合中根据节点剩余能量高低竞选最终簇首，剩余能量最高的候选簇首成为最终簇首，其他竞选失败的候选簇首则成为普通节点。由(2.2)式可以看出，候选簇首与汇聚点距离不同，其竞争半径也不同，距离近的竞争半径相对较小，簇内成员相对较少，以节省用于收集簇内数据的能量来转发其他簇首的数据。最终簇首产生后，为了减少能量消耗，普通节点选最近的簇首加入，成簇阶段结束。

在数据传输阶段，EEUC 协议将数据通信分为簇内通信与簇间通信。为了简单易实现，簇内通信采用单跳传输方式，而簇间采用多跳传输方式以节省网络能量，均衡节点能耗。在建立簇间多跳路由时，引入一个阈值($TD_MAX = 140m$)，到汇聚点的距离小于此阈值的簇首将采用单跳方式与汇聚点通信。若簇首到汇聚点的距离大于等于此阈值，则根据网络能量开

销指标从路由候选节点集合中选出指标的两个节点，最后选出剩余能量多的节点当其路由的下一跳节点。

EEUC 协议为了达到能量高效的目的，每采集一次数据后就重新构造簇。并且在生成候选簇首时，网络中所有节点均以相同的概率 $0.4^{[27]}$ 当选为候选簇首，这会带来两个问题：第一个问题是会导致部分节点当选最终簇首次数过多而过早死亡，第二个问题是参加竞争最终簇首的候选簇首数量较多，在传输控制信息上浪费了网络能量。

以下对近几年提出的 EEUC 改进路由协议进行简单介绍，非均匀层次分簇路由算法 (Unequal Level-based Clustering Routing Algorithm 简称 ULCR)^[28] 将网络分层，根据节点剩余能量与节点所属的层次来产生簇首，使用节点不同的竞争范围构造大小不同簇，簇间采用多跳传输方式。文献[41]中提出的异步成簇算法要求簇首剩余能量小于某一阈值才进行簇首的重新竞选，虽然有效地延长了网络生命周期，但该算法在健壮性和容错性方面稍弱。

高数据融合的非均匀分簇 EEUC(Highly Data Fusion Unequal Clustering-EEUC 简称 HDF-EEUC)^[32] 协议在与汇聚点距离小于设定阈值的簇首中选择一个主簇首，所有簇首都通过主簇首与汇聚点通信，主簇首融合簇内与其他簇首数据后发送给汇聚点，此协议适用前提是网络中来自不同簇的数据有大量冗余，这限制了协议的适用范围。基于非均匀分簇的低能耗路由协议(Energy Efficient Routing Protocol on Uneven Cluster 简称 EERPUC)^[10] 将网络分层，选簇首时考虑了节点剩余能量与该节点离所属层中心线的距离，簇首采用多跳与汇聚点通信，数据传输阶段选择动态路由。簇头负载均衡的分簇(Cluster Head Load Balanced Clustering 简称 CHLBC)^[24] 协议使用与 EEUC 协议相同的方法选择簇首，然后构建从汇聚点到簇首跳数场，建立以汇聚点为根节点的簇间转发路径，普通节点在选择要加入的簇首时综合考虑与簇首的距离和簇首的中转数据量。

2.5 LEACH 与 EEUC 协议仿真分析

本节对典型的 LEACH 与 EEUC 协议进行仿真，通过仿真比较它们网络生命周期。在仿真中一个节点死亡指不考虑其它外界因素，其能量等于零。首先对 LEACH 协议和 EEUC 协议网络拓扑结构进行仿真，分别如图 2.7 和 2.8 所示。从图 2.7 可以看出，LEACH 协议中簇首与汇聚点采用单跳通信方式，这会使离汇聚点远的簇首消耗更多的能量。与 LEACH 协议不同，EEUC 协议在簇首与汇聚点通信时采用多跳通信方式，离汇聚点远的簇首首先收集簇内数据，对数据融合后发送给离汇聚点近的簇首，再由离汇聚点近的簇首发送给基站。为了延长离汇聚点近的节点存活时间，EEUC 协议采用非均匀分簇方式。

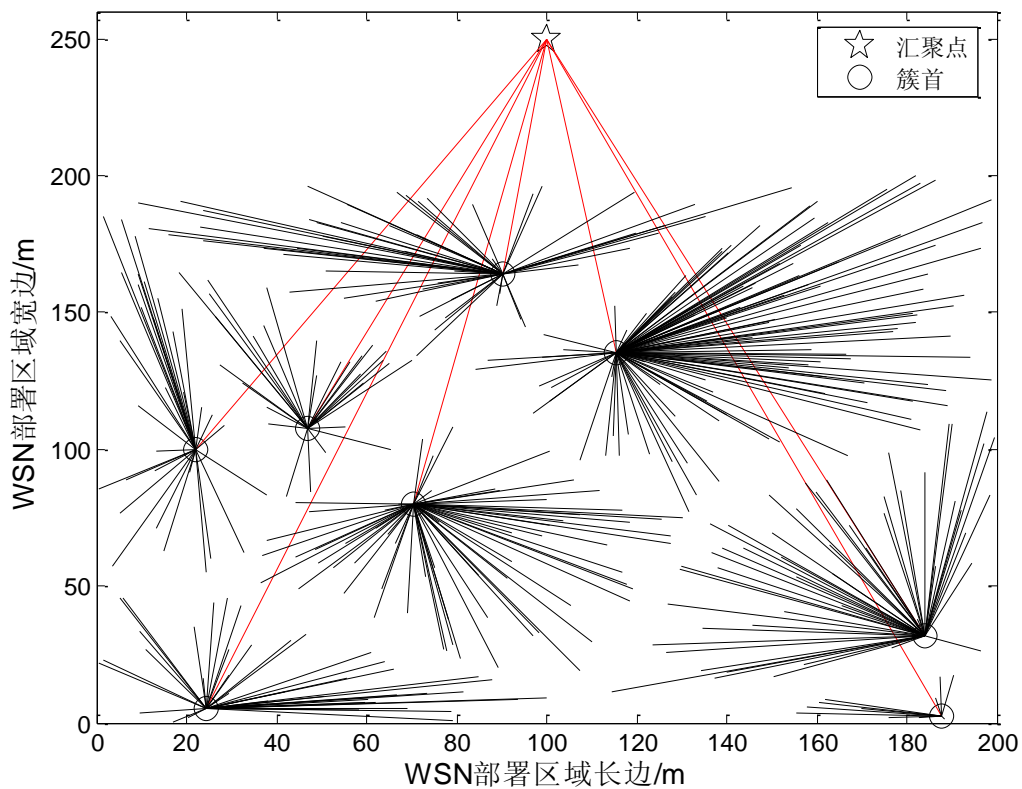


图 2.7 LEACH 协议网络拓扑结构图

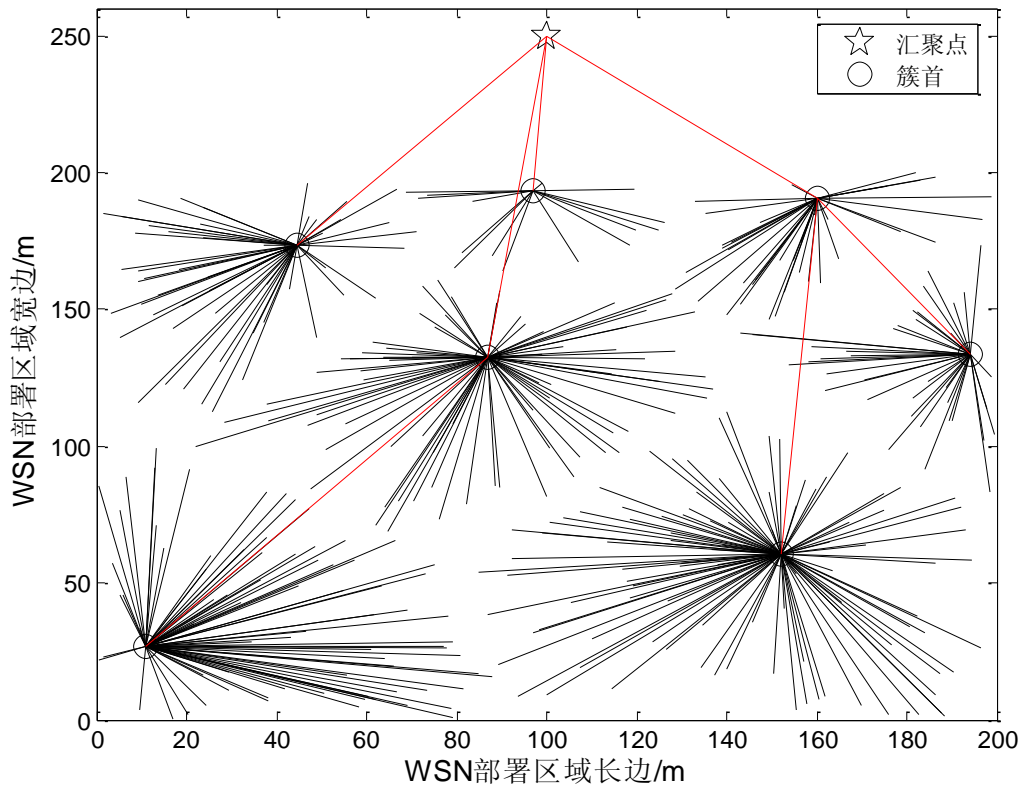


图 2.8 EEUC 协议网络拓扑结

由于无线传感器网络能量有限,因此生命周期是评价无线传感器网络路由协议好坏的重要性能指标。目前,网络生命周期根据应用环境不同,主要有三个标准定义^[16]:第一,第一个节点死亡的时间,此标准一般适用于对采集信息精确度要求较高的应用环境;第二,网络中一半节点死亡的时间,此标准适用于对采集信息精确度要求不高的环境;第三,网络中所有节点死亡的时间,此标准是判断网络运行时间的极限,不适用于实际环境。

图 2.9 对 LEACH 协议与 EEUC 协议网络生命周期进行比较,如图所示,LEACH 和 EEUC 协议中第一个节点死亡时间分别为 241 轮和 270 轮,网络中一半节点死亡时间分别为 414 轮和 468 轮。网络的生命周期若以第一个节点死亡时间记,EEUC 比 LEACH 延长了 12.0%;若以网络中一半节点死亡时间记,EEUC 比 LEACH 延长了 13.1%。以上现象的原因是,LEACH 协议采用均匀分簇,并且簇首与汇聚点之间采用单跳通信方式,导致离汇聚点远的节点过早死亡。而 EEUC 协议采用非均匀分簇与多跳通信方式,延迟了网络第一个节点死亡时间。

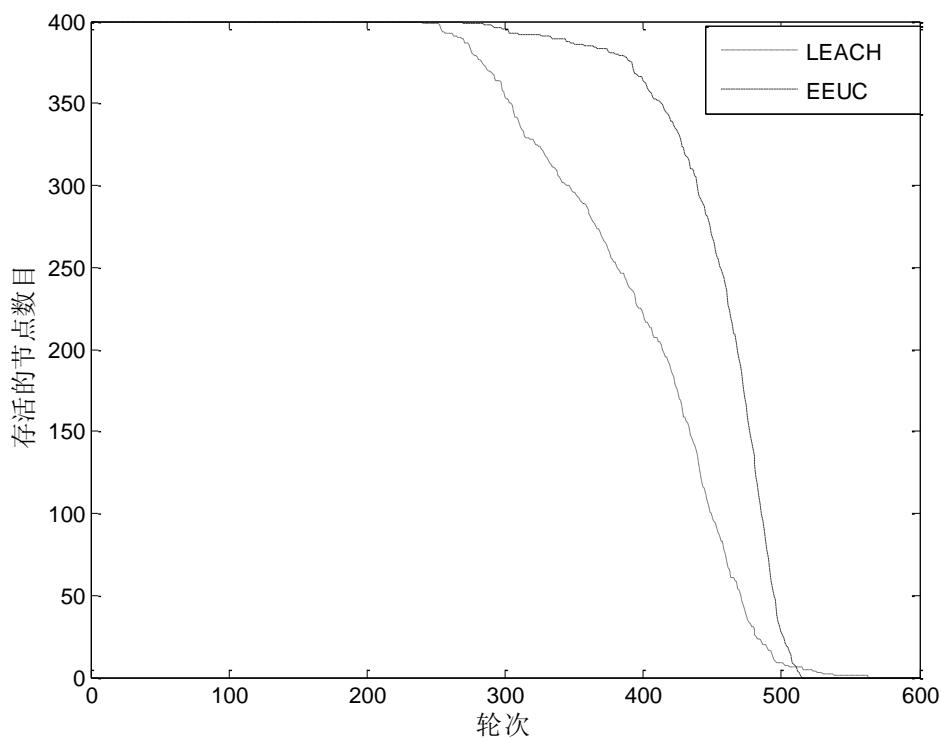


图 2.9 LEACH 与 EEUC 网络生命周期

2.6 本章小结

本章主要介绍了无线传感器网络路由协议,首先给出了无线传感器网络路由协议设计时考虑的因素,然后简单介绍了按不同分类方法对路由协议进行的分类,并对典型平面路由协议和层次路由协议进行介绍,最后对 LEACH 协议与 EEUC 协议进行仿真分析。

第三章 I-EEUC 协议的设计与仿真

3.1 问题描述

文献[9]中指出,数据传输过程中采用单跳路由方式会导致离汇聚点较远的节点消耗的能量过快,LEACH 协议通过轮换簇首角色只能均衡簇首与普通节点间的能耗,并不能解决由于离汇聚点远近带来的簇首间能量消耗不均问题。并且簇首间单跳路由方式中,簇首与汇聚点之间的通信要经过长距离传输,根据无线通信能耗公式,距离超过一定值时所消耗的能量与距离四次方成正比,这会导致网络整体能量快速下降。

为了解决上述长距离传输问题,文献[11]提出采用多跳路由方式,靠近汇聚点的簇首不仅要完成自身簇内任务,还要转发其他簇首数据,使得自身能量消耗过快,出现“热区”问题。Soro 等人提出利用非均匀分簇思想来解决上述问题^[36],其中 EEUC 协议是利用此思想的典型代表之一。EEUC 协议采用不等的竞争半径使得簇的大小随着簇首与汇聚点距离的不同而不同,让距离汇聚点近的簇相对较小,簇内成员较少,减少簇首由于传输自身簇内消息而消耗的能量,将省下的能量用来转发距离汇聚点远的簇首发送来的消息。

本文提出的改进的能量高效非均匀分簇 (Improved-EEUC 简称 I-EEUC) 协议是对 EEUC 协议的改进,网络产生最终簇首时不仅考虑了节点所剩能量大小而且还考虑了节点在最近是否担任过最终簇首。I-EEUC 协议选择下一跳时综合考虑了网络能量开销指标,下一跳节点剩余能量与其簇内成员数目等因素。I-EEUC 协议与 EEUC 协议一样将网络工作过程划分为轮,每轮由簇的建立和数据传输两个阶段组成,其中簇的建立阶段又可细分为簇首的选举和簇的形成两个阶段。

3.2 I-EEUC 协议网络模型与通信能耗模型

3.2.1 网络模型^[27]

在一个正方形监测区域内,随机部署 N 个传感器节点,应用场景为周期性的数据收集。本文假设以下条件成立:

(1) 汇聚点位于正方形监测区域较远的外部,汇聚点与传感器节点部署后均处于静止状态,不再发生位置移动。

(2) 网络中所有节点都是同构的, 节点的初始能量、数据处理能力与无线通信能力都相同, 每个节点都有一个唯一标识, 都具有数据融合能力。传感器节点能量用完后不能进行二次补给。

(3) 传感器节点不配备 GPS 系统。

(4) 节点可以根据距离信号接收节点的远近调节无线电发射功率。

(5) 链路对称, 节点 i 发送数据到节点 j 消耗的能量与节点 j 发送数据到节点 i 消耗的能量相同。

3.2.2 通信能耗模型

由第一章知道, 传感器节点的能量主要消耗在传感、数据处理和通信三部分, 其中通信部分消耗掉电源大部分能量。在分析无线通信模块能耗时采用文献[18]中的第一顺序无线电模型, 如图 3.1 所示, 模型中假设在各个方向上无线电信号所消耗的能量相同。

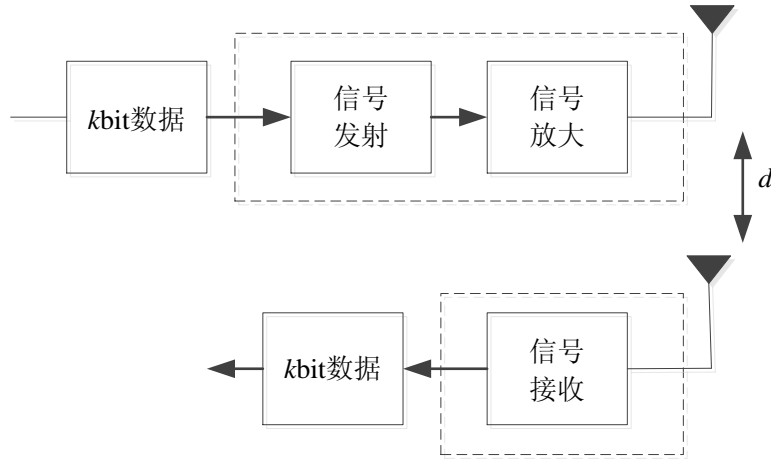


图 3.1 第一顺序无线电模型^[18]

从上图中可以看出, 发送信号消耗的能量由信号发射电路和信号放大电路产生, 接收信号消耗的能量由信号接收电路产生。传感器节点每发送 k bit 数据消耗的能量如式(3.1)^[18]:

$$\begin{aligned}
 E_{Tx}(k, d) &= E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d) \\
 &= \begin{cases} kE_{elec} + k\varepsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \\ kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \end{cases} \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

节点接收 k bit 数据消耗的能量如式(3.2)^[18]:

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k) = kE_{elec} \quad (3.2)$$

其中, E_{elec} 由电路自身特性决定, 为发射电路能量损耗, d 为信号传输距离, ε_{mp} 和 ε_{fs} 表示

信号放大器放大的倍数， $\varepsilon_{mp}d^4$ 和 $\varepsilon_{fs}d^2$ 表示无线电功率放大损耗。当 d 小于 d_0 和大于 d_0 时，功率放大损耗分别采用“自由空间模型”和“多路径衰减模型”， d_0 的取值如式(3.3)：

$$d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}}} \quad (3.3)$$

无线传感器网络中节点一般被部署得较密集，相邻节点监测到的数据有很大部分重复，因此簇首可以采用融合技术来减少网络中需要传输的数据量，融合 k bit 数据所消耗的能量为：

$$E_k = kE_{DA} \quad (3.4)$$

式(3.4)中 E_{DA} 为融合 1bit 数据所消耗的能量。

3.3 I-EEUC 协议簇的建立阶段

无线传感器网络中传感器节点部署后，为了让网络中每个节点知道它到汇聚点的距离，汇聚点将广播一个消息。根据接收到的消息强度，节点可以计算它们之间的近似距离 $d(s_i, DS)$ ，将这个距离值代入式(2.2)计算出自己的竞争半径。

本文将簇的建立阶段细分为簇首的选举和簇的形成两个阶段，以下分别对它们进行详细描述。

3.3.1 簇首的选举

I-EEUC 协议采用分布式成簇思想，传感器节点独立自发地选举簇首并成簇，不需要集中控制管理。详细过程如下：

(1) 网络中所有在最近当选过最终簇首的节点进入睡眠状态，未当选过最终簇首的节点产生 0~1 随机数 t 。

(2) 节点拿 t 与 $T(n)$ 比较，若大于等于 $T(n)$ 则进入睡眠状态，若小于 $T(n)$ 则节点成为候选簇首，它将广播一个含有节点的标识、剩余能量和竞争半径的消息，广播半径为网络中最大的竞争半径 R_0 。

(3) 节点接收其他候选簇首发送来的消息，并建立邻候选簇首集合。

(4) 比较自身能量是否为邻候选簇首集合中的最大值，若是则转 6，若不是则等待比它能量大的候选簇首发送消息。

(5) 若接收到其邻候选簇首集合中能量比自身大的节点发送成为最终簇首的消息，则节点立即设置自身为普通节点，并以 R_0 为半径广播退出竞争簇首消息；若收到其邻候选簇首集合中能量比自身大的节点退出竞争最终簇首的消息，则将此候选簇首从其邻候选簇首集合中删除，转 4。

(6) 成为最终簇首，并以 R_0 为半径广播此消息。

假设网络中有一个候选簇首标识为 i ，则候选簇首 i 的邻候选簇首集合 $i.S_{CH}$ 定义为：

$$i.S_{CH} = \{j | d(i, j) < \max(i.R, j.R)\} \quad (3.5)$$

以上的最终簇首选择过程是针对 LEACH 协议和 EEUC 协议出现的以下问题的改进。在 LEACH 协议中利用 $T(n)$ 使网络中所有节点轮流承担簇首，用来均衡节点能耗，但是节点离汇聚点远近不同导致充当簇首时能量消耗不同。而在 EEUC 协议中利用预先设定的阈值 T (T 为固定值 0.4) 选择候选簇首，这样在新一轮开始时，所有节点无论已经当选过几次最终簇首，其与未当选过最终簇首的节点以相同概率成为候选簇首，有可能导致某些节点过早死亡。

本文提出的 I-EEUC 协议借鉴 LEACH 协议选簇首策略对 EEUC 协议候选簇首的选择进行改进，假设网络区域面积为 S ，节点总数为 N ，由文献[27]可知竞争半径 R 有个最小取值为：

$$R_{\min} = \frac{1}{2} R_0$$

在该竞争半径内有且仅有一个节点会成为最终簇首，所以每轮中最多有 $S / \pi(R_{\min})^2$ 个最终簇首，则最终簇首占有所有节点比例为 $p_{final} = (S / \pi(R_{\min})^2) / N$ ，若使新一轮中在最近当选过最终簇首的节点不参加候选簇首的选举，每经过 $1 / p_{final}$ 轮几乎所有节点都担任过最终簇首，然后让所有节点重新获得竞选候选簇首的资格， $T(n)$ 如下：

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p_{final}(r \bmod \frac{1}{p_{final}})}, & n \in G; r \bmod (1 / p_{final}) \leq (1 - p) / p_{final} \\ 1, & n \in G; r \bmod (1 / p_{final}) > (1 - p) / p_{final} \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (3.6)$$

其中 $p_{final} = (S / \pi(R_{\min})^2) / N$ ，是期望最终簇首在所有节点中所占的百分数， S 是网络区域面积，

R_{\min} 是最小竞争半径, N 是传感器节点总数, p 是期望候选簇首在所有节点中所占的百分数, r 是当前网络所进行的轮数, n 是传感器节点标识, G 为在过去 $r \bmod(1/p_{final})$ 轮中未担任过最终簇首的节点集合。

由以上可以看出, 前 $r(r \bmod(1/p_{final}) \leq (1-p)/p_{final})$ 轮中, 参加候选簇首选举的节点个数为 $N(1-p_{final} \times (r \bmod(1/p_{final})))$, 则候选簇首期望个数为:

$$E(H) = N(1-p_{final} \times (r \bmod(1/p_{final})))T(n) = N \times p \quad (3.7)$$

当 $r \bmod(1/p_{final}) > (1-p)/p_{final}$ 时, 参加候选簇首选举的节点个数将小于 $N \times p$ 个, 此时 $T(n)=1$ 所有节点都成为候选簇首。

网络每经过一轮, 当选过最终簇首的节点通过将自己当选过最终簇首标志置 1, 使其阈值为 0, 不参与下一轮候选簇首的竞争。 $1/p_{final}$ 轮后, 所有节点将当选过最终簇首标志清零, 按式(3.6)计算自己的阈值, 重新获得竞选候选簇首的资格。没有当过最终簇首的节点在下一轮簇首选举中, 随着 $r \bmod(1/p_{final})$ 的增加, 它的阈值 $T(n)$ 将会增大, 所以它成为候选簇首的概率将增加。当当前的轮数 r 使得 $r \bmod(1/p_{final}) > (1-p)/p_{final}$ 时, 网络中所有未当选过最终簇首的节点都成为候选簇首, 由此可见每 $1/p_{final}$ 轮网络中几乎所有节点均依概率 1 当选过一次最终簇首, 避免了部分节点因当选最终簇首次数过多造成能量消耗过多, 过早死亡。簇首的选举流程图如图 3.2 所示。

3.3.2 簇的形成

簇首选举出来后, 簇的形成按照以下步骤来完成:

(1) 簇首利用非持续性载波侦听多路访问(Carrier-Sense Multiple Access 简称 CSMA)的 MAC 协议以相同功率向网络发送一个包含节点信息的广播信号。

(2) 普通节点根据所收到的簇首发来的信号强度, 选择信号最强的簇首发送加入请求, 在出现有两个或两个以上信号强度相同情况时, 随机选择一个簇首发送加入请求。

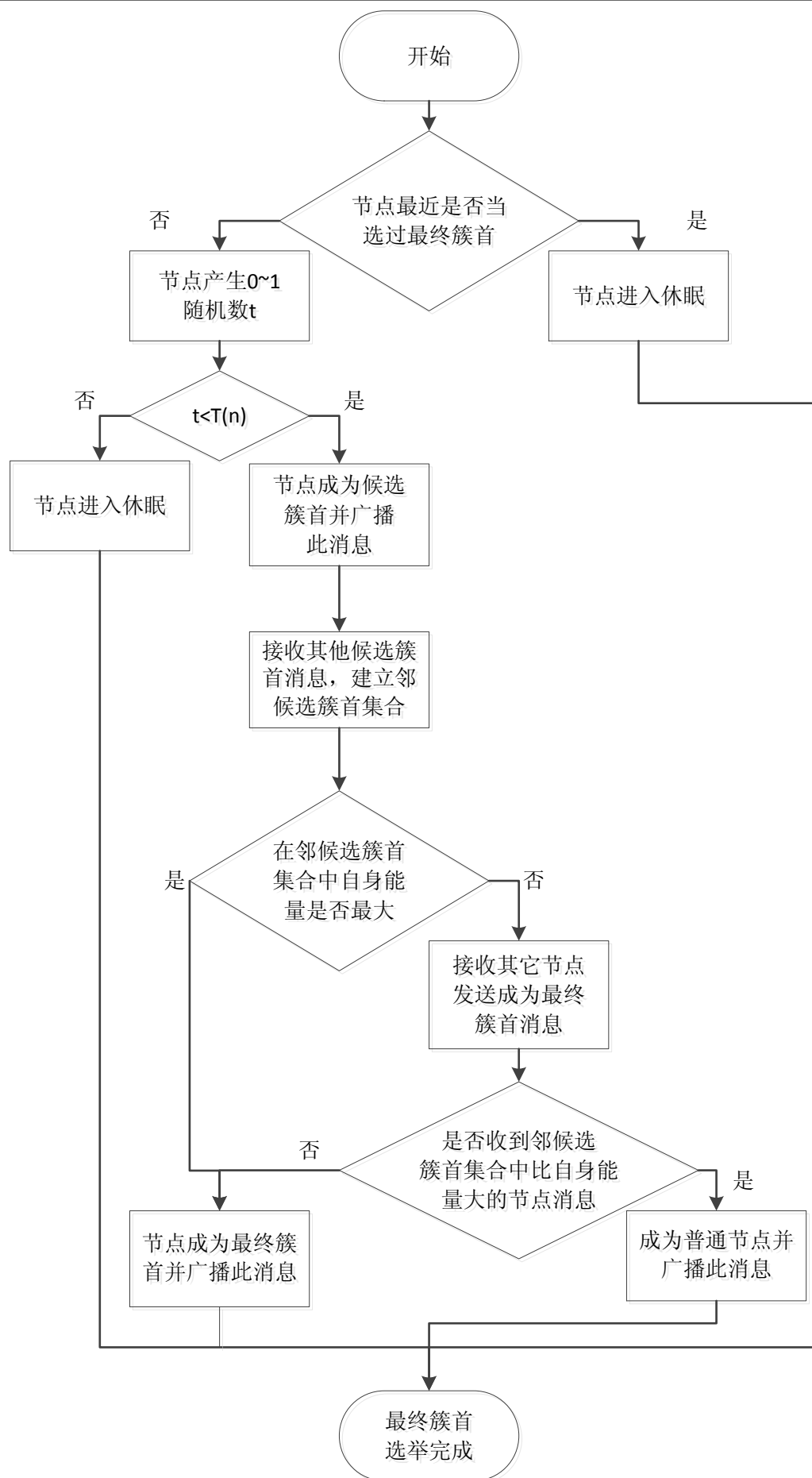


图 3.2 I-EEUC 协议簇首选举流程图

3.4 I-EEUC 协议数据传输阶段

在簇建立完成后,网络进入数据传输阶段。本文将数据传输阶段又划分为路由的建立和稳定的数据传输两个阶段。

3.4.1 路由的建立

文献[43]中提出了在簇内构建最小能耗树,实现起来较复杂。I-EEUC 协议为了实现起来尽量简单,簇内采用单跳的通信方式。建立簇内路由时,簇首接收完普通节点发送来的加入请求后,确定本簇内的节点成员数量,然后向全网广播一条消息,包括其节点标识、节点剩余能量、簇内成员节点数量和其到汇聚点的距离。收到该消息的其他簇首,根据收到的信号强度近似计算它们的距离,并根据簇内所拥有的最多的成员数量确定统一的时隙数,建立时分多址(Time Division Multiple Access 简称 TDMA)时隙表。对于簇内成员数少的簇,通过设置空闲时隙来达到各个节点所占时隙大小相等目的。时隙表建立后,簇首向全网广播时隙安排。普通节点在自己所在的时隙内向所加入的簇首发送感知数据,这样不但保证了成员节点发送的数据无冲突,而且可以让成员节点在不发送数据时保持关闭状态以节省能量。

为了避免长距离数据传输造成簇首能量消耗,簇首与汇聚点之间采用多跳的通信方式。簇首在选择下一跳时,I-EEUC 协议将下一跳节点的选取范围限制在比其自身更接近汇聚点的簇首集合中,假设网络中有一个簇首标识为 i ,则 i 的下一跳节点集合 $i.R_{CH}$ 定义为:

$$i.R_{CH} = \{j | d(j, DS) < d(i, DS)\} \quad (3.8)$$

其中 $d(i, DS)$ 表示簇首 i 到汇聚点的距离, $d(j, DS)$ 表示簇首 j 到汇聚点的距离。簇首 i 的下一跳节点集合若为空,则簇首 i 与汇聚点直接通信,否则簇首 i 从其下一跳节点集合 $i.R_{CH}$ 中按公式(3.9)选择使 E_{relay} 取最小值的 j 节点作为下一跳节点。

$$E_{relay}(j) = (d^2(i, j) + d^2(j, DS)) \times \frac{\sum_{k \in i.R_{CH}} E_k}{E_j} \times \frac{n_j}{\sum_{k \in i.R_{CH}} n_k}, \quad j \in i.R_{CH} \quad (3.9)$$

其中, $d(i, j)$ 表示簇首 i 到簇首 j 的距离, $d(j, DS)$ 表示簇首 j 到汇聚点的距离, E_j 为簇首 j 当前剩余能量, n_j 为簇首 j 簇内成员节点数目。

若簇首 i 选择簇首 j 为下一跳节点,则簇首 i 为了将采集到的 k bit 数据传送给汇聚点,需

要 j 进行转发，这时网络中传输该消息一共需要的能量为：

$$\begin{aligned}
 E_{hop} &= E_{Tx}(k, d(i, j)) + E_{Rx}(k) + E_{Tx}(k, d(j, DS)) \\
 &= k(E_{elec} + \varepsilon_{fs} d^2(i, j)) + kE_{elec} + k(E_{elec} + \varepsilon_{fs} d^2(j, DS)) \\
 &= 3kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}(d^2(i, j) + d^2(j, DS))
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

由式(3.10)可知， $d^2(i, j) + d^2(j, DS)$ 越小网络能量消耗得越少，其越大网络能量消耗得越多，因此将 $d^2(i, j) + d^2(j, DS)$ 作为网络能量开销指标。选择下一跳时若仅考虑网络能量开销指标，会使得剩余能量过少的簇首由于承担数据转发任务，导致其过早死亡，达不到均衡网络中节点能耗的目的。若仅考虑簇首剩余能量大小，将会导致网络能量利用率下降。公式(3.11)不但考虑了网络能量开销指标和下一跳簇首剩余能量，还考虑了下一跳簇首其簇内成员数目，让使得网络能量开销较小剩余能量较大且簇内成员数目较少的簇首成为下一跳节点。让簇内成员数目较少的簇首更多地转发来自其它簇首信息，在选择下一跳时在网络能量开销与下一跳节点能量消耗间采用折中方法。

3.4.2 稳定的数据传输

在路由建立阶段完成后，进入稳定的数据传输阶段。在这个阶段，所有节点持续监测目标，采集数据，等待其对应的传输时隙到来时将采集到的数据发送给所加入的簇首。簇首接收到所有成员节点发送来的数据后，为了减少网络中数据传输量，节省能量，簇首将进行数据融合，并将融合后的数据沿着既定的路径发送给汇聚点。

EEUC 协议在每个数据收集周期后重新构造簇，I-EEUC 协议综合考虑发送控制包能量消耗和第一个节点与最后一个节点死亡时间的跨度，采用每两次数据收集周期后重新构造簇。

3.5 消息复杂度分析

网络中有 N 个传感器节点，每个节点成为候选簇首的概率为 $T(n)$ 。由式(3.7)可知，每轮中 N 个节点中将成为候选簇首的个数大概是 $N \times p$ 个，每个候选簇首在竞争最终簇首时要广播竞争簇首消息，一共需要广播 $N \times p$ 个竞争消息。此后，若候选簇首竞争获胜将广播一条竞争获胜消息，若竞争失败将广播一条竞争失败消息。假设网络中最终产生 k 个最终簇首，则网络中共广播了 k 个竞争获胜消息， $N \times p - k$ 个竞争失败消息。最终簇首选举完成后，要

向全网广播一条最终簇首消息，则 k 个最终簇首一共广播 k 条消息，普通节点收到最终簇首发来的消息后，需要发送一条请求加入消息，则需要发送 $N-k$ 条加入消息。综上所述，在建立簇的阶段，网络中传输的总消息数为：

$$N \times p + k + N \times p - k + k + N - k = (2p + 1)N \quad (3.11)$$

所以在建立簇的阶段，消息的复杂度为 $O(N)$ 。

3.6 仿真实验与结果分析

3.6.1 仿真参数

使用 matlab7.0^[39]首先对 I-EEUC 协议成簇阶段与数据传输阶段进行仿真，然后对 LEACH、EEUC 以及 I-EEUC 协议性能进行仿真比较，仿真中对来自不同簇的数据不进行数据融合，I-EEUC 协议采用与文献[27]同样的网络模型及通信能耗模型，假设采用理想 MAC 协议，忽略无线链路中发生丢包的错误。与文献[23]一样，实验中统计传感器节点接收，发送数据包与控制包，融合数据消耗的能量。由于在 EEUC 协议上的改进，仿真中采用与文献[27]中相同的实验参数，如表 3.1 所示。

表 3.1 实验参数

参数	取值	参数	取值
网络区域	200m×200m	d_0	87m
汇聚点位置	(100, 250)m	E_{DA}	5 nJ/bit/signal
节点总数	400	数据包大小	4000bit
初始能量	0.5J	控制包大小	400bit
E_{elec}	50 nJ/bit	R_0	90m
ϵ_{fs}	10 pJ/bit/m ²	c	0.5
ϵ_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴	TD_MAX	140m

由于候选簇首比例 p 影响网络的生命周期，以下通过仿真观察 p 的取值对网络生命周期影响，当 p 取 0 到 0.6 之间不同值时，观察网络中第一个节点死亡时间，结果如图 3.3 所示。当 p 的值为 0.1 时，网络中第一个节点死亡时间最晚，因此仿真中 p 取 0.1。

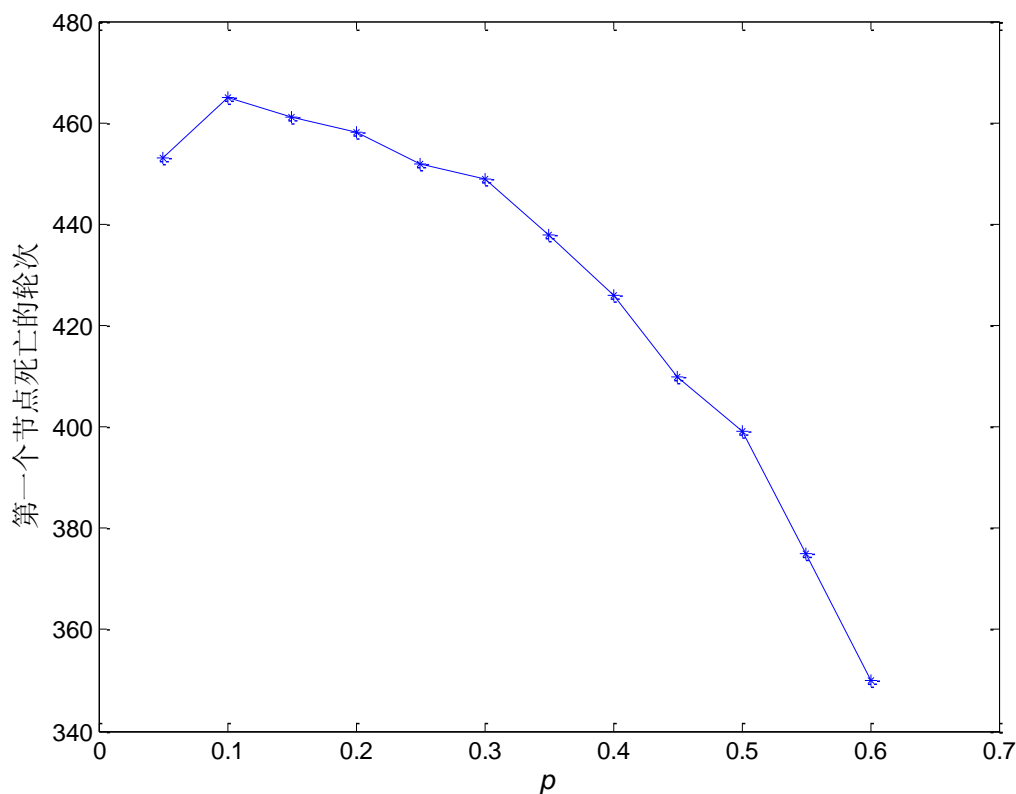


图 3.3 第一个节点死亡时间随 p 变化

3.6.2 簇的建立与路由的形成仿真

在 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 区域内随机部署 400 个节点，如图 3.4 所示。采用 I-EEUC 最终簇首选择策略，得到如图 3.5 所示的最终簇首分布，图中最终簇首分布均匀，没有出现 LEACH 协议中簇首相邻现象。最终簇首产生后，普通节点加入最近的簇首，形成的簇群分布图如图 3.6 所示，从图中可以看出离汇聚点近的区域产生的簇首数目多于离汇聚点远的区域，使得离汇聚点近的簇相对较小，簇内成员较少，簇首可以节省用于簇内通信的能量来转发其他簇首的数据，从而均衡了簇首间的能耗。在簇间路由建立阶段，采用改进的下一跳选择策略形成的簇间传输路径如图 3.7 所示。

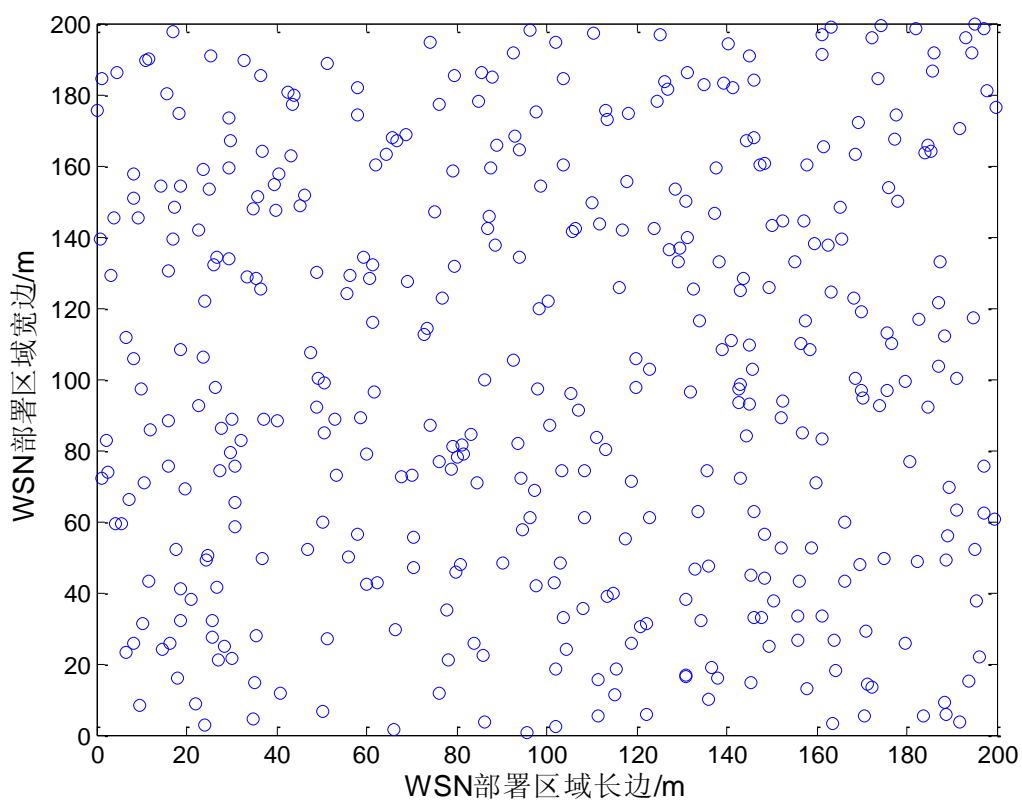


图 3.4 传感器节点分布图

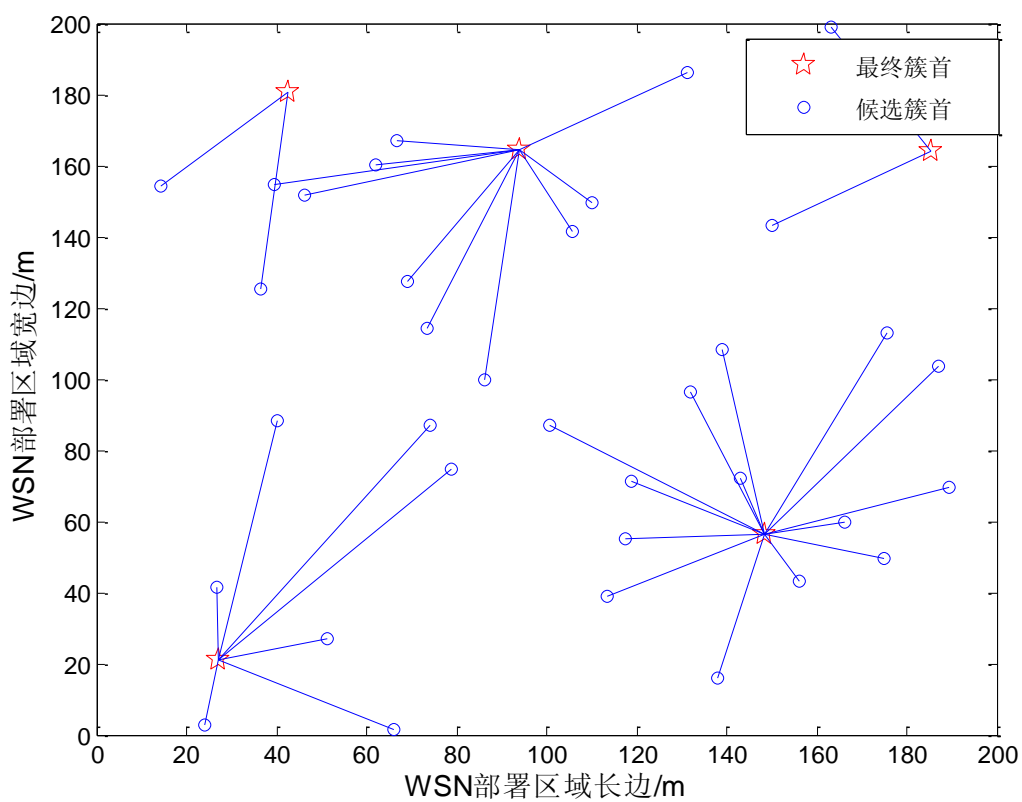


图 3.5 最终簇首分布图

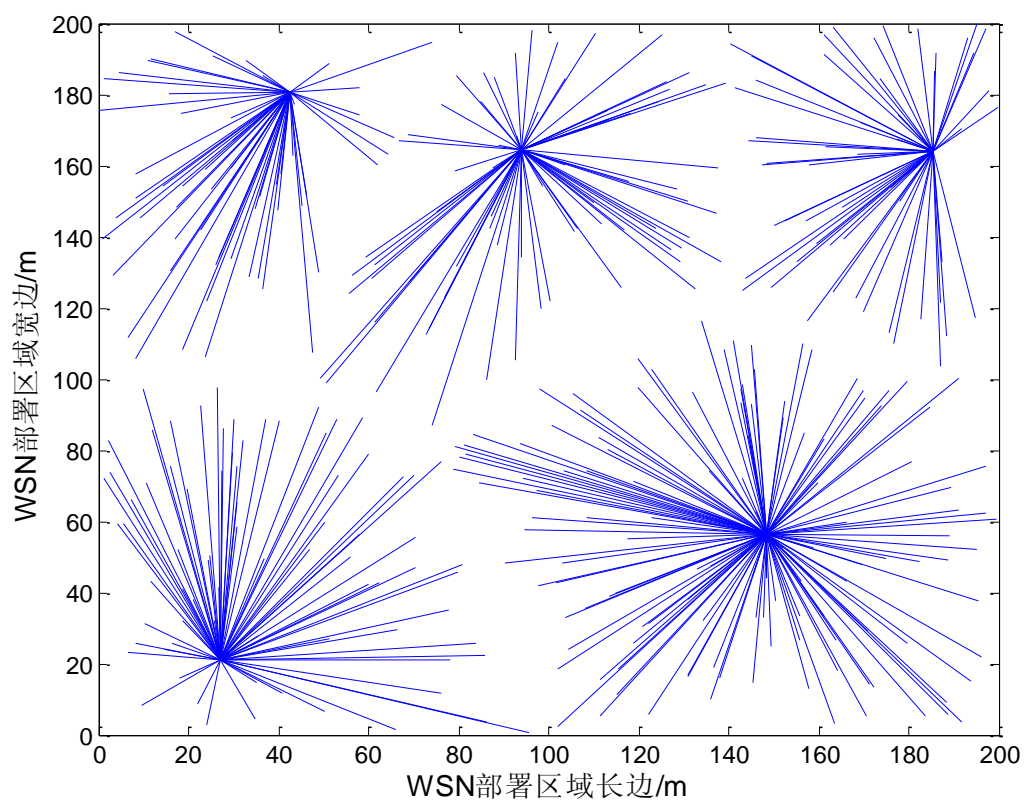


图 3.6 簇的形成分布图

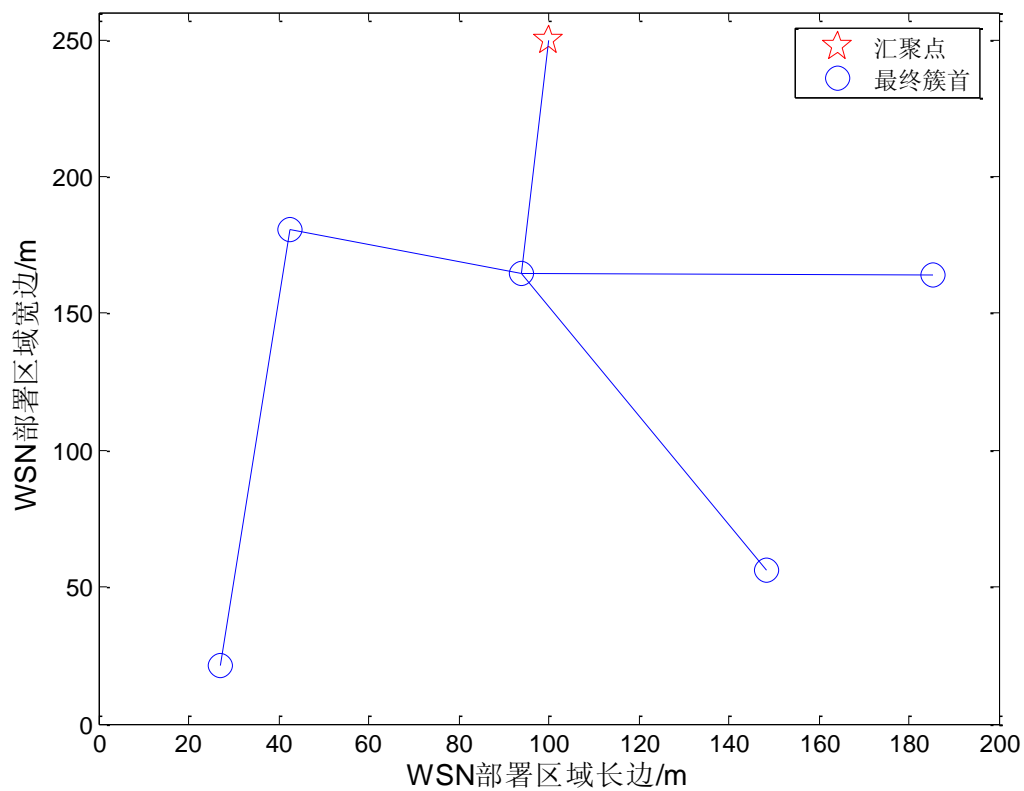


图 3.7 簇间路由的形成图

3.6.3 簇首能耗仿真分析

簇首在网络中负担重，不仅要收集自身簇内数据，还要转发其他簇数据，采用不同的簇间通信方式将影响簇首能耗，因此本小节对三协议中簇首消耗的能量之和进行仿真分析。

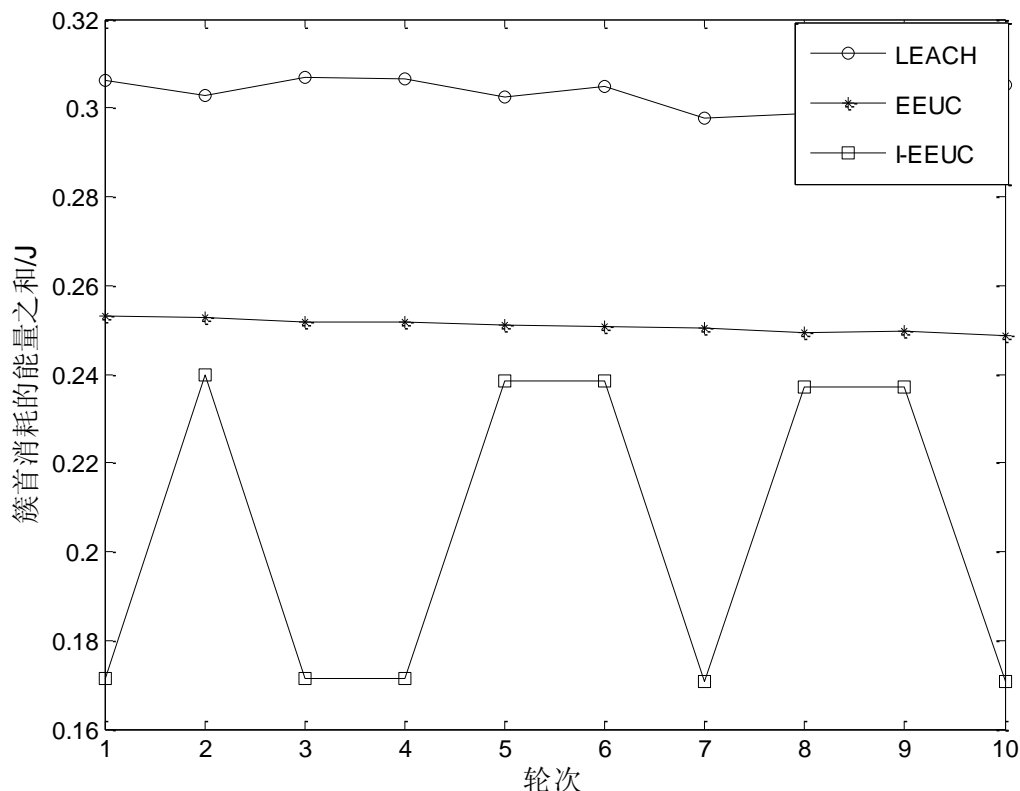


图 3.8 簇首消耗的能量之和

在 LEACH 协议、EEUC 协议、I-EEUC 协议工作过程中，随机选取 10 轮，通过运行多次取每轮簇首消耗能量之和的平均值，如图 3.8 所示。图中 LEACH 协议簇首消耗的能量之和最大，因为其在簇首与汇聚点之间采用单跳通信方式，长距离的传输导致簇首消耗的能量过多，而 EEUC 协议与 I-EEUC 协议在簇间采用多跳通信方式。I-EEUC 协议的曲线波动最大，因为它采用每两次数据收集周期后重新构造簇，使得两次数据收集周期中簇首消耗的能量不同。从图中还可以看出，I-EEUC 协议的曲线位于 EEUC 协议下方，这是因为 I-EEUC 协议取消了与汇聚点距离小于 140m 时采用直接通信的方式的限制，避免了长距离传输带来的能耗。

在上述对簇首消耗的能量之和进行仿真的同时，计算了簇首消耗的能量方差，如图 3.9 所示，I-EEUC 协议与 EEUC 协议簇首消耗的能量方差都位于 LEACH 协议曲线下方，这是因为它们都采用了非均匀分簇策略，较好的均衡了簇首间的能耗。I-EEUC 协议曲线位于 EEUC 协议下方，因为 I-EEUC 协议在选择下一跳时，综合考虑网络能量开销指标，下一跳节点剩余能量与下一跳节点簇内成员数目等因素。

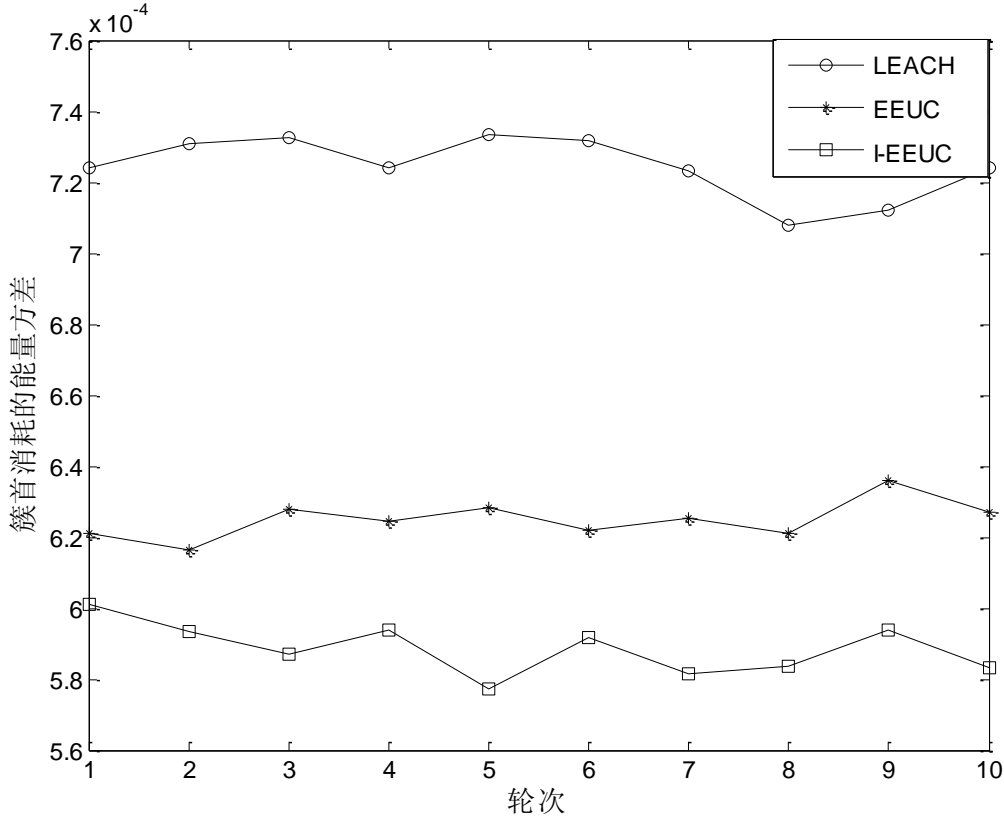


图 3.9 簇首消耗的能量方差

3.6.4 担任簇首次数分布

由于网络中簇首消耗能量比普通节点消耗能量多，部分节点如果担任簇首次数过多会出现过早死亡。本小节对网络中第一个节点死亡时所有节点担任簇首次数进行仿真，结果如图 3.10 所示。

从图中可以看出，EEUC 协议所有节点担任簇首次数相差较大，部分节点担任簇首次数最少为 2 次，最多为 20 次，并且第一个死亡节点为担任 20 次簇首的节点。这是因为 EEUC 协议在选择候选簇首时，网络中所有节点当选的概率相同，使得部分节点担任最终簇首的次数过多，相对其他节点过早死亡。由此可知，EEUC 协议没有很好地均衡网络中所有节点的能耗。

图 3.10 中 LEACH 协议节点担任簇首次数均衡，集中于 9 次和 10 次，这是因为 LEACH 协议在产生簇首时，让最近担任过簇首的节点不再拥有成为簇首的资格，以此达到了节点轮流担任簇首的目的。但是 LEACH 协议在簇首与汇聚点之间采用单跳通信方式，忽略了离汇聚点远近的不同导致簇首消耗能量的不同，因此 LEACH 协议也没有很好地均衡网络中所有节点的能耗，导致离汇聚点较远的节点过早死亡。

由图 3.10 可以看出，I-EEUC 协议节点担任簇首次数分布的均衡性，介于 LEACH 和 EEUC

中间,因为它综合了其他两种协议中选簇首的方法来选择最终簇首。I-EEUC 协议采用改进的候选簇首选择策略,使得在近期当选过最终簇首的节点不能成为候选簇首,在竞争最终簇首时考虑候选簇首的剩余能量,并且簇间采用多跳通信方式。既像 LEACH 协议一样在选最终簇首时考虑了让所有节点轮流充当簇首,又像 EEUC 协议一样让能量多的候选簇首当选最终簇首。因此, I-EEUC 协议不但均衡了普通节点与簇首间能耗,还均衡了簇首间能耗。

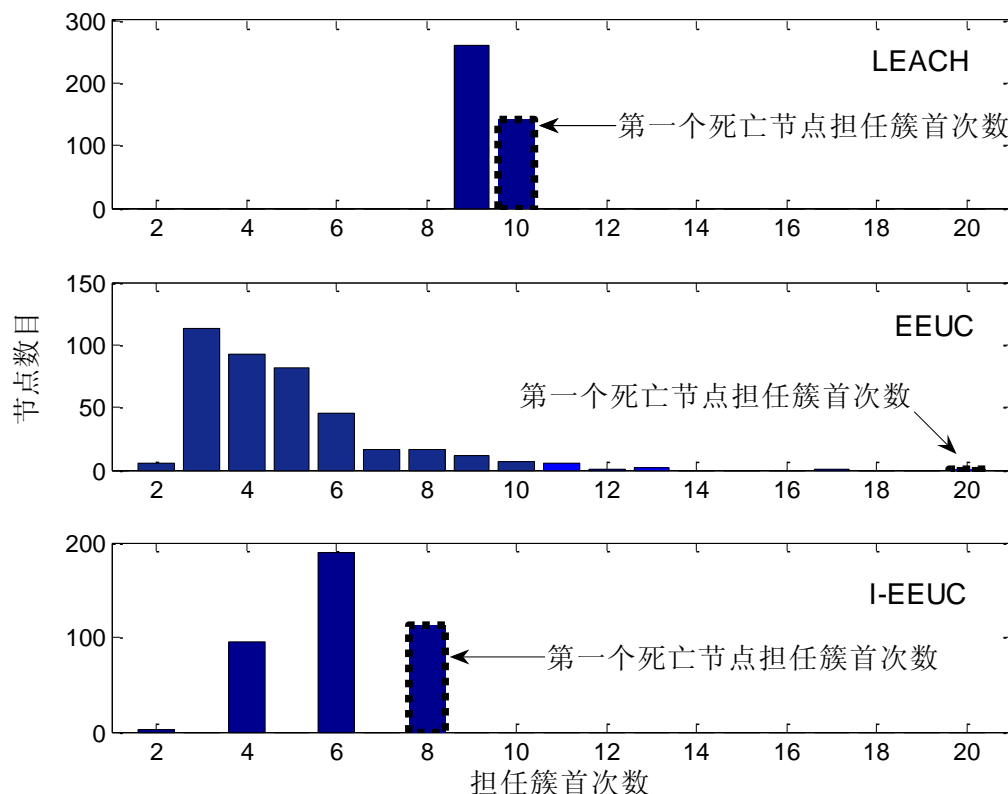


图 3.10 各种协议中第一个节点死亡时所有节点担任簇首次数

3.6.5 节点剩余能量分布

本小节研究 LEACH 协议、EEUC 协议和 I-EEUC 协议对网络中节点能耗均衡性的影响。比较了各种协议运行 250 轮时节点的剩余能量分布情况,如图 3.11 所示,采用 LEACH、EEUC、I-EEUC 三种协议的网络在运行第 250 轮时的平均剩余能量分别是: 0.1660J、0.2214J、0.2853J, 节点剩余能量方差为: 1.6454、0.2999、0.4541。I-EEUC 协议的平均剩余能量比 LEACH 协议、EEUC 协议分别高出 71.9% 和 28.9%。

可见, I-EEUC 协议和 EEUC 协议的平均剩余能量都大于 LEACH 协议,这是因为 I-EEUC 协议和 EEUC 协议在簇间都采用多跳通信方式,降低了网络能耗,且它们采用非均匀分簇成簇方式,使得离汇聚点较近的簇相对较小,簇内成员相对较少,簇首节省下用于簇内通信的能量来转发较远簇首发来的数据,均衡了簇首间能耗,使得它们的节点剩余能量方差都小于

LEACH 协议。

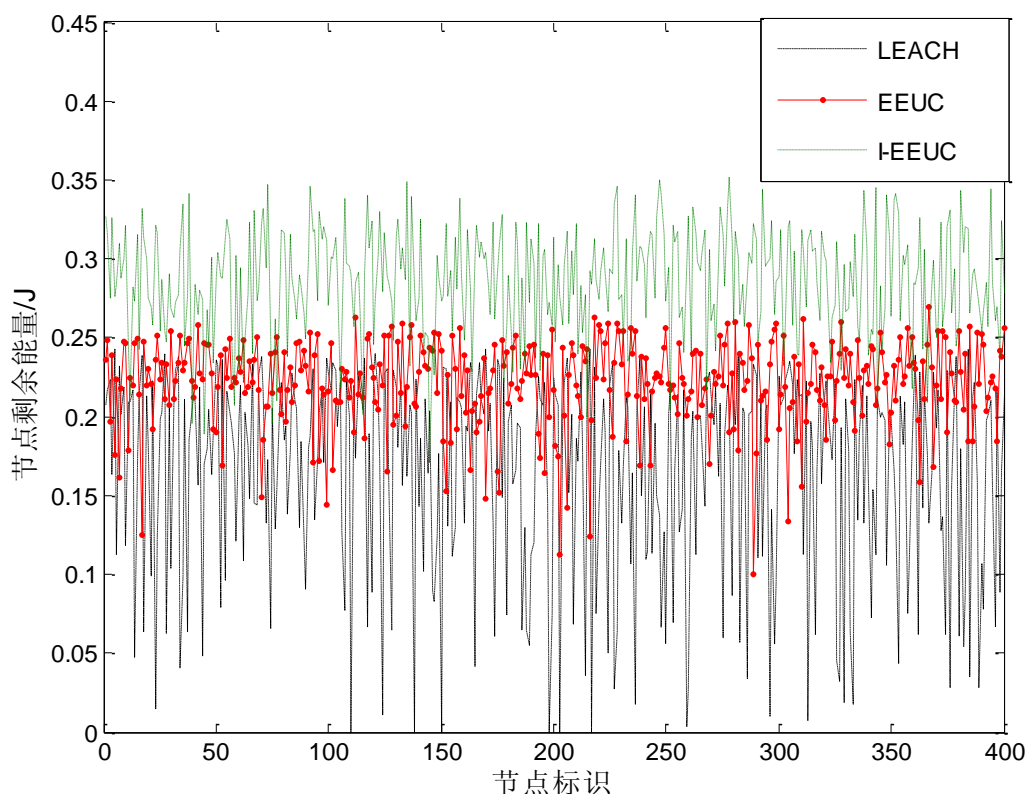


图 3.11 各种协议第 250 轮节点剩余能量

I-EEUC 协议平均剩余能量大于 EEUC 协议，因为其采用相比 EEUC 协议较少的候选簇首竞争最终簇首和每两次数据收集周期后重新构造簇，节省了用于传输控制信息消耗的能量。正是因为 I-EEUC 协议每两次数据收集周期后重新构造簇，使得其在运行 250 轮时剩余能量方差大于 EEUC 协议。但是由图 3.11 可以看出，I-EEUC 协议中没有出现像 EEUC 协议中部分节点剩余能量远小于平均剩余能量值，因为 I-EEUC 协议采用改进的候选簇首选择策略和改进的下一跳簇首选择策略，使得网络中未出现部分节点剩余能量过低现象，因此 I-EEUC 协议有效地均衡了网络中节点能耗。

3.6.6 网络剩余能量

图 3.12 对应用三种协议的网络中剩余能量进行了仿真，从图中可以看出，I-EEUC 协议网络剩余能量曲线倾斜度明显小于 LEACH 协议和 EEUC 协议，其有效地降低了每轮中网络能量的消耗。以上现象的原因是，LEACH 协议簇首与汇聚点之间采用单跳通信方式，而 I-EEUC 协议与 EEUC 协议一样采用多跳通信方式，节省了簇首能耗，因此 LEACH 协议网络剩余能量下降最快。I-EEUC 协议与 EEUC 协议相比，采用每两次数据收集周期后重新构造簇，节省了网络中用于传输控制信息的能量，所以其网络剩余能量比 EEUC 协议下降的慢。

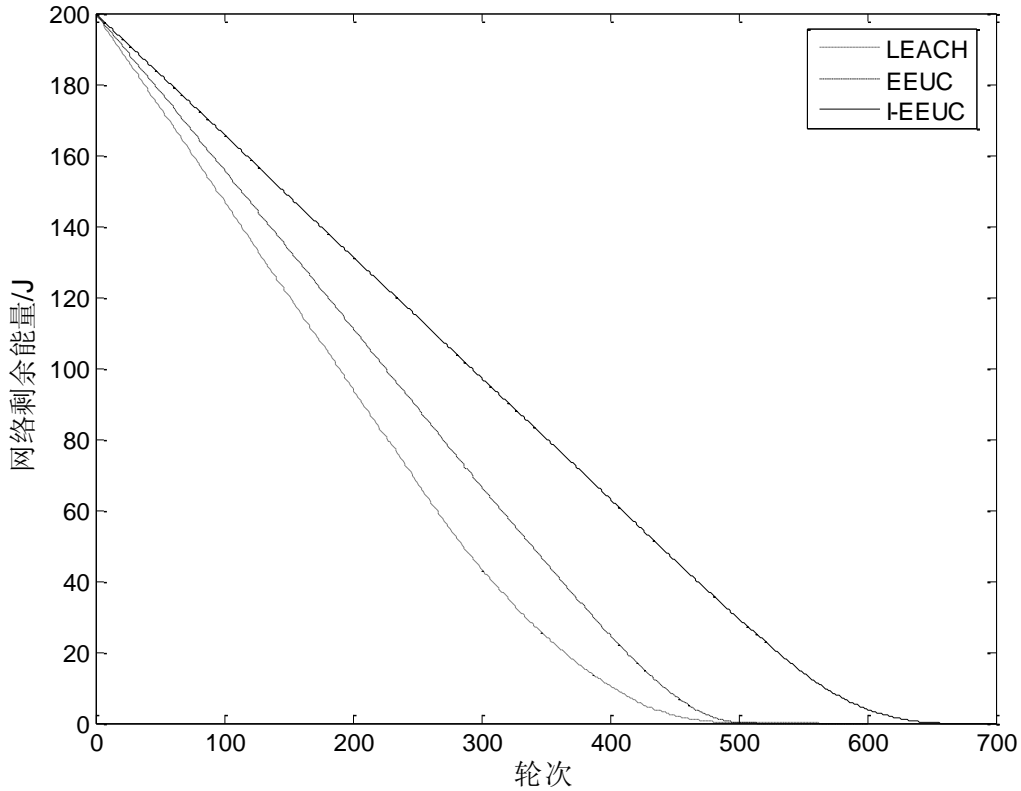


图 3.12 I-EEUC 协议网络剩余能量

3.6.7 网络生命周期及能量效率

本小节比较三种路由协议的网络生命周期，如图 3.13 所示，LEACH、EEUC 和 I-EEUC 协议中第一个节点死亡时间分别为 241 轮、270 轮和 465 轮，网络中一半节点死亡时间分别为 414 轮、468 轮和 597 轮，节点全部死亡时间分别为 563 轮，515 轮和 657 轮。网络的生命周期若以第一个节点死亡时间记，I-EEUC 比 LEACH 延长了 92.9%，比 EEUC 延长了 72.2%；若以网络中一半节点死亡时间记，I-EEUC 比 LEACH 延长了 44.2%，比 EEUC 延长了 27.6%。I-EEUC 协议无论是第一节点死亡时间还是网络中一半节点死亡时间都优于其他两种协议，可见 I-EEUC 协议有效地延长了网络的生命周期。

文献[21]中将能量效率定义为第一个节点死亡时间与最后一个节点死亡时间的比率，其越大说明节点能耗越均衡，网络中能量使用越高效。虽然 I-EEUC 协议每两次数据收集周期后重新构造簇，但是 I-EEUC 协议由于采用改进的簇首选择策略与下一跳选择策略，使得它从第一个节点死亡时间到最后一个节点死亡时间跨度与 LEACH、EEUC 相比仍然最短，其能量效率为 70.8%，而 LEACH 为 42.8%，EEUC 为 52.4%。由此再次验证了 I-EEUC 协议有效地均衡了节点能耗，使网络中能量使用更高效。

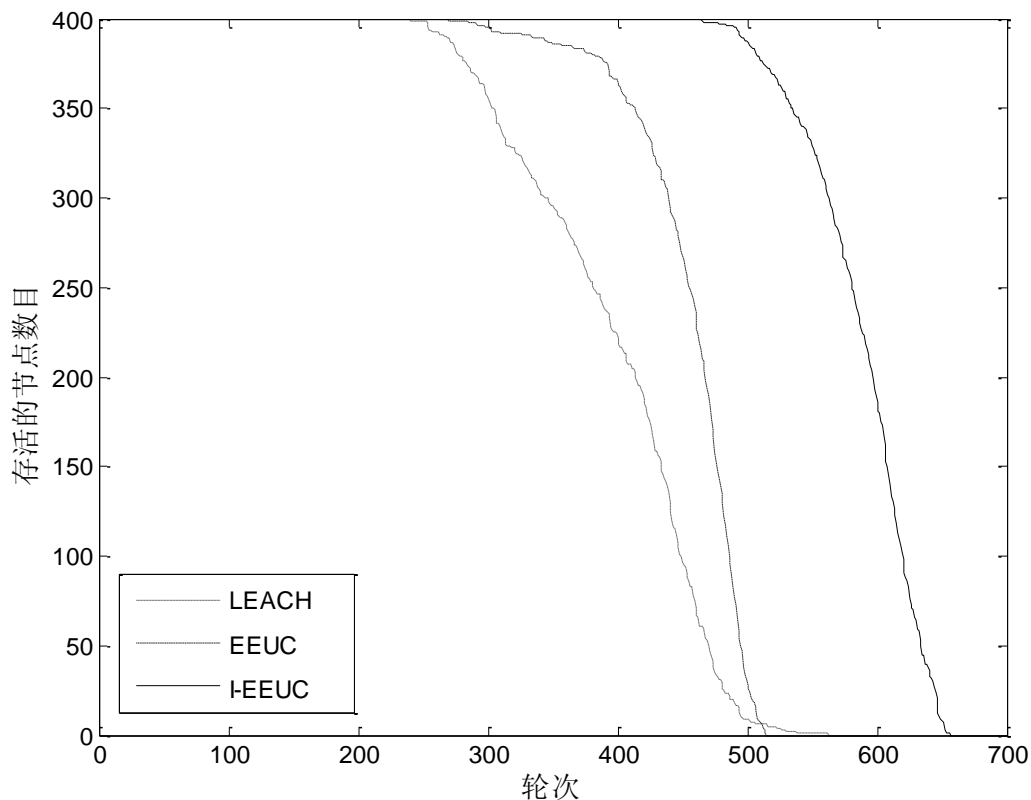


图 3.13 I-EEUC 协议网络生命周期

3.7 本章小结

本章首先 I-EEUC 协议的设计进行详细描述, 然后 I-EEUC 协议成簇阶段与数据传输阶段进行仿真, 最后对 LEACH 协议、EEUC 协议、I-EEUC 协议在各性能方面进行仿真比较。I-EEUC 协议与 EEUC 协议一样, 候选簇首在其竞争半径内竞争产生最终簇首, 使得节点竞争半径内只有一个最终簇首。通过仿真可以验证, I-EEUC 协议产生的最终簇首的分布中未出现多个簇首相隔较近的现象, 簇首分布合理。通过仿真可以看出, I-EEUC 协议与 LEACH 协议和 EEUC 协议相比, I-EEUC 协议使得网络中簇首消耗的能量总和最小, 其不但均衡了簇首间能耗, 还更好地实现了让普通节点轮流担任最终簇首的目的。

第四章 EBC 协议的设计与仿真

4.1 问题描述

在 LEACH 协议中由于采用随机生成簇首的方式,使得它产生的簇首数目不固定,波动大。在 EEUC 协议中虽然产生的簇首数据相对稳定^[27],但是在建簇过程中消耗了较多的能量。EEUC 协议试图采用非均匀分簇方式来避免 LEACH 协议中出现的“热区”问题,虽然 EEUC 协议使第一个死亡节点时间得到了延长,但靠近汇聚点的节点最终还是比远离汇聚点的节点死亡时间早。

为了解决上述问题,本文提出能量消耗均衡的分簇 (Energy Balanced Clustering 简称 EBC) 协议。EBC 协议在网络进入第一轮工作时采用二次选举的方式选出簇首,在以后的轮次中选择上一轮每个簇内剩余能量最大的成员节点担任该轮的簇首,以便均衡节点间的能耗。EBC 协议采用分簇方式,为了避免离汇聚点近的簇首由于较多地转发其他簇首数据而消耗能量过多, EBC 协议中簇首与汇聚点间的通信采用多跳与单跳相结合的方式。

4.2 EBC 协议的设计

4.2.1 簇首的选举与簇内路由的建立

无线传感器网络中传感器节点部署后,汇聚点以一定的功率向全网广播一个信号。所有节点根据接收到的信号强度计算出它到汇聚点的近似距离 $d(s_i, DS)$, 接下来进行簇首的选举与簇内路由的建立,详细过程如下:

(1) 网络运行开始时网络中每个节点产生一个 0~1 随机数 t , 若 t 小于 T ($T=0.4$) 则该节点成为候选簇首, 候选簇首以 d_0 为竞争半径广播一个消息, 消息的内容为节点的标识。若 t 大于或等于 T 则设置自身为普通节点, 并进入睡眠状态。

(2) 候选簇首接收其他候选簇首发送来的消息, 并按式(3.5)建立邻候选簇首集合。

(3) 比较自身标识是否为邻候选簇首集合中的最大值, 若是则转(5), 若不是则等待比它标识大的候选簇首发送消息。

(4) 若接收到其邻候选簇首集合中标识比自身大的节点发送成为簇首的消息, 则候选簇首立即设置自身为普通节点, 并以 d_0 为半径广播退出竞争簇首消息; 若收到其邻候选簇首集合

中标识比自身大的节点退出竞争簇首的消息，则将此候选簇首从其邻候选簇首集合中删除，转(3)。

(5) 成为簇首，向全网广播此消息。

(6) 普通节点收到簇首发来的消息后选择向接收到的信号最强的簇首发送加入请求消息，消息包括所加入簇首的标识，自身的剩余能量和标识。

(7) 簇首确定簇内成员数，选出剩余能量最大的成员节点，然后向全网广播一条消息，包括簇首自身标识、节点剩余能量、簇内成员节点数量和其到汇聚点的距离。

(8) 收到该消息的其他簇首，根据收到的信号强度近似计算它们的距离，并根据簇内所拥有的最多的成员数量确定统一的时隙数，建立 TDMA 时隙表。簇首广播为每个簇内成员分配发送信息的时隙，同时通知簇内剩余能量最大的节点充当下一轮中的簇首。

(9) 数据传输阶段结束后，进入下一轮时转(5)。

4.2.2 数据传输阶段

簇首选举与簇内路由建立完成后，进入数据传输阶段。此阶段可以分为簇间路由的建立阶段与稳定的数据传输阶段，接下来首先介绍簇间路由的建立。簇首拿自身与汇聚点距离 $d(s_i, DS)$ 与阈值 TD_MAX ^[27] 比较，若 $d(s_i, DS)$ 小于 TD_MAX 则与汇聚点之间采用单跳通信，否则采用多跳通信。多跳路由建立过程如下：簇首 i 首先建立满足式(4.1)的下一跳节点集合 $i.R_{CH}$ ，若集合 $i.R_{CH}$ 为空，则簇首 i 与汇聚点直接通信，否则选择集合 $i.R_{CH}$ 中能量指标最小的节点作为下一跳节点。

$$i.R_{CH} = \{j | d(j, DS) < d(i, DS) \text{ 且 } j.E > i.E \text{ 且 } 2E_{elec} + \varepsilon_{fs}(d(i, j)^2 + d(j, DS)^2) < \varepsilon_{mp}d(i, DS)^4\} \quad (4.1)$$

其中， $i.E$ 为簇首 i 的剩余能量， $d(i, DS)$ 表示簇首 i 到汇聚点的距离。

由式(3.10)可以计算出簇首 i 选择簇首 j 为下一跳节点，传送 k bit 数据给汇聚点，网络中传输该消息一共需要的能量为 $3kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}(d^2(i, j) + d^2(j, DS))$ 。假设簇首 i 与汇聚点距离大于 d_0 ，若采用单跳传输该数据消耗的能量为 $k(E_{elec} + \varepsilon_{mp}d^4(i, DS))$ 。由式(4.1)可以看出，当满足 $3kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}(d^2(i, j) + d^2(j, DS)) < k(E_{elec} + \varepsilon_{mp}d^4(i, DS))$ 即 $2E_{elec} + \varepsilon_{fs}(d(i, j)^2 + d(j, DS)^2) < \varepsilon_{mp}d(i, DS)^4$ 时，簇首 j 才被加入下一跳节点集合，以此减少网络中能量的消耗。由式(4.1)还可以看出，只有当簇首 j 的剩余能量大于 i 并且其距离汇聚点更近时才有可能充当簇首 i 的

下一跳节点，此约束用来均衡离汇聚点远近不同的簇首间能耗。因为当离汇聚点近的簇首剩余能量大于离汇聚点远的簇首剩余能量时，簇间采用多跳通信，使得离汇聚点近的簇首消耗更多的能量；而当离汇聚点近的簇首剩余能量小于离汇聚点远的簇首剩余能量时，离汇聚点远的簇首将与汇聚点之间采用直接通信方式，使得这部分簇首能量减少得较快。在路由建立阶段完成后，进入稳定的数据传输阶段，此过程与 I-EEUC 协议一样。

4.3 仿真实验与结果分析

使用 matlab7.0 对 LEACH、EEUC 以及 EBC 协议在节点死亡分布均匀性、生命周期、能量效率等性能上进行仿真比较，仿真中对来自不同簇的数据不进行数据融合。采用与 I-EEUC 协议一样的网络模型与通信能耗模型，并且假设采用理想 MAC 协议。与 I-EEUC 协议一样，实验中统计传感器节点接收，发送数据包与控制包，融合数据消耗的能量，仿真参数见表 3.1。

4.3.1 死亡节点分布

本小节研究 LEACH 协议、EEUC 协议和 EBC 协议在网络中三分之一节点死亡时死亡节点分布情况。由图 4.1 可以看出 LEACH 协议中离汇聚点远的节点过早死亡，因为簇首与汇聚点间通信采用单跳方式，使得离汇聚点远的簇首消耗更多的能量。

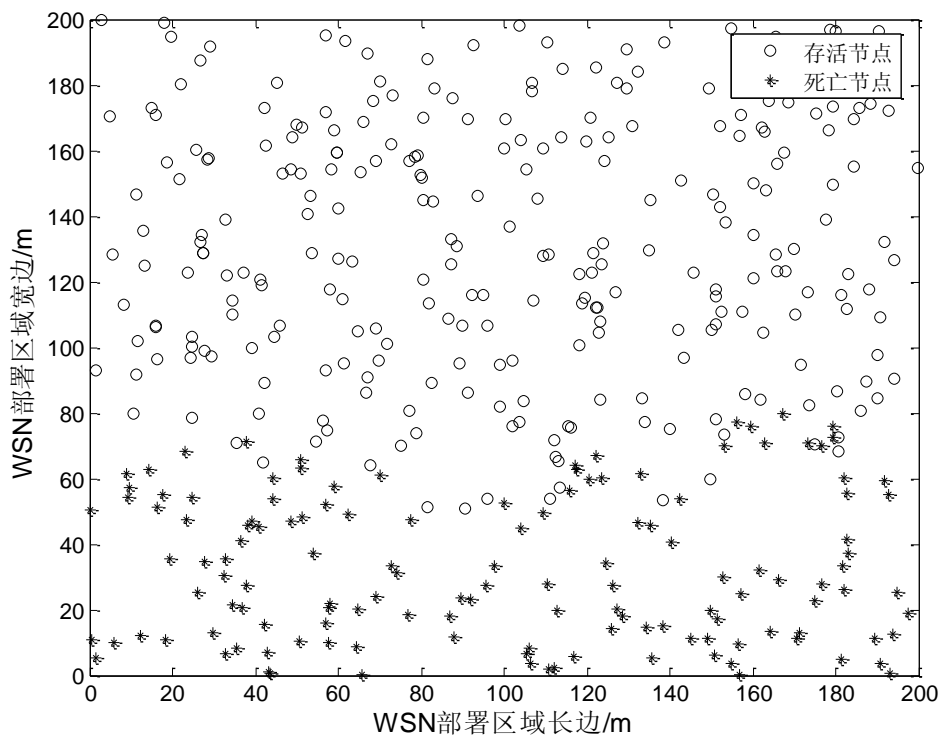


图 4.1 LEACH 协议死亡节点分布

虽然 EEUC 协议延长了网络中第一个节点死亡时间, 但由图 4.2 可以看出 EEUC 协议最终仍使得离汇聚近的节点比离汇聚点远的节点早死亡。由图 4.3 可以看出, EBC 协议中死亡节点分布较均匀, 很好地解决了“热区”问题。

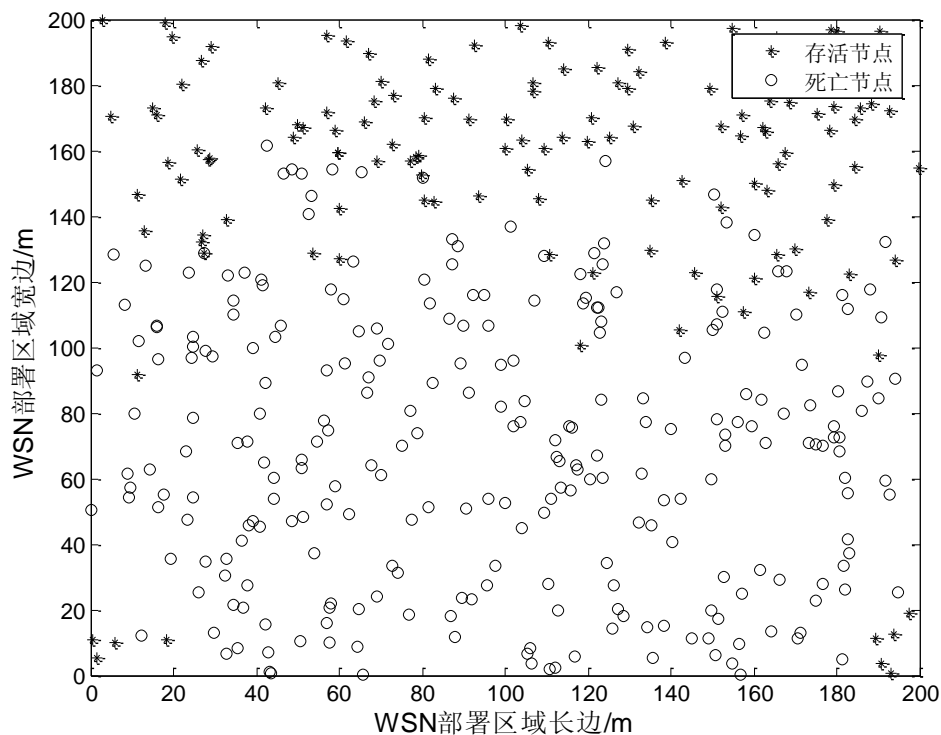


图 4.2 EEUC 协议死亡节点分布

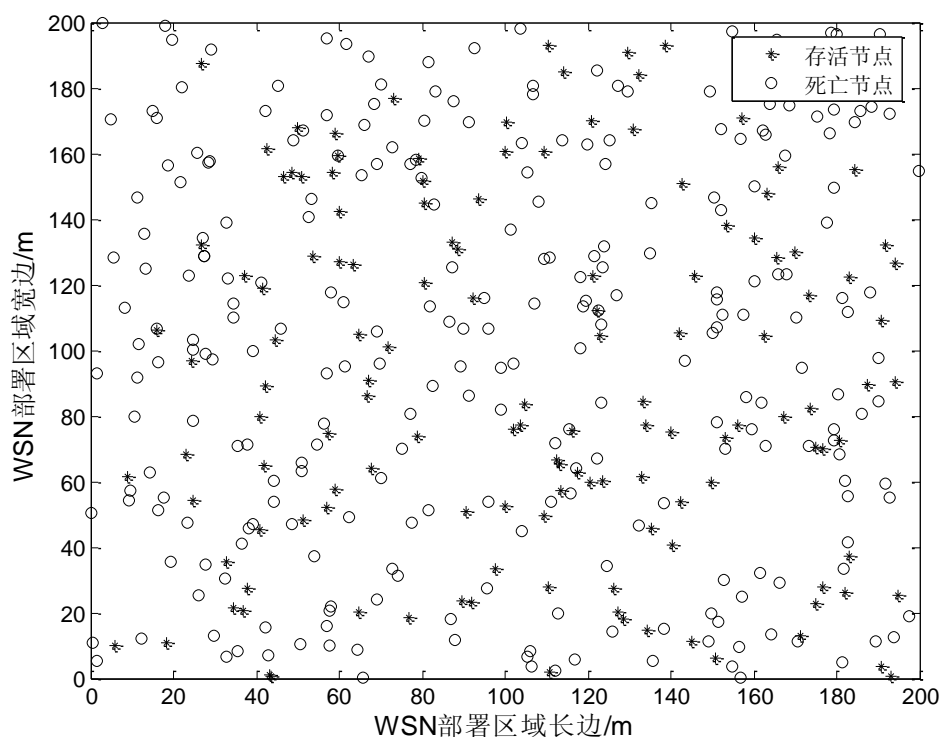


图 4.3 EBC 协议死亡节点分布

4.3.2 网络剩余能量

图 4.4 对应用 LEACH、EEUC 与 EBC 三种协议的网络中剩余能量进行了仿真，从图中可以看出，EBC 协议网络剩余能量曲线倾斜度小于 LEACH 协议和 EEUC 协议，其有效地降低了每轮中网络能量的消耗。以上现象的原因是，LEACH 协议簇首与汇聚点之间采用单跳通信方式，因此 LEACH 协议网络剩余能量下降最快。EEUC 协议簇首与汇聚点之间采用多跳通信方式，节省了簇首能耗，因此 EEUC 协议网络剩余能量下降得比 LEACH 协议慢。EBC 协议簇首与汇聚点之间采用多跳与单跳相结合的通信方式，应该比 EEUC 协议网络剩余能量下降得快，但是 EBC 协议在每轮选择簇首时，利用上一轮簇首向簇内成员节点发送时隙信息时通知下一轮簇首标识，从而节省了网络中用于选择簇首，传输控制消息的能耗。因此，EBC 协议与 LEACH、EEUC 协议相比，其网络剩余能量下降最慢。

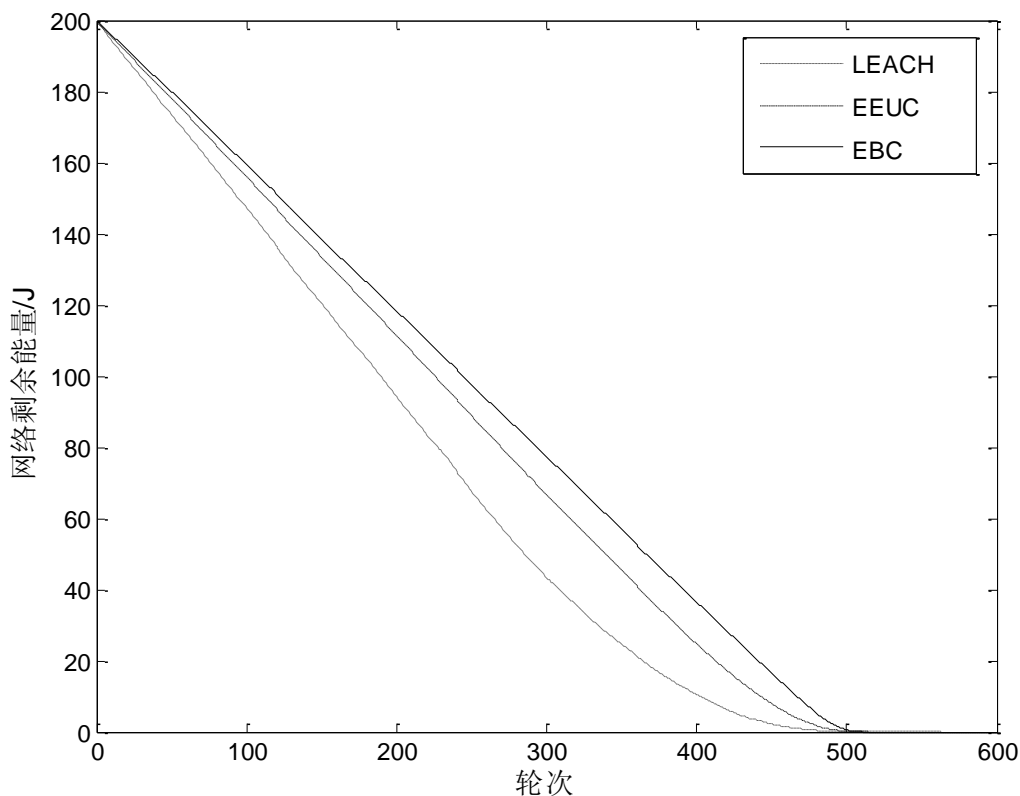


图 4.4 EBC 协议网络剩余能量

4.3.3 网络生命周期及能量效率

本小节比较 LEACH、EEUC 与 EBC 三种路由协议的网络生命周期，如图 4.5 所示，LEACH、EEUC 和 EBC 协议中第一个节点死亡时间分别为 241 轮、270 轮和 438 轮，网络中一半节点死亡时间分别为 414 轮、468 轮和 495 轮，节点全部死亡时间分别为 563 轮，515 轮

和 511 轮。网络的生命周期若以第一个节点死亡时间记，EBC 比 LEACH 延长了 81.7%，比 EEUC 延长了 62.2%；若以网络中一半节点死亡时间记，EBC 比 LEACH 延长了 19.6%，比 EEUC 延长了 5.8%。EBC 协议网络第一节点死亡时间明显优于其他两种协议，虽然 EBC 协议网络中一半节点死亡时间与其他两种协议相比优势不明显，但是由 4.2.1 小节可知 EBC 协议使得网络中死亡节点分布均匀，避免了信息空洞问题。

EBC 协议的能量效率为 85.7%，而 LEACH 为 42.8%，EEUC 为 52.4%。由于 EBC 协议始终让簇内剩余能量最多的成员节点担任下一轮的簇首，并且它采用单跳与多跳相结合的通信方式，使得网络中第一个节点死亡时间比 LEACH 协议与 EEUC 协议都晚而最后一个节点死亡时间比它们都早，因此 EBC 协议的能量效率最高。在实际应用中当网络存活节点较少时整个网络已经无法满足人们获取信息的需求。

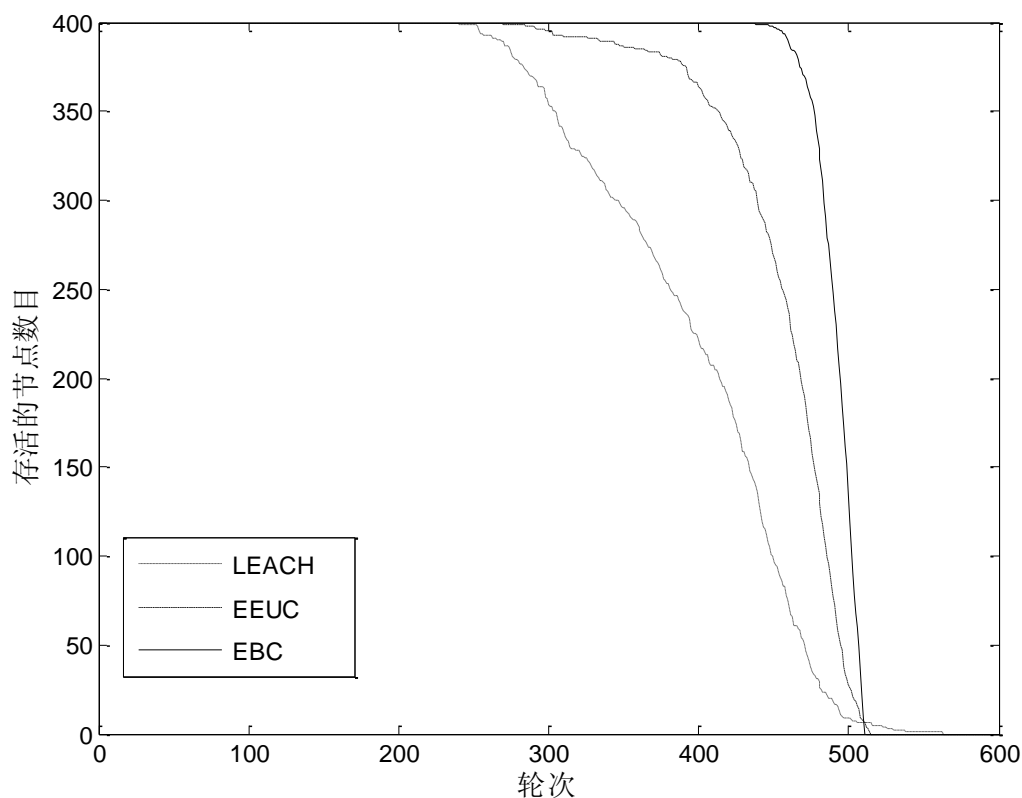


图 4.5 EBC 协议网络生命周期

4.4 本章小结

针对 LEACH 协议与 EEUC 协议中死亡节点分布不均问题，本章提出 EBC 协议，并对 EBC 协议簇首选举与路由建立过程进行详细描述，最后通过仿真验证了 EBC 协议使得死亡节点分布更均衡，同时它有效地延长了网络中第一个节点死亡时间，其能量效率比其他两种协议都高。

第五章 总结与展望

5.1 总结

无线传感器网络是一种新兴的多功能无线自组织网络，它涉及了多种高新技术，包括传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及通信技术和信号处理等多项关键技术。传感器节点组成的网络系统很多领域具有十分广阔的应用前景，已成为 21 世纪最重要的技术之一。近年来，由于传感器节点逐渐集成化和微型化，其大多采用能量受限的电池作为供电单元。并且传感器节点通常被部署在人类难以接近的特殊或危险的环境，很难对它们进行能源的二次补给。与此同时，可再生能源技术目前还尚未达到成熟。因此通过提高网络能量效率，最大限度地延长网络生命周期已经成为路由协议设计时主要的考虑因素之一。

本文在对典型的均匀分簇路由协议 LEACH 和非均匀分簇路由协议 EEUC 研究的基础上，提出了 I-EEUC 协议与 EBC 协议，通过仿真验证了 I-EEUC 协议与 EBC 协议提高了网络能量效率，延长了网络生命周期。

本文所做的主要研究工作如下：

(1) 针对 LEACH 协议中簇首与汇聚点单跳通信导致簇首间能耗的不均问题，及 EEUC 协议中为了得到较优的最终簇首而使全网中百分之四十的节点参与最终簇首的竞争，导致网络在传输控制信息上浪费了较多的宝贵能量问题。本文提出了改进的 I-EEUC 协议，改进的路由协议综合了 LEACH 协议和 EEUC 协议选簇首策略的优点，在选最终簇首时既考虑了让节点轮流担任最终簇首，又考虑了节点剩余能量，从而实现均衡节点间能耗。

(2) 针对 EEUC 协议中的不足做出改进，EEUC 协议在建立簇首路由时，主要考虑了网络能量开销指标，从使得网络能量开销指标最小与次小的节点中选择剩余能量较大的节点作为下一跳节点，改进的 I-EEUC 协议在选择下一跳时，提出选择下一跳公式，公式中不但考虑了网络能量开销指标和节点剩余能量，还考虑了簇内成员数量；EEUC 协议中为了最大化网络能量效率，采用每一次数据收集周期后重新构造簇，带来了过多能量消耗，改进的 I-EEUC 协议采用每两次数据收集周期后重新构造簇。I-EEUC 协议为了避免远距离传输带来过多的能量消耗，取消 EEUC 协议中距离汇聚点小于 140m 时采用单跳与汇聚点通信的限制。

(3) 采用 Matla7.0 对 I-EEUC 协议建簇过程进行仿真，然后对 LEACH 协议、EEUC 协议和 I-EEUC 协议从簇首间能耗均衡性、网络能耗均衡性、生命周期、能量效率等性能方面进行仿真比较。

(4) 针对 LEACH 协议与 EEUC 协议中死亡节点分布不均问题, 提出能量消耗均衡的分簇协议 (EBC 协议), 并对其进行详细描述。最后从死亡节点分布、网络生命周期、能量效率三个方面对 LEACH 协议、EEUC 协议与 EBC 协议进行仿真比较。

5.2 展望

由于无线传感器网络中基本单位传感器节点自身所具有的特点, 和近几年无线传感网络中高新技术的发展, 使得它在各个领域中的应用越来越广泛, 研究它的人也越来越多, 其中无线传感器网络路由协议已经成为研究热点之一。由于研究时间和个人水平有限, 本文的研究工作还不够完善, 还有以下需要改进的地方:

(1) 本文提出的 I-EEUC 协议是对 EEUC 协议的改进。所以它跟 EEUC 一样在生成最终簇首过程中消耗了较多的能量。下一步工作是寻找新方法来减少传输控制信息带来的能量消耗。

(2) 为了提高网络能量效率, EEUC 协议和 I-EEUC 协议都采用了频繁建簇策略, 虽然它们适用于对采集信息精确度要求较高的应用环境, 但在对采集信息精确度要求不高的应用环境中没有显示出优势。下一步工作就是利用 I-EEUC 协议中多跳与非均匀分簇思想设计适合用于对采集信息精确度要求不高的应用环境的协议。

(3) EBC 协议为了使死亡节点在全网中分布均匀, 簇首采用单跳与多跳相结合的方式与汇聚点通信, 其中单跳通信方式增加了网络能量消耗。下一步工作就是找出既能使死亡节点分布均匀又能节省网络能量的协议。

参考文献

- [1] Akkaya K, Younis M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3(3): 325-349.
- [2] Akyildiz I F, Weilian S, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102-114.
- [3] Al-Karaki J N, Kamal A E. Routing techniques in wireless sensor networks: A Survey[J]. *IEEE Wireless Communications*. 2004, 11(6): 6-28.
- [4] Arici T, Altunbasak Y. Adaptive sensing for environment monitoring using wireless sensor networks[C]. In *Proceeding of the IEEE wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2004, 5(1): 2350-2355.
- [5] Braginsky D, Estrin D. Rumor routing algorithm for sensor networks [A]. *Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA)*[C] , Atlanta, GA, October. 2002.
- [6] Bult K. Low power systems for wireless microsensors[C]. *International Symposium on Low Power Electronics and Design*, 1996: 17-21.
- [7] Byrne J A. 21 ideas for 21st century[J]. *Business Week*, 1999, 8: 78-167.
- [8] Callaway E H. Wireless sensor network: Architecture and protocols[M]. New York: Auerbach Publications, 2003.
- [9] 陈仲琰. 无线传感器网络中负载均衡的非均匀分簇算法[D]. 南京: 南京邮电大学, 2011.
- [10] 董杨, 郭拯危, 王青正. 一种基于非均匀分簇的WSN路由协议[J]. *郑州轻工业学院学报(自然科学版)*, 2009, 24(6): 70-74.
- [11] Essa I A. Ubiquitous sensing for smart and aware environments[J]. *IEEE Personal Communications*, 2000, 7(5): 47-49.
- [12] Estrin D. Wireless sensor networks tutorial part IV: Sensor network protocols[C]. *Proceedings of the ACM Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Atlanta, Georgia, USA: IEEE, 2002: 23-28.
- [13] Estrin D, Govindan R, Heidemann J, et al. Next century challenges: Scalable coordinate in sensor networks[C]. *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*, 1999: 263-270.
- [14] Guo S J, Zheng J, Qu Y G, et al. Clustering and multi-hop routing with power control in wireless sensor networks[J]. *The Journal of China University of Posts and Telecommunications*, 2007, 14(1): 49-57.
- [15] Haas Z J, Halpern J Y, Li L. Gossip-based ad hoc routing[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2006, 14(3): 479-491.
- [16] Handy M J, Haase M, Timmermann D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection[C]. *Proceedings of Conference on Mobile and Wireless Communications Network*. Sweden: IEEE Computer Society 2002: 368-372.
- [17] Hedetniemi S M, Hedetniemi S T, Liestman A L. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks[J]. *Networks*, 1988, 18(4): 319-349.
- [18] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. *IEEE Trans. Wireless Comm.*, 2002, 1(4): 660-670.
- [19] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]. *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Maui, HI, 2000: 1-10.
- [20] Hewish M. Little brother is watching you: unattended ground sensors[J]. *Defense Review*, 2001, 34(6): 46-52.

- [21] 黄小青. 大规模WSN中基于分环分簇的能量高效路由协议研究[D]. 长沙: 中南大学硕士学位论文, 2011.
- [22] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, et al. Directed diffusion for wireless sensor networking[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, 11(1): 2-16.
- [23] 江海峰. 无线传感器网络能量优化路由算法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学博士学位论文, 2010.
- [24] 江海峰, 钱建生, 李世银, 等. 簇头负载均衡的无线传感器网络分簇路由协议[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(23): 111-114.
- [25] Krishnamachar B, Estrin D, Wicker S. The impact of data aggregation in wireless sensor networks[C]. *Proceedings of the IEEE International Workshop on Distributed Event-Based Systems (DEBS)*, Vienna, Austria, 2002: 575-578.
- [26] Kulik J, Heinzelman W, Balakrishnan H. Negotiation based protocols for disseminating information in wireless sensor networks[J]. *Wireless Networks*, 2002, 8(2-3): 169-185.
- [27] 李成法, 陈贵海, 叶懋, 等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J]. *计算机学报*, 2007, 30(1): 27-36.
- [28] 李雷, 付东阳. 基于分层模型的无线传感器网络分簇路由算法[J]. *计算机技术与发展*, 2010, 20(1): 135-138.
- [29] Liliana M, Arboleda C, Nidal Nasser. Comparison of clustering algorithms and protocols for wireless sensor networks [C], *IEEE CCECE/CCGEI*: 2006: 1787-1792.
- [30] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: Power efficient gathering in sensor information systems [C]. *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana*, 2002.
- [31] Lindsey S, Raghavendra C S, Sivalingam K. Data gathering in sensor networks using the energy delay metric[C]. In *Proceeding of the IPDPS Workshop on Issues in Wireless Networks and Mobile Coputing'01*, 2001: 23-27.
- [32] 卢旭, 程良伦. 高数据融合的非均匀分簇无线传感器网络路由协议[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(4): 1269-1271.
- [33] Pottie G, Kaiser W. Wireless integrated network sensors[J]. *Communication of the ACM*, May 2000, 43: 51-58.
- [34] Ren F Y, Huang H N, Lin C. Wireless sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2003, 4(7): 1282-1291.
- [35] 宋文, 王兵, 周应宾. 无线传感器网络技术与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [36] Soro S, Heinzelman W B. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering[C]. *Proceedings of the 19th International Parallel and Distributed Processing Symosium*, 2005: 535-540.
- [37] 孙利民, 李建中, 陈渝, 朱红松等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [38] 唐宏, 谢静, 鲁玉芳等. 无线传感器网络原理及应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [39] 王家文, 王皓, 刘海. *Matlab7.0编程基础*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [40] 薛晓亮. 基于LEACH协议的WSN多跳非均匀分簇路由算法研究[D]. 上海: 华东理工大学硕士学位论文, 2010.
- [41] 杨永雷, 朱军. 无线传感器网络中异步成簇算法的研究[J]. *计算机技术与发展*, 2010, 20(2): 145-148.
- [42] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey[J]. *Computer Networks*, 2008, 52(2008): 2292-2330.
- [43] 汪寅. 动态最小生成树在WSN分簇路由协议中的应用[D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.
- [44] Younis O, Fahmy S. An experimental study of routing and data aggregation in sensor networks[C]. *Proceedings of the International Workshop on Localized Communication and Topology Protocols for Ad hoc Networks (LOCAN)*, Washing ton, DC, 2005.
- [45] 赵泽, 崔莉. 一种基于无线传感器网络的远程医疗监护系统[J]. *信息与控制*, 2006, 35(2): 265-269.
- [46] 朱近康. 无线传感器网络技术[J]. *中兴通讯技术*, 2004, 10(B10): 14-15.

附录 1 攻读硕士学位期间撰写的论文

- [1] 唐加山,王燕. 无线传感器网络中改进的 EEUC 路由协议研究[J], 重庆邮电大学学报(自然科学版), 已录用 (2013 年 2 月) 1-6.

致谢

时光荏苒如白驹过隙，研究生生活即将结束，回想起这近三年的点点滴滴，感慨颇多。在这期间，老师、同学、朋友以及我的家人给予我无尽的帮助和关心，在此谨向他们表示最诚挚的谢意。

感谢唐加山教授，感谢唐老师在科研学习、生活中的指导与关怀。唐老师严谨的治学态度、渊博的专业知识、深厚的学术功底、开阔的研究思路、严谨求实的工作作风使我敬佩不已，受益匪浅。在此特向他表达最美好的祝愿和最真挚的感谢！

其次感谢本教研室马庆涛、王翠和师弟师妹，室友张豫婷、蔡婷、杨召君、张永芹，以及刘国庆同学在生活和学习上给我的巨大帮助。

最后十分感谢在百忙之中抽出时间评审我论文的各位老师，谢谢！

王 燕

2013 年 3 月 于南京