

硕士学位论文
(工程硕士)

无线传感器网络聚类路由
协议的研究与仿真

THE STUDY AND SIMULATION OF CLUSTERING ROUTING
PROTOCOL FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

关心



哈爾濱工業大學

2007 年 10 月

国内图书分类号：TP393.4

国际图书分类号：681.14

工程硕士学位论文

无线传感器网络聚类路由协议的研究 与仿真

硕士研究生：关心

导师：马培军教授

副导师：洪海教授

申请学位：工程硕士

学科、专业：软件工程

所在单位：软件学院

答辩日期：2007年10月

授予学位单位：哈尔滨工业大学

Classified Index: TP393.4

U.D.C.: 681.14

Dissertation for the Master's Degree in Engineering

THE STUDY AND SIMULATION OF CLUSTERING ROUTING PROTOCOL FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

Candidate:	Guan Xin
Supervisor:	Prof. Ma Peijun
Associate Supervisor:	Prof. Hong Hai
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Software Engineering
Affiliation:	School of Software
Date of Defence:	October, 2007
Degree-Confering-Institution:	Harbin Institute of Technology

摘 要

无线传感器网络（WSN）是最近几年发展起来的一项新技术，它最早用于军事领域，如今的低成本传感器节点已经可以应用于空间探测、辐射检测、洪灾预警、农田管理、生物群落观测、机动目标跟踪、环境和气象监测、智能交通和智能家居等众多领域。无线传感器网络融合了传感器技术、嵌入式技术和网络通信技术等当今众多热门技术，其发展已被国务院写入了《国家中长期科学和技术发展规划纲要》，传感器网络离我们越来越近了。

无线传感器网络与传统网络通信技术相比有很多不同之处，研究如何优化网络层路由算法以降低节点能耗是其关键性问题之一。首先介绍了无线传感器网络体系结构和基本特征，在此基础上概述现有的平面、层次以及位置辅助路由协议或算法，并作了必要的分析和比较。进而详细研究了经典的簇划分协议—LEACH。在全面分析簇划分算法的基础上，提出一种全新的基于层次结构的路由算法—Modified - LEACH（MD-LEACH）。MD-LEACH的基本思想是在已知节点位置信息的基础上，将感知区域划分为半径相等的圆，圆的最优半径通过能量模型加以确定。簇首通过比较圆形簇内所有节点与圆心节点的距离，得到最近距离的节点被指定成为簇首，这种簇首选择的方式可以使簇内节点与簇首通信时的能耗更加均衡；产生簇首的同时，为了增加网络的容错性，选出距圆心次近的节点作为备用簇首；簇首确定后，通知簇内节点簇首 ID 等信息，建立 TDMA 时隙并下发给所有簇内节点；簇首完成簇内数据融合后，通过多跳方式将数据传送至基站。最后，本文利用 NS-2 仿真平台，对 LEACH 和 MD-LEACH 协议进行仿真和比较，结果表明，本设计算法对 LEACH 算法，能更有效利用网络资源，延长网络生命周期。

关键词 无线传感器网络；路由协议；聚类

Abstract

Wireless sensor networks (WSN) are new technology developed in recent years. At first it was used to the military sphere, and today low-cost sensor nodes can be applied to space exploration, radiation monitoring, flood warning, farmland management, mobile target tracking, environmental monitoring, intelligent traffic and intelligent home. Wireless sensor networks integration of sensor technology, embedded technology and network communications technology, development work related has been included in the “Outline of the state medium – and long-term scientific and technological development program,” WSN will be getting closer and closer to us.

Wireless sensor networks are different from traditional communication technologies, what is studied here is how to optimize the network layer routing algorithm to reduce energy consumption. We introduced the wireless sensor network architecture and basic characteristics. On this basis, I summary the flat, cluster and location based protocols. On the classical LEACH protocol, I make the detail analysis. In this paper, I take a new protocol which named MD-LEACH. The main theory of MD-LEACH is location based, it divided the sense zone into some circle, and the optimal radius depends on the energy model. The cluster heads are the nearest to the central of the circle, the advantage is that the energy consumption is balanced. At the same time, the network will appoint a backup cluster head to improve the network’s performance. When the cluster head were conform, they will broadcast the TDMA slots to all the nodes which in the same cluster. After the transmission, the cluster head will transmit the information to base station by multi-hop approach. In the end, I simulate the two protocol which LEACH and MD-LEACH, comparing and analyzing the results. The results show that MD-LEACH has the higher performance on prolonging the lifetime of the wireless sensor networks.

Keywords Wireless Sensor Network, Routing Protocol, Clustering

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第 1 章 绪论	1
1.1 课题的背景及研究目的	1
1.2 与课题相关的国内外研究综述	2
1.2.1 国外无线传感器网络研究现状.....	2
1.2.2 国内无线传感器网络研究现状.....	4
1.3 本论文的主要工作内容	4
第 2 章 无线传感器网络路由协议相关技术.....	6
2.1 有效能量的无线传感器网络简介	6
2.2 无线传感器网络路由协议的分类	7
2.3 无线传感器网络现有路由协议分析	9
2.3.1 SPIN 协议.....	9
2.3.2 MTE 协议	11
2.3.3 定向扩散协议.....	12
2.3.4 LEACH 协议	12
2.3.5 TEEN 协议.....	14
2.4 本章小结	15
第 3 章 聚类路由算法分析与改进算法的研究.....	16
3.1 需求分析	16
3.2 开发平台	17
3.3 LEACH 算法研究与分析	21
3.3.1 LEACH 算法概述.....	21
3.3.2 LEACH 算法的物理模型	21
3.3.3 LEACH 算法的具体描述	22
3.4 聚类路由改进算法的研究.....	26
3.4.1 感知节点位置信息的取得	27
3.4.2 感知区域内最优簇头数量的计算.....	27
3.4.3 最优簇半径的确定	29
3.4.4 簇首节点的确定及工作方式	32

3.4.5 簇内节点与簇首之间数据传递次序	33
3.4.6 簇间传输方式	33
3.5 本章小结	35
第 4 章 算法实现及算法结果的验证与评价	36
4.1 系统实现	36
4.1.1 LEACH 协议的仿真实现	36
4.1.2 MD-LEACH 协议的仿真实现	40
4.2 分析及仿真结果	46
4.2.1 节点数量与运行时间的关系	47
4.2.2 基站位置对性能的影响	48
4.2.3 感知区域面积对性能的影响	50
4.3 无线传感器网络的农业应用	52
4.3.1 温室环境应用	53
4.3.2 节水灌溉	53
4.3.3 环境监测及动物监测	53
4.4 本章小结	54
结 论	55
参考文献	56
哈尔滨工业大学硕士学位论文原创性声明	60
哈尔滨工业大学硕士学位论文使用授权书	60
哈尔滨工业大学硕士学位论文涉密论文管理	60
致 谢	61
个人简历	62

第 1 章 绪论

1.1 课题的背景及研究目的

更小、更廉价的低功耗计算设备代表的“后 PC 时代”冲破了传统台式计算机和高性能服务器的设计模式；普遍的网络化带来的计算处理能力是难以估量的；微机电系统(micro-electro-mechanism system, 简称 MEMS)的迅速发展奠定了设计和实现片上系统(system on chip, 简称 SOC)的基础。以上三方面的高度集成又孕育出了许多新的信息获取和处理模式, 传感器网络就是其中一例^[1]。

随机分布的集成有传感器、数据处理单元和通信模块的微小节点通过自组织的方式构成网络, 借助于节点中内置的形式多样的传感器测量所在周边环境中的热、红外、声纳、雷达和地震波信号, 从而探测包括温度、湿度、噪声、光强度、压力、土壤成分、移动物体的大小、速度和方向等众多我们感兴趣的物质现象。在通信方式上, 虽然可以采用有线、无线、红外和光等多种方式, 但一般认为短距离的无线低功率通信技术最适合传感器网络使用, 为明确起见, 一般称作无线传感器网络。但也不绝对, Berkeley 的 Smart Dust 因为可以像尘埃一样悬浮在空中, 有效地避免了障碍物的遮挡, 因此采用光作为通信介质^[2,3]。

无线传感器网络与传统的无线网络(如 WLAN 和蜂窝移动电话网络)有着不同的设计目标, 后者在高度移动的环境中通过优化路由和资源管理策略最大化带宽的利用率, 同时为用户提供一定的服务质量保证^[4]。在无线传感器网络中, 除了少数节点需要移动以外, 大部分节点都是静止的。因为它们通常运行在人无法接近的恶劣甚至危险的远程环境中, 能源无法替代, 设计有效的策略延长网络的生命周期成为无线传感器网络的核心问题。当然, 从理论上讲, 太阳能电池能持久地补给能源, 但工程实践中生产这种微型化的电池还有相当的难度。在无线传感器网络的研究初期, 人们一度认为成熟的 Internet 技术加上 Ad-hoc 路由机制对传感器网络的设计是足够充分的, 但深入的研究表明: 传感器网络有着与传统网络明显不同的技术要求。前者以数据为中心, 后者以传输数据为目的。为了适应广泛的应用程序, 传统网络的设计遵循着“端到端”的边缘论思想, 强调将一切与功能相关的处理都放在网络的端系统上, 中间节点仅仅负责数据分组的转发, 对于传感器网络, 这

未必是一种合理的选择。一些为自组织的 Ad-hoc 网络设计的协议和算法未必适合传感器网络的特点和应用的要求。节点标识(如地址等)的作用在传感器网络中就显得不是十分重要,因为应用程序不怎么关心单节点上的信息;中间节点上与具体应用相关的数据处理、融合和缓存也显得很有必要。在密集性的传感器网络中,相邻节点间的距离非常短,低功耗的多跳通信模式节省功耗,同时增加了通信的隐蔽性,也避免了长距离的无线通信易受外界噪声干扰的影响。这些独特的要求和制约因素为传感器网络的研究提出了新的技术问题^[5]。

在无线传感器网络的体系结构中,网络层中的路由协议非常重要。网络层主要的目标是:寻找用于传感器网络的高能效的路由建立和可靠的数据传输方法,从而使网络寿命最长^[6]。由于传感器网络有几个不同于传统无线传感网络的特点,因此它的路由非常有挑战性。首先,由于节点众多,不可能建立一个全局的地址机制;其次,产生的数据流量有显著的冗余性,因此可以利用数据聚合来提高能量和带宽的利用率;第三,节点能量和处理存储能力有限,需要精细的资源管理;最后,由于网络拓扑变化频繁,需要路由协议有很好的鲁棒性和可扩展性。

无线传感器网络的路由协议,对于整体应用来讲,是处于网络形成初期必须要考虑的问题。本论文的研究目的是希望通过对现有算法通过仿真,得到有关性能的数据,并对现有算法进行改进,争取得到比现有协议更好的性能数据。

1.2 与课题相关的国内外研究综述

1.2.1 国外无线传感器网络研究现状

1995 年,美国交通部提出了“国家智能交通系统项目规划”,预计到 2025 年全面投入使用。该计划试图把先进的信息技术、数据通信技术、传感器技术、控制技术及计算机处理技术有效地集成运用于整个地面交通管理,建立一个在大范围内、全方位发挥作用的,实时、准确、高效的综合交通运输管理系统。这种新型系统将有效地使用无线传感器网络进行交通管理,不仅可以使汽车按照一定的速度行驶、前后车距自动地保持一定的距离,而且还可以提供有关道路堵塞的最新消息。推荐最佳行车路线以及提醒驾驶员避免交通事故等。由于该系统将应用大量的传感器与各种车辆保持联系,

人们可以利用计算机来监视每一辆汽车的运行状况,如制动质量、发动机调速时间等。根据具体情况,计算机可以自动进行调整,使车辆保持在高效低耗的最佳运行状态,并就潜在的故障发出警告,或直接与事故抢救中心取得联系^[7]。

2002 年 10 月 24 日,美国英特尔公司发布了“基于微型传感器网络的新型计算发展规划”。今后,英特尔将致力于微型传感器网络在预防医学、环境监测、森林灭火乃至海地板块调查、行星探查等领域的应用。实现该计划需要 3 个阶段,即物理阶段、实现阶段和应用阶段。物理阶段主要开发集成感知、计算和通信功能的超微型传感器。实现阶段将在实际商务中使用来自无线传感器网络的感知数据。应用阶段将应用无线传感器网络于预防医学、环境监测及灾害对策等领域。英特尔研究中心伯克利实验室和大西洋学院的研究人员计划部署和使用无线传感器网络来研究岛上环境。这些传感器由温度、湿度、气压等芯片和红外线传感器组成。科学家们使用这些设备可以在不干扰野生动植物正常生活的情况下监视它们及其生存环境^[8]。

在美国自然科学基金委员会的推动下,美国的加州大学伯克利分校、麻省理工学院、康奈尔大学、加州大学洛杉矶分校等学校开始了无线传感器网络的基础理论和关键技术的研究。英国、日本、意大利等国家的一些大学和研究机构也纷纷开展了该领域的研究工作。

加州大学伯克利分校提出了应用网络连通性重构传感器位置的方法、基于相关性的 Sensor 数据编码模式、用稀疏传感器网络重构跟踪移动对象路线的方法、无线传感器网络上随时间变化的连续流可视化方法、允许系统级优化时有效通信机制的一般化解、无线传感器网络上的数据分布式存储的地理 Hash 表方法、确定无线传感器网络中节点位置的分布式算法等,并研制了一个传感器操作系统 TinyOS^[9-10]。

加州大学洛杉矶分校开发了一个无线传感器网络和一个无线传感器网络模拟环境,用于考察无线传感器网络各方面的问题。并提出了低级通信不依赖于网络拓扑结构的分布式系统技术、支持多应用传感器网络中命名数据和网内数据处理的软件结构、变换初始感知为高级数据流的层次系统结构、传感器网络的时间同步的解决方法、自组织传感器网络的设计问题和解决方法、新的多路径模式等。

麻省理工学院开始研究超低能源无线传感器网络的问题,试图解决超低能源无线传感器系统的方法学和技术问题。

1.2.2 国内无线传感器网络研究现状

我们国家从二十一世纪初才开始传感器网络方面的研究。目前,哈尔滨工业大学开展了在传感器网络数据管理系统方面的研究工作,提出了以数据为中心的传感器网络数据模型,并开发了一个传感器网络数据管理系统^[11];清华大学正在从事传感器网络组网方面的研究,并对低功耗路由技术和介质访问控制方法等在内的热点研究问题进行了初步研究与探讨,提出了一些研究设想^[12];北京邮电大学开展了传感器网络目标定位方面的研究,提出了一种无线传感器网络中的目标定位算法,用于获取在无线传感器网监控下的地理区域内移动目标的位置^[13];武汉大学对传感器网络路由技术方面进行了初步研究^[14];浙江大学分析和比较了不同的路由协议,提出了改进型新的路由协议^[15];西安交通大学在传感器网络的可靠性方面进行了相应研究,他们针对分布式传感器网络中故障节点多、系统可靠性参数难于估计的特点,提出了一种基于神经网络的马尔可夫的可靠性模型^[16];中国科学技术大学对大规模无线传感器网络的路由协议进行了研究,提出了基于最小跳数的路由协议,并对无线传感器网络节点定位问题开展了研究,提出了一种新的节点定位算法;中科院软件所开始研究传感器网络的能量管理的问题,提出了一些未来的研究方向。

1.3 本论文的主要工作内容

本论文针对无线传感器网络中节点能量有效使用这一特定背景,选择了通过路由协议来达到对节点所携带的电池能量的节约使用和设计和实现工作。

设计一个高效传输数据的网络路由协议,必须考虑节点本身的能量因素,而如果节点的能量低到一定程度之后,就不应该再承担感知数据以外的工作。通过节点能量状态来调整所承担的任务,就可以尽可能的达到无线传感器网络的优势,达到网络有限资源,特别是电池所携带的宝贵资源的优化配置与使用。

本文的主要研究工作是在于设计并实现一种节能的无线传感器网络路由协议: **Modified LEACH**, 本文以后的内容用 **MD-LEACH** 来表示。通过 **NS-2** 仿真平台得到的仿真结果,证明 **MD-LEACH** 协议比 **LEACH** 协议有更长的网络生存周期。

本论文的写作主要分为以下几个部分：

论文第 1 章绪论，简要描述课题的来源、背景及研究目的，以及与课题相关领域的国内外研究现状。

论文第 2 章，简要介绍了有效能量无线传感器网络的相关知识和路由协议相关技术，分别介绍了几个不同传感器网络路由协议的工作原理，为后续的改进算法的实现奠定了基础。

论文第 3 章，基于簇路由算法的分析和改进算法的设计与研究，着重论述 LEACH 算法的特点、工作方式等问题，并根据其优、缺点，提出了改进的 MD-LEACH 算法，为算法的最终实现打下了良好的基础。

论文第 4 章，描述了算法的实现方法及算法结果的验证与评价，并给出了 LEACH 算法与 MD-LEACH 算法的比较结果。阐释了传感器网络在农业监测方面的应用。

论文最后一章结论，总结了论文的研究成果，展望了今后的研究方向。

第 2 章 无线传感器网络路由协议相关技术

2.1 有效能量的无线传感器网络简介

众多具有通信、计算能力的传感器通过无线方式连接相互协作，同物理世界进行交互，共同完成特定的应用任务，成为传感器网络。

传感器网络综合了传感器技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术和无线通信技术，能够协作地实时监测、感知和采集各种环境监测对象的信息，并对其进行处理，传送到这些信息的用户。与传统的中心化处理相比，传感器网络具有鲁棒性高、准确性高、灵活性高等优点。

传感器网络与传统传感器相比，易于部署，即传感器节点位置不需要事先确定或精心设计，允许任意放置，部署维护成本低且具有较高的灵活性；传感器网络由大量廉价节点组成，可放置在物理现象作用范围内，从而获得较高的观察精度，具有较高的性价比；传感器网络具有大量冗余节点，即使部分节点失效，也不会影响整个网络的功能，因而具有较好的健壮性；传感器网络节点具有计算能力，可以相互协作，能够完成传统传感器不能完成的任务。

传感器、感知对象和观察者是传感器网络的 3 个基本要素。有线或无线网络是传感器之间、传感器与观察者之间的通信方式，用于在传感器与观察者之间建立通信路径。协作地感知、采集、处理、发布感知信息是传感器网络的基本功能。一组功能有限的传感器协作地完成大的感知任务是传感器网络的重要特点。传感器网络中的部分或全部节点可以移动，传感器网络的拓扑结构也会随着节点的移动而不断地动态变化。节点间以 Ad Hoc 方式进行通信，每个节点都可以充当路由角色，并且每个节点都具备动态搜索、定位和恢复连接的能力。

传感器由电源、感知部件、嵌入式处理器、存储器、通信部件和软件几部分构成。电源为传感器提供正常工作所必需的能量。感知部件用于感知、获取外界的信息，并将其转换为数字信号。处理部件负责协调节点各部分的工作，如对感知部件获取的信息进行必要的处理、保存，控制感知部件和电源的工作模式等。通信部件负责与其他传感器或观察者通信。软件则为传感器提供必要的软件支持，如嵌入式操作系统、嵌入式数据库系统等。

观测者是传感器网络的用户，是感知信息的接收和应用者。观察者可以

是人，也可以是计算机或其他设备。例如，军队指挥官可以是传感器网络的观察者；一个由飞机携带的移动计算机也可以是传感器网络的观察者。一个传感器网络可以有多个观察者。一个观察者也可以是多个传感器网络的用户。观察者可以主动地查询或收集传感器网络的感知信息，也可以被动地接收传感器网络发布的信息。观察者将对感知信息进行观察、分析、挖掘、制定决策，或对感知对象采取相应得行动。

感知对象是观察者感兴趣的监测目标，也是传感器网络的感知对象，如坦克、军队、动物、有害气体等，感知对象一般通过表示物理现象、化学现象或其他现象的数字量来表征，如温度、湿度等。一个传感器网络可以感知网络分布区域内的多个对象。一个对象也可以被多个传感器网络所感知。

传感器节点体积微小，通常携带能量十分有限的电池。由于传感器节点个数多、成本要求低廉、分布区域广，而且部署区域环境复杂，有些区域甚至人员不能到达，所以传感器节点通过更换电池的方式来补充能量是不现实的。如何高效地使用能量来最大化网络生命周期是传感器网络面临的首要挑战。

正是由于传感器节点的能量十分有限，而且一旦能量失效将导致整个网络瘫痪，不能正常完成信息的采集和发送等工作。所以，一般对传感器网络进行研究和应用时，通常都把有效能量——也就是网络能量正常作为前提。

2.2 无线传感器网络路由协议的分类

无线传感器网络路由协议的分类基本上延续了传统 Ad hoc 网的分类方法，根据不同的角度可以进行不同的分类。根据路由发现策略的角度，可分为主动路由和被动路由两种类型；根据网络管理的逻辑结构可将路由协议分为平面路由和分层结构路由两类^[17,18]。

(1) **主动路由** 也叫表驱动(Table Driven)路由，主动路由的路由发现策略与传统路由协议类似，节点通过周期性地广播路由信息分组，交换路由信息，主动发现路由，同时，节点必须维护去往全网所有节点的路由。它的优点是当节点需要发送数据分组时，只要去往目的节点的路由存在，所需的延时很小。缺点是主动路由需要花费较大开销，尽可能使得路由更新能够紧随当前拓扑结构的变化，浪费了一些资源来建立和重建那些根本没有被使用的路由。而且，动态变化的拓扑结构可能使得这些路由更新变成过时信息，路由协议始终处于不收敛状态。传统的路由协议如RIP和OSPF都属于主动路由协

议。主动路由协议一般包括“邻居节点探测”和“路由广播”两个过程。路由器向各通信端口周期广播Hello分组，来实现邻居节点探测。在距离矢量算法中，虽然没有显式的邻节点探测过程，但在与邻节点交换距离向量路由表时，隐含了邻节点探测。

(2)被动路由 也叫按需(On Demand)路由，与主动路由相反，被动路由认为在动态变化的网络环境中，没有必要维护去往其他所有节点的路由。它仅在没有去往目的节点路由的时候才“按需”进行路由发现。被动路由协议根据网络分组的传输请求，被动地搜索从源节点到目的节点的路由。当没有分组传递请求时，路由器处于静默状态，并不需要交换路由信息。拓扑结构和路由表内容按需建立，它可能仅仅是整个拓扑结构信息的一部分。它的优点是不需要周期性的路由信息广播，节省了一定的网络资源。缺点是发送数据分组时，如果没有去往目的节点的路由，数据分组需要等待因路由发现引起的延时。被动路由协议主要包括“路由发现”和“路由维护”两个过程。当源节点需要获得到目的节点的路由，而该路由又没有在路由表中时，路由发现过程被激活。路由器采用泛洪的方式，向整个网络广播路由请求分组。当有路由请求报文到达目的节点时，目的节点将向源节点发出路由请求应答报文。这样，在源与目的节点之间会建立起双向“活动路径”。活动路径建立所需时间定义为路由建立延迟。随着拓扑结构的变化，当活动路径上的某段链路发生中断时，路由维护过程被启动。路由维护可以采用两种不同的策略：从断点处开始修补路径或通知源节点重新启动路由建立过程。被动路由协议是自组网特有的路由协议类型，它可以降低路由消耗，提高网络的吞吐量。但是，被动路由协议具有潜在的不确定性，包括目标节点是否可达的不确定性和路由建立延迟不确定。

(3)平面路由 平面结构是指网络中各节点在路由功能上地位相同，没有引入分层管理机制。平面结构路由的优点是网络中没有特殊的节点，网络流量均匀地分散在网络中，路由算法易于实现。缺点是可扩展性小，在一定程度上限制了网络的规模。

(4)分层路由 与平面路由协议相对应的是分层结构的路由协议。分层路由协议采用簇的概念对传感器节点进行层次划分。若干个相邻节点构成一个簇，每一个簇有一个簇首。簇与簇之间可以通过网关通信。网关可以是簇首也可以是其它簇成员。网关之间的连接构成上层骨干网，所有簇间通信都通过骨干网转发。分层路由协议包括成簇协议、簇维护协议、簇内路由协议和簇间路由协议四个部分。成簇协议解决如何在动态分布式网络环境下使移动

节点高效地聚集成簇，它是分层路由协议的关键。簇维护协议要解决在节点移动过程中的簇结构维护，其中包括移动节点退出和加入簇，簇的产生和消亡等功能。分层路由协议比较适合于无线传感器网络，但成簇过程会产生一定的能源消耗，如何产生有效的簇类也正是各地学者深入研究的问题。无线传感器网络的路由协议目前正是国外研究的热点，各种路由协议在不同的应用环境和性能评价指标下各有千秋^[19]。

2.3 无线传感器网络现有路由协议分析

2.3.1 SPIN 协议

SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation) ^[23,24] 协议是一种以数据为中心的自适应通信路由协议^[5]。其目标是通过使用节点间的协商制度和资源自适应机制，解决扩散法存在的不足之处。

为了避免出现扩散法的信息爆炸问题和部分重叠现象，传感器节点在传送数据之前彼此进行协商，协商制度可确保传输有用数据。节点间通过发送元数据(即描述传感器节点采集的数据属性的数据，**meta-data**)，而不是采集的整个数据进行协商。由于元数据大小小于采集的数据，所以，传输元数据消耗的能量相对较少。为避免盲目使用资源，所有传感器节点必须监控各自的能量变化情况。

在传输或接收数据之前，每个节点都必须检查各自可用的能量状况，如果处于低能量水平，必须中断一些操作，比如充当路由器的角色，停止对其他节点的一些数据转发操作。

SPIN 有 3 种数据包类型，即 **ADV**，**REQ** 和 **DATA**。节点用 **ADV** 宣布有数据发送，用 **REQ** 请求希望接收数据，用 **DATA** 封装数据。

ADV—用于新数据广播。当一个节点有数据可共享时，它可用 **ADV** 数据包(包含元数据)对外广播。

REQ—用于请求发送数据。当一个节点希望接收 **DATA** 数据包时，发送 **REQ** 数据包。

DATA—包含附上元数据头(**meta-data header**)的传感器采集的数据的数据包。

SPIN 协议簇有 4 种不同的形式：**SPIN-PP** (A 3-Stage Handshake Protocol for Point-to-Point Media)，**SPIN-EC** (SPIN-PP with a Low-Energy Threshold)，

SPIN-BC (A 3-Stage Handshake Protocol for Broadcast Media), SPIN-RL (SPIN-BC for Lossy Network), 下面分别介绍。

(1) SPIN-PP 采用点到点的通信模式, 并假定两节点间的通信不受其他节点的干扰, 分组不会丢失, 功率没有任何限制, 如图 2-1 所示。

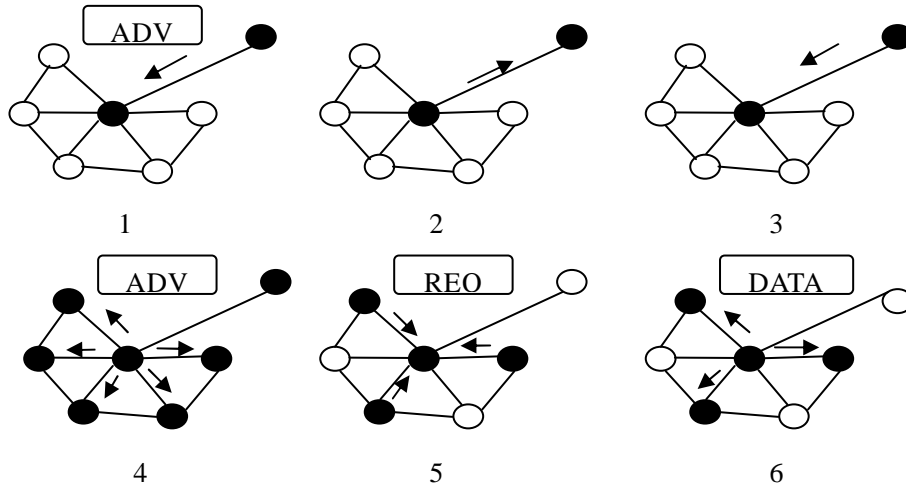


图 2-1 SPIN-PP 路由协议

在发送一个 DATA 数据包之前, 一个传感器节点首先对向邻居节点广播 ADV 数据包; 如果一个邻居节点在收到 ADV 后有意愿接收该 DATA 数据包, 那么它向该节点发送一个 REQ 数据包, 接着节点向该邻居节点发送 DATA 数据包。类似地进行下去, DATA 数据包可被传输到远方汇节点或基站。

(2) SPIN-EC 在 SPIN-PP 的基础上考虑了节点的功耗, 只有能够顺利完成所有任务且能量不低于设定 K 值的节点才可参与数据交换。

(3) SPIN-BC 设计了广播信道, 使所有在有效半径内的节点可以同时完成数据交换。为了防止产生重复的 REQ 请求, 节点在听到 ADV 消息以后, 设定一个随机定时器来控制 REQ 请求的发送, 其他节点听到该请求, 主动放弃请求权利。

(4) SPIN-RL 它是对 SPIN-BC 的完善, 主要考虑如何恢复无线链路引入的分组差错与丢失。记录 ADV 消息的相关状态, 如果在确定时间间隔内接收不到请求数据, 则发送重传请求, 重传请求的次数有一定的限制。SPIN 的缺点是在传输新数据的过程中, 直接向邻居节点广播 ADV 数据包, 而没有考虑其所有邻居节点由于自身能量的原因, 不愿承担起转发新数据的功能, 则新数据无法传输, 将会出现“数据盲点”, 进而影响整个网络信息的收集。

2.3.2 MTE 协议

在 MTE (Minimum Transmission Energy) 协议^[25]中, 节点选择离自己平面距离最近的节点进行路由中转, 例如在图 (2-2) 中, 当且仅当如公式 (2-1) 满足时, 节点 A 将会选择 B 转发自己的数据到节点 C。

$$E_{TX}(d = d_{AB}) + E_{TX}(d = d_{BC}) < E_{TX}(d = d_{AC}) \quad (2-1)$$

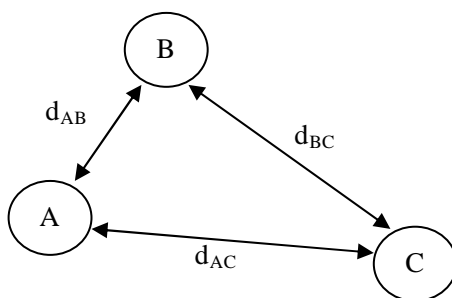


图 2-2 MTE 中节点距离关系

MTE 协议如图 2-3 所示。

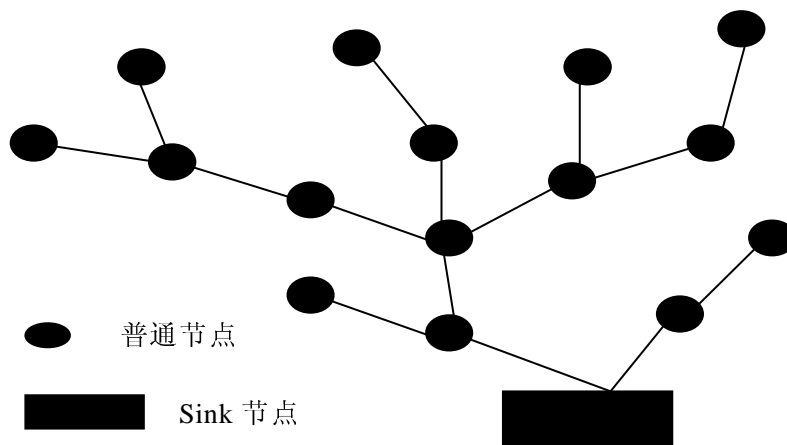


图 2-3 MTE 协议

这种路由协议的优点是简单、开销小, 每个节点只需要找到通往 Sink 节点的下一跳节点, 然后把数据发给它。缺点是靠近 Sink 节点的传感器节点会一直承担路由器的角色, 节点之间负载不平衡, 靠近 Sink 节点的传感器节点可能很快就耗尽自己的能源而死亡, 缩短整个网络的生命周期。

2.3.3 定向扩散协议

定向扩散协议(Directed Diffusion)是一种以数据为中心的路由协议,与已有的路由协议有着截然不同的实现机制,其突出特点是引入了梯度来描述网络中间节点对该方向继续搜索获得匹配数据的可能性。Sink 节点向所有传感器节点发送其嗜好(interest),即通过分配不同属性值来表示不同任务的描述符)。每个传感器节点在收到嗜好后保存在各自的 Cache 中。每个嗜好项(interest entry)包含一个时间标签域(timestamp field)和若干个梯度域(gradient field),按成本最小化和能量自适应原则引导数据扩散的方向。当一个嗜好传遍整个网络后,从源节点(即嗜好所在区域的传感器节点)到汇节点或基站之间的梯度就建立起来了。一旦源节点采集到嗜好所需的数据,那么源节点沿着该嗜好的梯度路径传输数据到汇节点或基站。其中,源节点采集的数据首先在本地采用数据融合技术进行整合,然后在网上传输。

Directed Diffusion 协议的一大特点是引入网络梯度概念,并将其与局部算法(localized algorithm)相结合应用于无线传感网络的路由通信。

网络梯度思想源自生物学中蚂蚁种群模型^[26,27]。研究人员在实验过程中发现,绝大多数盲蚂蚁在擦肩而过时通过彼此发送信息激素(pheromone)可找到一条从源点到目标点最短路径。透过这一现象,将其思想引用到网络中,网络梯度概念产生。

Directed Diffusion 的缺点是没有形成到 Sink 节点的多条路由,路由健壮性不够好。Directed Diffusion 如图 2-4 所示。

2.3.4 LEACH 协议

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)^[28]协议是一种基于聚类的路由协议,在无线传感器网络路由协议中占有重要地位,其它基于聚类的路由协议如 TEEN、APTEEN 等大多是由 LEACH 发展而来的,本文设计的 MD-LEACH 协议也吸取了 LEACH 的优秀思想。LEACH 协议分为两个阶段操作,即簇准备阶段(set-up phase)和就绪阶段(ready phase)。为了使能耗最小化,就绪阶段持续的时间比簇准备阶段长。簇准备阶段和就绪阶段所持续的时间总和称为一轮(round)。在簇准备阶段,LEACH 协议随机选择一个传感器节点作为簇首节点(cluster head node),随机性确保簇首与基站之间数据传输的高能耗成本均匀地分摊到所有传感器节点。

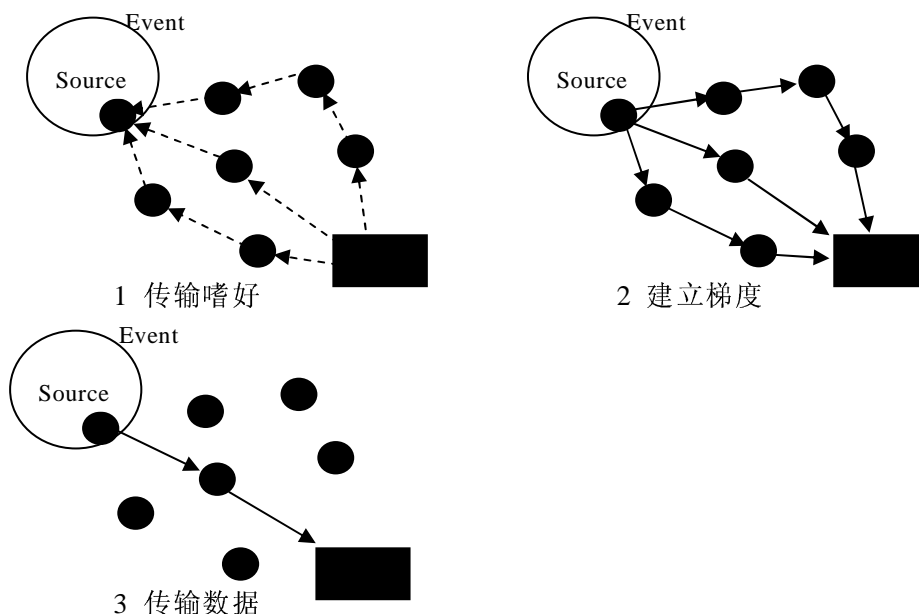


图 2-4 Directed Diffusion

具体的选择办法是：一个传感器节点随机选择 0 和 1 之间的一个值，如果选定的值小于某一个闭值 $T(n)$ ，那么这个节点成为类头节点。 $T(n)$ 值按公式 2-2 计算：

$$T(n) = \begin{cases} \frac{k}{N - k[r \bmod (N/k)]}, & \text{若 } n \in G \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (2-2)$$

N ：网络中传感器节点的总数；

k ：一轮中网络的类头节点数；

r ：已完成的轮数；

G ：在剩余的 $\{(N/k)-r\}$ 个回合中未成为类头节点的传感器节点组成的集合。

在类头节点选定后，该类头节点对网络中所有节点进行广播，广播数据包含有该节点成为类头节点的信息。一旦传感器节点收到广播数据包，根据接收到的各个类头节点广播信号强度，该节点选择信号强度最大的类头节点加入，向其发送成为其成员的数据包。类形成后，类头节点采用 TDMA 策略分配通道使用权给类内节点。一旦处于就绪阶段，类头节点开始接收类内各节点采集的数据，然后采用数据融合和数据压缩等技术进行汇聚，将整合

后的数据传输给 Sink 节点。在就绪阶段持续了一段时间后，网络又进入了另一次的类准备阶段。LEACH 协议如图 2-5 所示。

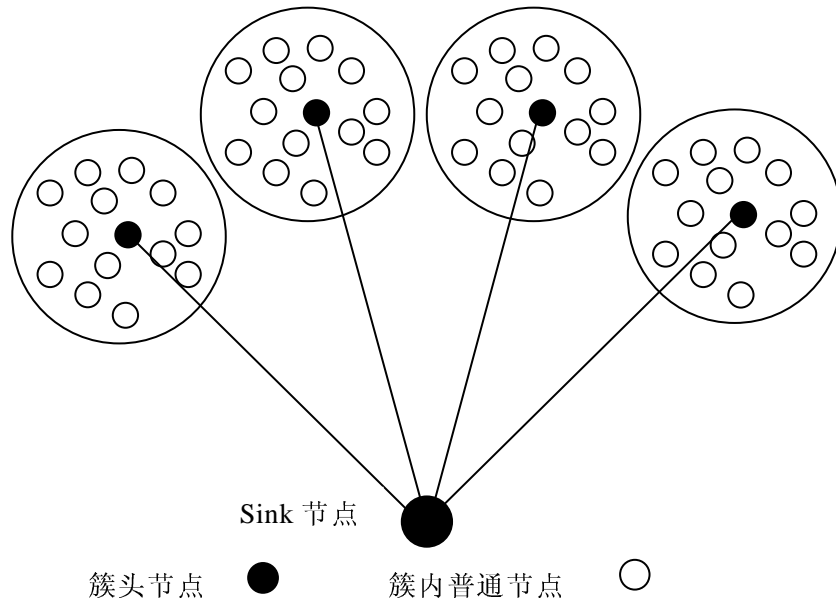


图 2-5 LEACH 协议

2.3.5 TEEN 协议

主动型传感器网络持续监测周围的物质现象，并以恒定速率发送监测数据；而响应型传感器网络只是在观测变量发生突变时才传送数据。相比之下，响应型传感器网络更适合应用在敏感时间的应用中。TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) 和 LEACH 的实现机制非常相似，只是前者是响应型的，而后者属于主动型传感器网络。在 TEEN 中定义了硬、软两个门限值，以确定是否需要发送监测数据。当监测数据第一次超过设定的硬门限时，节点用它作为新的硬门限，并在接着到来的时隙内发送它。在接下来的过程中，如果监测数据的变化幅度大于软门限界定的范围，则节点传送最新采集的数据，并将它设定为新的硬门限。通过调节软门限值的大小，可以在监测精度和系统能耗之间取得合理的平衡。

2.4 本章小结

本章首先介绍了有效能量的无线传感器网络的概念和一些基本特征,从实际应用的角度阐述了有效能量对于传感器网络的重要性。随后,从不同的角度对无线传感器网络路由协议进行不同的分类。并列举了相关的几个重要协议的特征和性质。根据路由发现策略的角度可将路由协议分为主动路由和被动路由两种类型;根据网络管理的逻辑结构可将路由协议分为平面路由^[31]和分层结构路由^[32]两种类型。

第 3 章 聚类路由算法分析与改进算法的研究

3.1 需求分析

在 WSN 体系结构中，网络层的路由技术对 WSN 的性能的好坏有着重要影响。随着国内外 WSN 的研究发展，许多路由协议被提了出来，从网络拓扑结构的角度我们可以大体把它们分为两类：平面路由协议和分簇路由协议。

在平面路由协议中，所有网络节点的地位是平等的，不存在等级和层次差异。它们通过相互之间的局部操作和信息反馈来生成路由。在这类协议中，目的节点(sink) 向监测区域的节点(source) 发出查询命令，监测区域内的节点收到查询命令后，向目的节点发送监测数据。平面路由的优点是简单、易扩展，无须进行任何结构维护工作，所有网络节点的地位平等，不易产生瓶颈效应，因此具有较好的健壮性。典型的平面路由算法有 DD(directed diffusion)^[33]，SAR(sequential assignment routing)^[34]，SPIN(sensor protocols for information via negotiation)^[35]，Rumor Routing^[36]等。平面路由的最大缺点在于：网络中无管理节点，缺乏对通信资源的优化管理，自组织协同工作算法复杂，对网络动态变化的反应速度较慢等。

在分簇路由协议中，网络通常被划分为簇(cluster)。所谓簇，就是具有某种关联的网络节点集合。每个簇由一个簇头(cluster head) 和多个簇内成员(cluster member) 组成，低一级网络的簇头是高级网络中的簇内成员，由最高层的簇头与基站 BS(base station) 通信如图 3-1 所示。这类算法将整个网络划分为相连的区域。

而在分簇路由协议中，LEACH 协议的作用和意义更是十分明显的。但是，LEACH 协议经过了长期研究后，发现其实用性并不是很强，而且还有很多缺点有待解决。LEACH 协议的缺点如下。

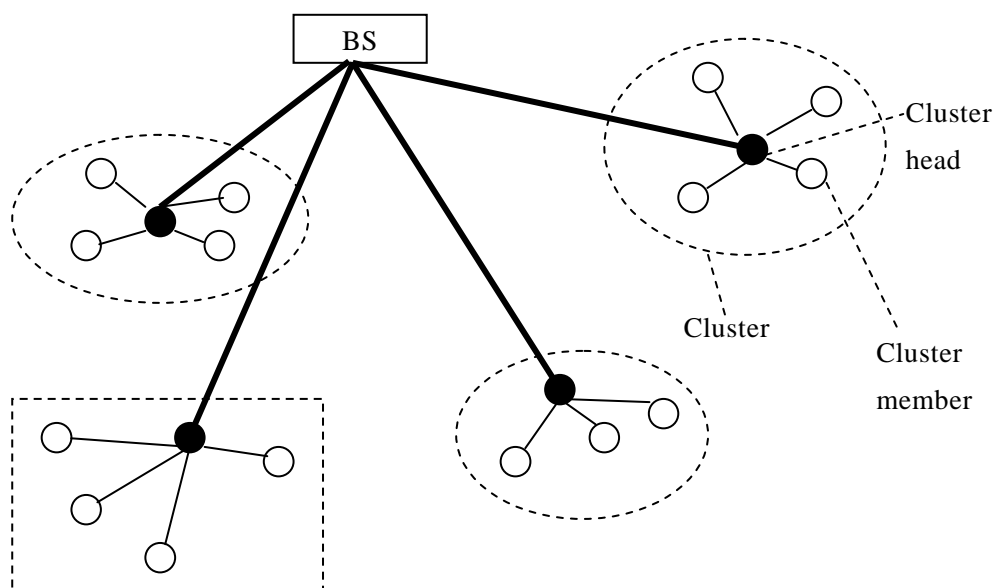


图 3-1 分簇路由协议拓扑结构

(1)在分布式成簇方面 LEACH 采用的是随机分布式成簇的方式，这种方式形成的簇结构有可能很不合理，比如，簇首节点距离簇边缘过近，这将导致簇内几乎所有节点都要经过较长的发送距离，才能将数据传输至簇首节点，形成了能量浪费。

(2)在簇头选择方面 LEACH 采用按“轮”(Round)的方式，就是每隔一定的时间间隔，将在整个感知区域内进行簇首选择。而簇首选择与感知数据的传输，并没有直接的关系，也就是簇首选择的能量消耗应该属于能量的非有效利用。

(3)在簇间传输方面 LEACH 协议采用每个簇首直接与 Base Station 节点通信，这导致了距离 Base Station 节点距离远的簇的能量消耗速度急剧上升，对网络的生存周期有致命的影响。

本文提出的 MD-LEACH 算法正是基于以上 LEACH 算法的缺点，提出了相关的改进措施。而这些缺点如果不加以改进的话，将对整个网络性能有十分明显的影响。

3.2 开发平台

网络仿真器 NS-2(Network Simulator Version 2)是由 LBNL(Lawrence Berkeley National Labs)、Xerox PARC(Palo Alto Research Center)、

UCB(University of California, Berkeley)和 USC/ISI(University of Southern California/Institute for Scientific Information)等合作, 由 DARPA 资助的 VINT(Virtual Inter Net Testbed)项目研究开发的一种网络模拟工具。NS-2 是一个免费的软件, 具有开放体系结构和源代码, 被世界各国的网络研究者广泛使用, 在国际上享有很高的学术声誉。

NS-2 是一个面向对象离散事件驱动的仿真器, 其中“事件”指网络状态的变化, 即只有网络状态发生变化时仿真器才工作, 网络状态不发生变化时不执行任何仿真计算。与时间驱动相比, 离散事件驱动的仿真计算效率得到很大提高。NS-2 是在 Unix 平台下用 C++语言编写, 并且用 Otcl 脚本语言作为网络仿真任务提交的解释器语言。从用户的角度看, 一个类在编译层次和解释层次之间存在着——对应关系, 图 3-2 为 C++类层次(编译层次)和 Otcl 类层次(解释层次)的分裂对象影射。编译类层次的根是类 TclObject, 用户通过解释器创建新的仿真对象, 这些对象在解释器里实例化, 并且被影射到编译层次里的相应对象。解释类层次是通过定义在类 TclClass 中的方法自动建立的, 用户实例化的对象由定义在类 TclObject 中的方法来影射。

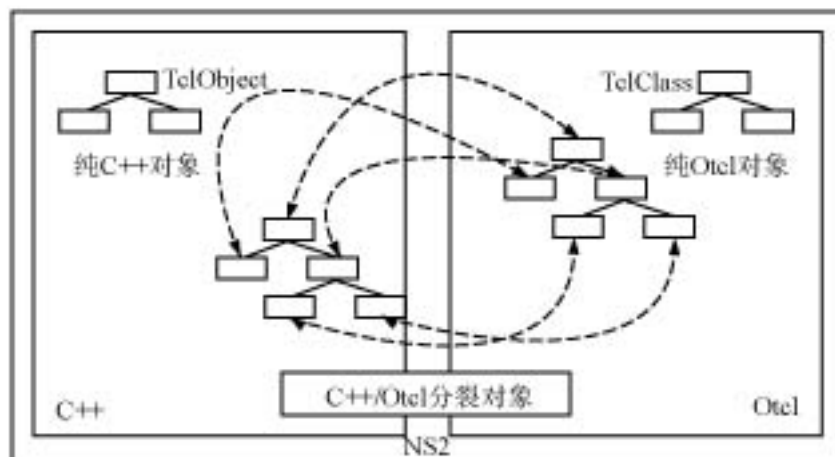


图 3-2 NS-2 中 C++和 Otcl 的分裂对象模型

NS-2 采用两种语言共同工作。一方面, 具体的协议实现需要一种系统编程语言, 它能有效地处理字节、报头和算法, 其关键是整个协议的运行时间; 另一方面, 网络参数和仿真场景关心的是收发功率、传输速率、节点和拓扑生成等配制性工作, 其模型建立的配置时间显得尤为重要。C++是一种编译语言, 编译时由编译器一次性生成可执行代码, 运行速度较快, 但每改动一次都需要重新编译, 比较费时; 而 Otcl 是一种脚本解释语言, 运行时由解释器逐行地解释, 方便修改, 无需重新编译, 但运行效率低。NS-2 通

过使用这两种语言的 C++/Otc1 对象分裂模型达到了两全其美, C++ 运行速度快且不易改变, 因而它适合于实现具体协议; Otc1 运行慢, 但可以交互的进行改变, 适合用来做仿真环境的配置。

目前 NS-2 虽然提供了工作于 Unix 和 Windows 系统平台的两个版本, 但 Windows 平台下直接安装版本不稳定。为了充分利用 Windows 平台的易用性和 Unix 平台的稳定性, 本文所有仿真和开发都是在 Windows 2003 环境下用 Cygwin 模拟 Unix 环境运行的。这样, 就相于在 Unix 系统中仿真和开发, 实验的结果易于被众多研究这接受。

在 NS-2 上作仿真及开发是两个层次的内容, 仿真是利用 NS-2 提供的现成的构件库对一定的网络进行仿真分析和评价; 开发则需要修改或添加新的协议代码到 NS-2 中, 并对添加后的代码进行测试。NS-2 最初只能仿真有线网络, 后来由 CMU 加入了无线模块, 实现了链路层的 802.11 协议和 Ad Hoc 网络的 DSDV、DSR、TORA、AODV 等网络层无线协议。而且用户还可以根据自己的需要, 在现有的有线或无线模块中加入自己的新算法。图 3-3 中描述了 TCP 类的 Otc1 类和 C++ 类的对应关系图。

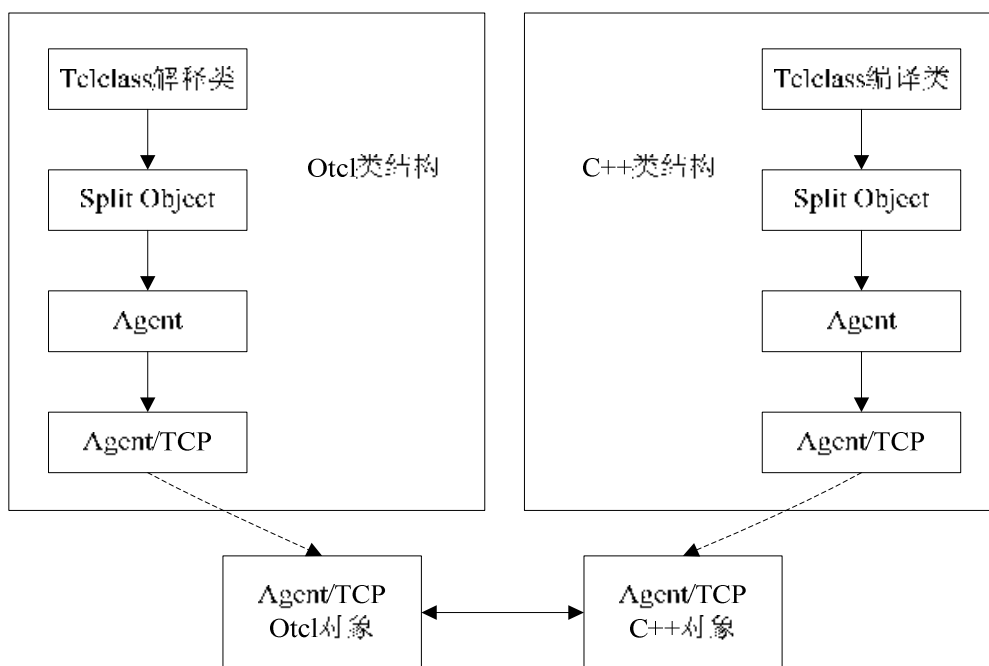


图 3-3 Otc1 类和 C++ 类的对应关系

(1) NS-2 仿真—Tcl 级

鉴于 NS-2 的分裂对象模型, 在 NS-2 平台上利用现有的构件库进行网络仿真, 只需要编写 Tcl 脚本调用相应得构件库, 完成相应的测试即可。在

NS-2 种，整个仿真过程是由一个名为 **Simulator** 的 Tcl 类来定义和控制的，进行模拟通常要首先创建一个 **Simulator** 类的实例对象，并调用该对象的一系列方法来创建节点（**Node**）、拓扑（**Topology**）等网络模拟所必需的构件。

（2）NS-2 开发—C++级

与在 NS-2 上作仿真不同，在 NS-2 上作新协议开发，不仅要用 Tcl 脚本对协议进行测试，更重要的是在现有 NS-2 的基础上进行扩展。由于 NS-2 是一个事件驱动的模拟器，在 **Simulator** 类创建一个实例对象后，由事件调度器（**Event Scheduler**）负责处理分组延时，并充当定时器。如图 3-4 所示，为事件调度器工作过程：从所有事件中选择发生时刻最早的事件，挑用它的 **handler** 函数，把该事件执行完毕；然后从剩余的所有事件中选择发生时刻最早的事件执行，如此反复执行。

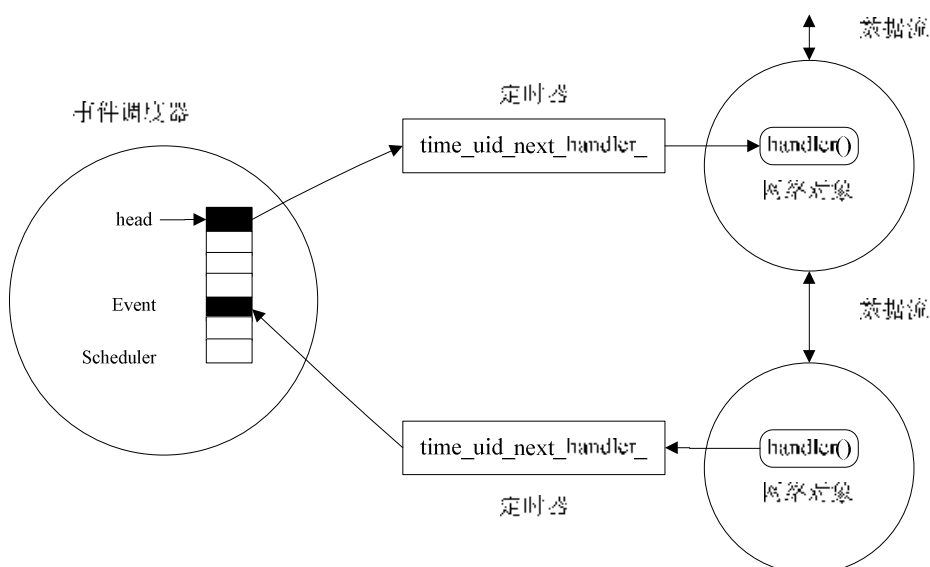


图 3-4 事件调度器工作原理

鉴于 NS-2 是由定时器超时产生的基于事件驱动的命令执行方式，因此在 NS-2 上添加一个新算法的最简答方法就是定义一个新定时器，并实现定时器超时后所需要完成的功能。

3.3 LEACH 算法研究与分析

3.3.1 LEACH 算法概述

传感器节点的数据最终要传送到控制中心或者基站，终端用户可以从控制中心或者基站获得需要的信息。LEACH 协议所采用的模型如下。

- (1) 基站是固定的，而且远离整个无线传感器网络。
- (2) 网络中所有的传感器节点都是同种类型的并且能量非常有限。

因此，如果节点和基站直接通信，所需要的能量要求过高，并且网络中的传感器节点的能量都是非常有限的，传感器节点收集的数据中有较大量的冗余信息，因此需要通过本地合作来进行数据融合去掉冗余信息，只发送有用信息，这样可以节约开销。

在分析了传统路由协议的优缺点后，MIT 的 W.R Heinzelman 等人提出了 LEACH 协议，这是一种基于簇类结构的分层技术的协议，与传统协议相比，可以较大程度的节约能量。LEACH 的典型特征为：

- (1) 通过本地协作和控制实现簇类的建立和操作。
- (2) 簇类的动态改变和簇头节点的随机性。
- (3) 采用本地数据聚合，减少整体通信量。

对于多数传感器节点来说，短距离通信比较节约能量，因此在 LEACH 中，更多的通信都局限在簇类内部，只有少数簇头节点才和远端的基站进行远距离通信。但是 LEACH 又比原有的簇类结构网络更有效，因为 LEACH 中用到了簇类的自适应技术和簇头节点的轮换技术，使得整个网络的负载分布相对比较平衡，能够大大的延长网络的生存周期。另外，LEACH 在每个簇类内部可以进行本地计算和处理，去掉数据中的冗余部分，减轻簇头节点的通信负担。由于计算所需能耗远远小于通信能耗，因此这项技术可以大大节约能量。

3.3.2 LEACH 算法的物理模型

在 LEACH 路由算法中，使用的能量消耗公式是一阶无线电模式^[35] (first order radio model)。LEACH 协议的这个模式基于以下假设：

- (1) 网络里所有节点完全相同并且能量有限。
- (2) 无线电信号在各个方向上能耗相同。

(3) 汇聚节点（基站）是固定的，并且距离整个网络较远。
根据图 3-5 模式，传感器节点发送 k bit 数据所消耗的能量为：

$$E_{send} = k * E_{static} + k * \epsilon_{amp} * d^2 \quad (3-1)$$

传感器节点接受 k bit 数据所消耗的能量为：

$$E_{receive} = k * E_{static} \quad (3-2)$$

其中 E_{amp} 是信号放大器的放大倍数。 E_{static} 是发送电路和接收电路消耗的能量，由于实际相差不大，在这个模式里面简化为两者相等。而 B 是由无线电通道决定的常量。 D 是信号传输的距离。其中， $k * E_{static} \ll k * \epsilon_{amp} * d^B$ ，这意味着，信号传输距离越短，能量消耗就越小。在发送距离较近时，适用自用空间信道模型，取 $B=2$ ；而当发送距离较远时，适用多路径衰减信道模型，取 $B=4$ ，也称为双路径模型^[44]。

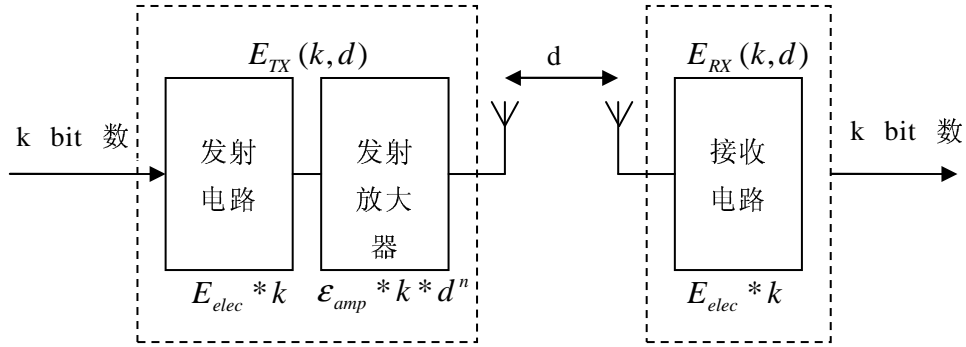


图 3-5 一阶无线电模式

3.3.3 LEACH 算法的具体描述

LEACH 协议适用自适应成簇技术和簇头节点轮换技术。它将所有节点分为若干簇，每个簇选举一个簇头，如图 3-6 所示。途中感知区域被分为 5 个簇类，其中每个簇由一个簇头节点，其余的一般节点为簇内成员。

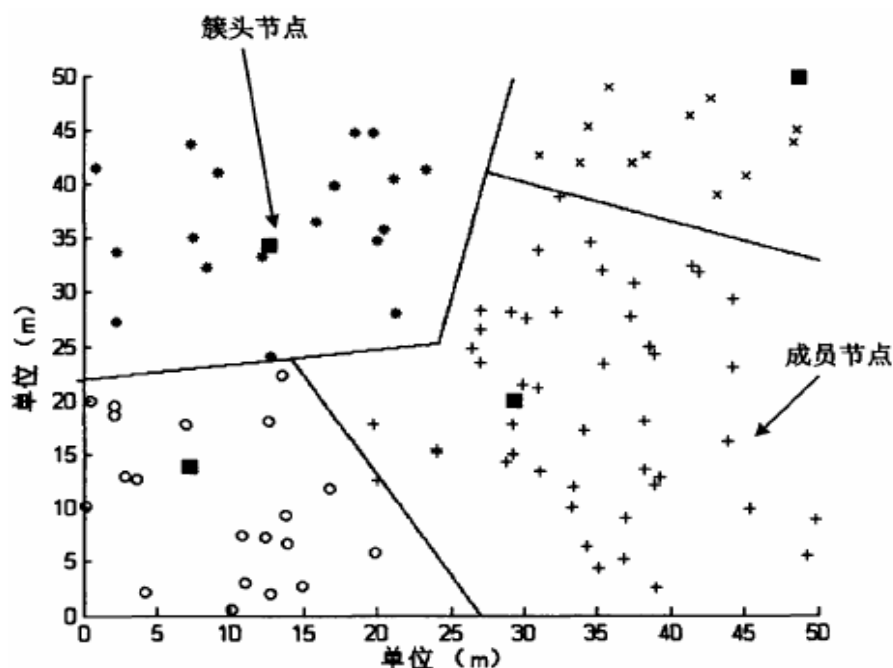


图 3-6 LEACH 协议分簇示意图

LEACH 协议中给出了一个“轮”(round)的概念,其操作是分成轮进行的,每一轮包含簇建立和簇稳定运行两个阶段,首先是在簇建立(set-up)阶段,自适应分簇结构形成,接下来在稳定运行(steady-state)阶段进行数据传输,为了节约开销,通常第二个阶段的时间要长于第一个阶段,如图 3-7 所示。



图 3-7 LEACH 操作的时间图

下面结合图 3-6 详细介绍 LEACH 协议的具体流程:

最初的簇建立阶段,每个节点要决定是否充当本轮的簇头节点,这个决定取决于整个网络中簇头节点所占所有节点数目的百分比(在初始化时设置),并且取决于这个节点在过去的操作中充当过簇头节点的次数。对于一个节点 n 来说,为节点 n 随机选取一个在 0 到 1 之间的数字,成为标志值或者节点的 id 号。如果 n 的这个标志值小于一个门限值 $T(n)$ 的话,节点 n 就充当本轮的簇头节点。门限 $T(n)$ 定义如下:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times [r \bmod (1/P)]}, n \in G \\ 0, \text{其它} \end{cases} \quad (3-3)$$

其中， P 是网络中簇头节点所占总节点数目的百分比（例如 $P=0.05$ ）。 r 为当前的轮数，比如当前是第 20 轮，则 $r=20$ 。 G 是一个集合，集合中的节点是前 $1/P$ 轮中没有充当过簇头的节点。适用这个门限，每个节点会在 $1/P$ 轮操作内充当一次簇头节点，符号 \bmod 是求模运算。

在第 0 轮的时候（ $r=0$ ），每个节点充当簇头节点的概率为 P ，在第 0 轮充当簇头节点的节点在后面 $1/P$ 轮中不能再次充当簇头节点。这样，剩下的节点数目变少了，所以能够充当簇头节点的概率得到增加才能保证每一轮中的簇的个数保持均衡。等经过了 $1/P-1$ 轮以后， $T=1$ ，此时对于任何过去的 $1/P$ 轮中还没有作过簇头的节点，都可以成为簇头节点，因为所有的节点的标志值都是 0 和 1 之间的。等过了 $1/P$ 轮以后，所有的节点就又可以重新充当簇头节点了。

每个确定充当前轮簇头的节点，会向网络其它节点广播一个广告包。在整个广告的过程中，运用了 CSMA 的 MAC 层协议。所有的簇头节点都用同样的发射功率发送广告包。在这个过程中，其它节点的接收机一直处于工作状态，用于接收来自簇头节点的广告消息。每个节点可能会收到几个来自不同需投节点的广告包，节点九根据收到的消息的信号强弱，选取信号最强的广告包的发送源节点作为自己的簇头节点，加入那个簇头节点的簇，并向簇头节点报告自己加入的消息。因为从理论上讲，收到的信号强度越大，那么两者之间的通信功耗会越小。

等每一个节点都选定了自己的簇头节点，加入了相应的簇，节点就成为了这个簇的成员节点。成员节点会用 CSMA 机制通知簇头节点，自己已经加入了这个簇。在这个过程中，簇头节点的接收机也一直处于开启状态，用来接收成员节点的“报到”消息。

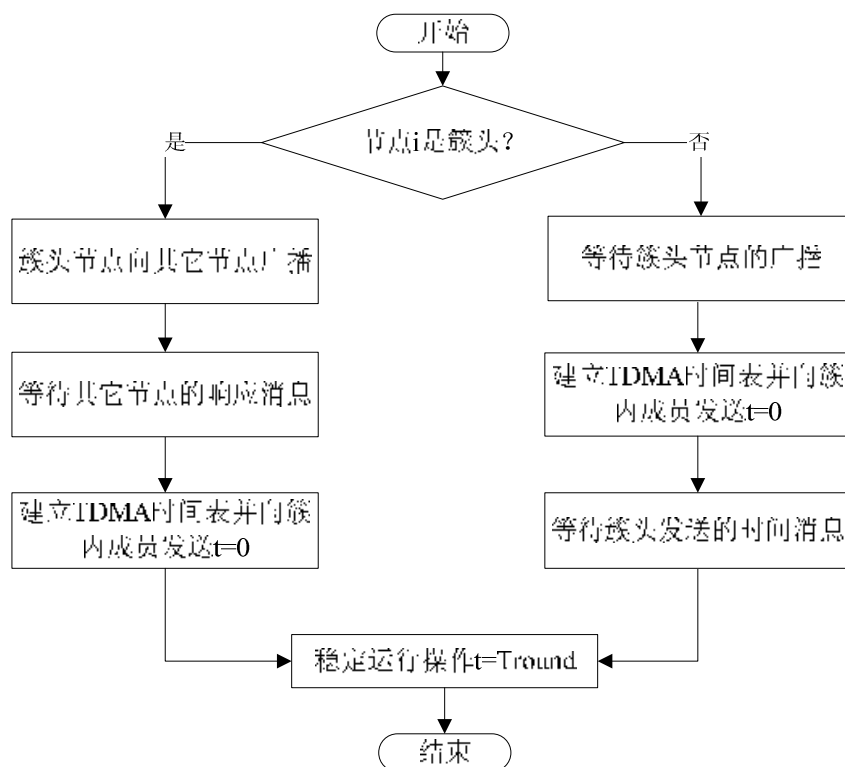


图 3-8 LEACH 算法流程图

当簇头节点收到了来自成员节点的“报到”消息后，基于成员节点的数目，簇头节点会产生一个 TDMA 时隙表，告诉成员在什么时刻可以发送数据。这个表会通过广播到达成员节点。由于形成了簇的结构，成员节点只和自己的簇头节点通信，如果收到来自其它节点的消息，会自动屏蔽，因此不用担心簇头节点的时隙表被其它簇成员错误接收。

一旦网络中的簇已经形成，并且 TDMA 时隙表也已经确定下来，就开始了数据发送。假设传感器节点总是有数据要发送（LEACH 协议采取的就是连续数据发送模式），在属于自己的时隙里，成员节点会把数据发送给自己的簇头节点。在发送阶段，在自己的时隙没有到来的时候，成员节点可以自己关闭自己的接收机以节约能量。而簇头节点必须一直把自己的接收机处于开启状态，用于接收来自不同成员节点的数据，当一轮的数据传输完毕后，簇头节点会对接收到的数据进行数据处理（融合），把接收到的数据压缩成一个新的信号。例如，如果数据是声学信号或者地震信号，簇头节点会把信号处理成一个复合信号，然后发送到基站。由于这是一个远距离通信，因此比较消耗能量。

上面的通信过程都是在一个簇的内部进行的，由于网络正常工作的时

候，是多个簇在同时进行工作，因此一个簇内的通信难免会影响到其它邻近簇的工作，为了避免这种情况的影响，不同簇内部的通信采用了 CDMA 机制。这样，如果一个节点担任了簇头节点，那么簇头节点就从一组扩展码中选出一个作为这个簇的标识码，然后通知簇中的成员节点。这样，在簇内通信的时候，其它簇的信号就会被过滤掉。

LEACH 通过把网络的负载均匀地分布在整个网络上，大大节约了通信过程中的能量损耗。在不同的轮中，由不同的节点充当簇头节点，把远距离通信的负载轮流分配在网络节点。另外，簇头节点在处理数据时用到了数据融合技术和压缩技术，使得传输的数据量大大减小。

3.4 聚类路由改进算法的研究

假设 N 个传感器节点随机均匀分布在一个正方形区域内，并假设该传感器网络具有如下性质：

(1) 每个节点的初始化能量、硬件结构和处理能力等方面能力完全相同，而且节点能量在网络运行过程中不能补充，也就是在成簇之前，所有节点同构；每个节点均配置有向天线。

(2) 节点一旦布设完毕后，位置不再变化。

(3) 所有节点均具有数据融合能力，每个节点具有一个全网唯一的 ID。

(4) 基站（汇聚节点）位于感知区域之外，且一旦布设完毕后，基站位置不再变化。且基站是唯一的。

(5) 节点的无线发射功率可控，即节点可以根据接收到信号的强弱判断与信号发出者之间的距离，节点可以自由调整发射功率，以便节约能量。

能量模型：

节点发送 K 比特数据致 d 距离，消耗能量分为发射电路损耗和功率放大损耗两部分：

$$E_{tx} = k * E_{elec} + K * \epsilon_{fs} d^2 \quad d < d_0 \quad (3-4)$$

$$E_{tx} = k * E_{elec} + K * \epsilon_{amp} d^4 \quad d \geq d_0 \quad (3-5)$$

$$E_{rx} = k * E_{elec} \quad (3-6)$$

公式(3-4)，(3-5)为发射 k 比特数据损耗的能量，由发射电路损耗和功率放大损耗两部分组成。功率放大损耗则根据发送者和接收者之间的距离分别

采用自由空间模型和多路径衰减模型。 E_{elec} 为发射电路的损耗能量， \mathcal{E}_{fs} 、 \mathcal{E}_{amp} 分别为两种信道模型下功率放大所需能量。公式(3-6)为接收 k 比特数据的能量损耗，仅由电路损耗引起。

3.4.1 感知节点位置信息的取得

在整个传感器网络开始工作之前，由 BS 向全网广播一个“HELLO”信息，节点通过接收到基站（BS）所发出信号的强弱，近似计算出节点与 BS 之间的距离以及节点与 BS 之前的角度。之后所有节点将测得的距离和角度信息，以及本身的节点 ID 通知给 BS。BS 已知地理位置信息。假设 BS 为直角坐标系的 $(0, 0)$ 点，那么所有感知节点应该都处于直角坐标系得第一、二象限。当 BS 收集到所有感知节点发送的距离信息、角度信息后，可以通过计算得到所有节点在坐标系中的坐标，进而确定在直角坐标系中该节点的位置。

3.4.2 感知区域内最优簇头数量的计算

已有文献证明了 3 个相邻不联通节点之间的重叠角 θ 最大为 $\pi/3$ ，如图 3-9 所示。如果网络中任意相邻的 3 个簇头之间都有最大的重叠角，显然每个簇的实际面积将最小，如图 3-10 所示。在图 3-10 中，簇头 A 的 6 个邻居簇头节点（B, C, D, E, F, G）构成一个正六边形，任意两个节点间的距离为 $r_c + \varepsilon$ ，其中， $\varepsilon \rightarrow 0$ ， r_c 表示簇半径。显然，当任意两簇头之间的距离 $\leq r_c$ 时，簇头 A 将被其 6 个邻居节点所覆盖。图 3-10 表示了簇头数量最多的情况。实际上，簇头 A 所代表的簇是一个边长为 $r_c / \sqrt{3}$ 的正六边形，其簇

面积为 $\sqrt{3} r_c^2 / 2$ ，故整个网络中最大簇头数量为 $K_{\max} = \left\lceil \frac{2\|A\|}{\sqrt{3}r_c^2} \right\rceil$ 。

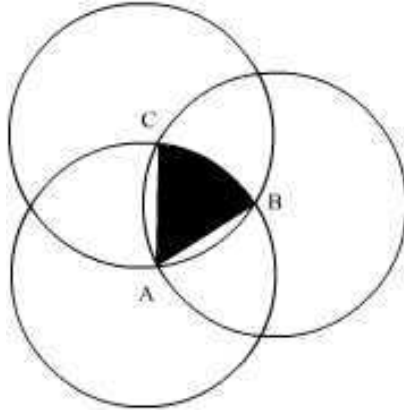


图 3-9 三相邻簇间最大重叠角

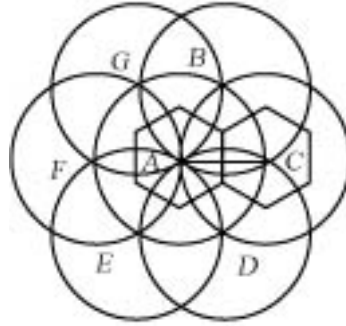


图 3-10 最小簇面积示意图

如图 3-11 所示，簇头 A 的 6 个邻居簇头节点构成一个正六边形。任意两个簇头节点之间的距离为 $\sqrt{3}(r_c - \varepsilon)$ ， $\varepsilon \rightarrow 0$ ，当任意两点间距离大于 $\sqrt{3}r_c$ 时，会产生盲点。图 3-11 表示了相邻簇间重叠面积最小的情况。簇头 A 代表的簇是一个边长为 $\sqrt{3}r_c$ 的正六边形，其面积等于 $3\sqrt{3}r_c^2/2$ ，故整个网络中最小的簇头数量为 $K_{\min} = \lceil (2\|A\|)/(3\sqrt{3}r_c^2) \rceil$ 。

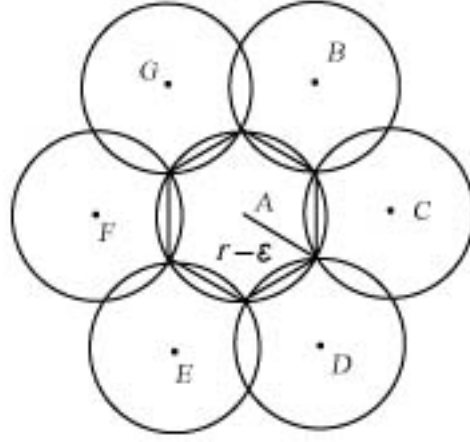


图 3-11 最大簇面积示意图

根据上面的描述，对于任意一个簇 C_i ，其实际簇面积都符合不等式 $\sqrt{3}r_c^2/2 \leq \|C_i\| \leq 3\sqrt{3}r_c^2/2$ 。由于最大和最小簇面积都与 r_c^2 成正比，因此可以推断出实际簇面积期望同样与 r_c^2 成正比。通过最大簇头和最小簇头的取值，可以确定在整个网络中实际簇头数量的期望为 $k_{\text{exp}} = \lfloor (4\|A\|)/(3\sqrt{3}r_c^2) \rfloor$ 。

3.4.3 最优簇半径的确定

对于整个网络而言，成员节点和簇头节点的能量消耗模型是不一样的。所以，在下面单独讨论这两类节点。

对于普通成员节点，它每到自己的数据发送时间，都有数据需要传输到簇头节点。假设每次传输数据消息的长度为 L ，则根据无线通信模型可知成员节点传输该消息所消耗的能量如式 3-7：

$$E_{\text{member}} = L * E_{\text{elec}} + L * \epsilon_{\text{fs}} d_{\text{toch}}^2 \quad (3-7)$$

理想情况下，假设实际的簇是一个面积为 $\lfloor (4\|A\|)/(3\sqrt{3}r_c^2) \rfloor$ 的圆，因此有式 (3-8)：

$$E[d_{\text{toch}}^2] = \rho \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\sqrt{3}\sqrt{3}}{2\sqrt{\pi}} r_c} r^3 dr d\theta \quad (3-8)$$

对于一个面积为 $\lfloor (4\|A\|)/(3\sqrt{3}r_c^2) \rfloor$ 的圆来讲，在该圆内的节点分布是随机

的，所以节点位置对于簇头来讲，位置也是随机的，故节点距离簇头的距离只能通过估算得到，上式为普通节点距离簇头节点的距离期望值，也就是均值。

其中，由于节点在簇内随机分布，所以 $\rho = \frac{4}{3\sqrt{3}r_c^2}$ ，故有公式 (3-9)：

$$E[d_{loch}^2] = \frac{9}{8\sqrt{3}\pi} r_c^2 \quad (3-9)$$

由上面公式可以得到，成员节点在每一次传输数据所消耗的能量为

$$E_{member} = L * E_{elec} + L * \epsilon_{fs} * \frac{9}{8\sqrt{3}\pi} r_c^2 \quad (3-10)$$

对于簇头节点：能耗由 4 部分组成：（1）接受和融合成员节点所感知数据所消耗的能量；（2）接收远端簇头发来的数据；（3）转发远端簇头的的数据；（4）发送自身数据。

由上所述，每个圆的圆心距离最近的相邻圆心的距离不会超过 $2r_c$ ，所以假设簇间通信半径为 $2r_c$ ，以保证连通。簇头数量 k_{exp} 已经确定。节点数量为 N 。那么近似认为每个簇的节点数量为 $\frac{N}{k_{exp}}$ 。设在簇内，簇头融合每个

节点数据的能量消耗为 E_{DA} ，则融合所有簇内节点的能耗为 $L * (\frac{N}{k_{exp}} - 1) * E_{DA}$ 。

接收 $\frac{N}{k_{exp}} - 1$ 个节点的数据能耗为 $L * E_{elec} * (\frac{N}{k_{exp}} - 1)$ 。故可以得出接受和融合成员节点感知数据的能耗为：

$$E_{T \& A} = L * (\frac{N}{k_{exp}} - 1) * E_{DA} + L * E_{elec} * (\frac{N}{k_{exp}} - 1) \quad (3-11)$$

设簇头融合成员节点的数据后，得到的需要转发的数据长度依然为 L ，则该簇头发送本簇融合后的数据到转发节点的能量消耗为：

$$E_{TL} = L * E_{elec} + L * \epsilon_{fs} (2r_c)^2 \quad (3-12)$$

由于感知区域为正方形区域，簇头数量为 k_{exp} ，则在某一转发路径上，簇头个数近似约等于 $\sqrt{k_{exp}}$ ，最远簇头转发数为 0，最近簇头转发数为 $\sqrt{k_{exp}} - 2$ 。所有簇头的转发数在 $[0, \sqrt{k_{exp}} - 2]$ 区间内。那么转发数的均值为

$\frac{\sqrt{k_{\text{exp}}}-2}{2}$ ，那么转发远端簇头数据的能量消耗为：

$$E_{TR} = (L * E_{elec} + L * \epsilon_{fs} * (2r_c)^2) * \left(\frac{\sqrt{k_{\text{exp}}}-2}{2} \right) \quad (3-13)$$

接收远端簇头的数据能耗为：

$$E_{RX} = (L * E_{elec}) * \left(\frac{\sqrt{k_{\text{exp}}}-2}{2} \right) \quad (3-14)$$

公式 (3-11) + (3-12) + (3-13) + (3-14) 得到的加和即为单个簇头在完成一个数据周期所需的能量消耗。即：

$$\begin{aligned} E_{CH} = & K_{\text{exp}} \left[L * \left(\frac{N}{k_{\text{exp}}} - 1 \right) * E_{DA} + L * E_{elec} * \left(\frac{N}{k_{\text{exp}}} - 1 \right) + L * E_{elec} + L * \epsilon_{fs} (2r_c)^2 + \right. \\ & (L * E_{elec} + L * \epsilon_{fs} * (2r_c)^2) * \left(\frac{\sqrt{k_{\text{exp}}}-2}{2} \right) + \\ & \left. (L * E_{elec}) * \left(\frac{\sqrt{k_{\text{exp}}}-2}{2} \right) + \left(\frac{N}{K_{\text{exp}}} - 1 \right) * \left(L * E_{elec} + L * \epsilon_{fs} * \frac{9}{8\sqrt{3}\pi} r_c^2 \right) \right] \end{aligned} \quad (3-15)$$

前面已经阐述过，成员节点一个数据周期的能量消耗为：

$$E_{member} = L * E_{elec} + L * \epsilon_{fs} * \frac{9}{8\sqrt{3}\pi} r_c^2 \quad (3-16)$$

因此得到一个簇的一个数据周期的能量消耗为：

$$E_{cluster} = E_{CH} + \left(\frac{N}{K_{\text{exp}}} - 1 \right) E_{member} \quad (3-17)$$

整个网络内用于传输数据的能耗为：

$$E_{total} = K_{\text{exp}} * E_{cluster} \quad (3-18)$$

将 E_{total} 展开，得到的公式 3-19：

$$\begin{aligned} E_{total} = & \frac{4\|A\|}{3\sqrt{3}r_c^2} * \left[L * \left(\frac{N}{k_{\text{exp}}} - 1 \right) * E_{DA} + L * E_{elec} * \left(\frac{N}{k_{\text{exp}}} - 1 \right) + \right. \\ & L * E_{elec} + L * \epsilon_{fs} (2r_c)^2 + (L * E_{elec} + L * \epsilon_{fs} * (2r_c)^2) * \left(\frac{\sqrt{k_{\text{exp}}}-2}{2} \right) + \\ & \left. (L * E_{elec}) * \left(\frac{\sqrt{k_{\text{exp}}}-2}{2} \right) + \left(\frac{N}{K_{\text{exp}}} - 1 \right) * \left(L * E_{elec} + L * \epsilon_{fs} * \frac{9}{8\sqrt{3}\pi} r_c^2 \right) \right] \end{aligned} \quad (3-19)$$

以簇半径 R 为变量对上式求导，则可得到最优簇半径。

由公式 (3-19) 得到半径公式为：

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{9 * N * L * E_{fs}}{4\sqrt{3}\pi} \right) * r_c^5 - 3 * L * E_{elec} * \sqrt{\left(\frac{4 * A}{3\sqrt{3}} \right)^3} + \\
 & 2 * \left(\frac{4 * L * E_{elec} * A}{\sqrt{3}} + \frac{4 * L * E_{DA} * A}{3\sqrt{3}} \right) * r_c - \left(2 * L * E_{fs} * \sqrt{\left(\frac{4 * A}{3\sqrt{3}} \right)^3} \right) * r_c^2 = 0
 \end{aligned} \tag{3-20}$$

3.4.4 簇首节点的确定及工作方式

簇半径确定后，由 BS 根据现有簇半径进行集中式成簇，在感知区域内，用求得簇的数量全部覆盖感知区域。在集中式成簇过程中，BS 是能够明确每个簇的圆心坐标的。所有圆心形成一个集合，所有感知节点的坐标已经求出的情况下，计算出所有节点与圆心集合中各个圆心的距离是可以实现的（在 BS 端完成）。在 BS 计算完所有节点与圆心距离之后，就可以确定每个圆心距离自己最近的节点和其次近的节点，也就是每个簇确定两个距离本簇圆心最近的节点，之所以确定一个最近节点和其次近节点，是为了将最近节点指定成初始化的簇头，而其次近节点作为备用簇头。在 BS 端，距离本簇圆心最近的所有节点 ID 形成一个集合，距离本簇圆心其次近的所有节点 ID 形成另外一个集合。这两个集合稳定之后，由 BS 向全网广播这两个集合。所有感知节点接收到来自 BS 的广播信息后，开始与本地 ID 比较，发现广播集合中有自己，便随之成为簇头或备用簇头。

至此，所有簇中的簇头和备用簇头均已确定。随着簇头的确定，簇也就确定下来，由基站为每个确定的簇指定一个簇 ID，即为每个簇进行编号，为方便后续簇间传递数据。

簇头节点确定后，由于簇半径已知，簇头可以通过调整发射功率，以簇半径为发送范围，向全簇广播成为簇头的消息。簇内节点接收到簇头的邀请消息后，向簇头发送加入信息。有可能存在某个节点接收到两个或多个簇头的邀请信息，而且根据功率判断距离后，得到的结论是该节点距离多个簇头的距离相等，在这种情况下发生时，该感知节点取簇头 ID 最小的簇头加入。

备用簇头确定后，由于簇半径已知，备用簇头通过调整发射功率，以簇半径为发送范围，向全簇广播成为备用簇头的消息。簇内节点接收到该消息后，将备用簇头的 ID 纪录在本地，并采用和簇头一样的方式，告知备用簇头，已经加入的消息。备用簇头在收集到所有本地感知节点的加入信息后，进入休眠状态。

备用簇头在以下两种情况发生时，升级为主簇头。

(1) 当主簇头发生一些意外情况，如遭到人为破坏等原因时，簇中节点将无法找到主簇头，在节点无法找到主簇头时，备用簇头被感知节点唤醒，直接升级成主簇头。

(2) 当主簇头工作若干时间之后，能量的衰减要大大高于普通节点，所以，主簇头的能量衰减是很快的。有鉴于此，我们设定一个阈值，取值范围在 $(0, 1)$ 之间。当阈值与簇头初始化能量之积小于 30% 时，该簇头向全簇广播自己降级成普通感知节点的消息，并宣布不再成为簇头。同时，备用簇头被该消息唤醒，向全簇宣布自己成为主簇头的消息。备用簇头成为主簇头后，需要更新 BS 端的簇头集合。BS 端发现该簇的备用簇头成为主簇头后，将该备用簇头从主簇头中删除，之后重新计算该簇中距离圆心较近的节点，发现该节点后，将该节点 ID 纪录进 BS 自身的备用簇头集合。之后向全网广播，该簇内的被选中节点发现自己成为备用簇头后，向簇内所有节点广播成为备用簇头的消息，根据上述备用簇头的工作方式，将自身升级为备用簇头，随后进入休眠状态，等待主簇头发生意外或能量衰减到一定程度后，重复上述升级成主簇头的工作。

3.4.5 簇内节点与簇首之间数据传递次序

在成簇完毕之后，每个簇的主簇头和备用簇头均已经确定。主簇头向所有成员节点发送 TDMA 时隙表，用于确定每个成员节点向簇头发送数据的具体时间。由于 LEACH 协议是绝对按轮实现的，所以可以在每轮开始时确定 TDMA 时隙，但上述成簇方法并不是绝对按照轮的方式实现的，也就是在不更换簇头的情况下，每个成员节点可能向簇头传送多次数据。为解决多次向同一簇头发送多次数据的问题，在这里我们预先设定一个时间门限 T ， T 的含义是估计所有簇内成员节点完成一个数据发送周期所需要的时间总和，当 TDMA 时隙发送给成员节点之后，经过 T 时间之后，主簇头重新生成一个 TDMA 时隙表，并下发给所有成员节点，以此类推，直至发生簇头更换。

3.4.6 簇间传输方式

此过程发生在每个簇的数据均已传送到簇头节点，并由簇头节点完成了对本簇内数据的融合。而簇间传输方式也就是所有簇头信息如何到达基站

的问题。一般情况下，簇头与基站之间的通信方式分为两个大方向：一种是和 LEACH 协议类似的簇头单跳到达基站的方式，另外一种方式是现在较多采用的簇头多跳到达基站的方式。而我在簇头与基站间的方式上，选择的是多跳通信的方式。

所谓多跳路由与单跳路由相比，最大的特点是：距离基站较远的簇头在向基站发送数据时，并不是与基站直接点对点通信，而是通过中间节点的转发，来完成与基站之间的数据通信。这种方法与单跳路由相比，最大的优点在于：可以避免较远簇头的长距离数据发送，从而节省较远节点的能量；而最大的缺点在于：在避免较远簇头因长距离发送数据损耗能量的同时，使距离基站较近的簇头转发较远簇头的数据的工作量增大，从而使距离基站较近的节点反而更容易耗尽能量。尽管多跳得方式与单跳方式相比，并不是没有缺点，而且缺点也很明显，但一些文献证明了多跳要比单跳方式更节省能量，所以，我在这里选择的是多跳的簇间通信方式。

由于本算法在成簇阶段采用的时由基站集中式成簇的方式，所以，在簇确定之后，簇内成员节点也就固定了，而不是像 LEACH 一样，是随着每轮选举而动态加入的。

在簇形成时，所有节点与基站之间的距离均是已知的，而且所有节点相对于基站的方向也是已知的（通过天线）。在所有节点均已经加入到具体的簇内的情况下，我们可以在基站计算所有簇内节点到达基站的平均距离，通过平均距离得出所有簇相对于基站的距离的远近。在以每个簇形成时产生的第一个簇头的角度作为计算依据，与其他所有的簇头的角度进行比较，选择相差最小角度并距离最近的簇头作为自己的转发簇头。综上所述，在选择转发簇头时考虑的是：

第一：与基站角度最小；

第二：与本簇头距离最近；

第三：转发簇头与基站的距离一定小于本簇头与基站的距离。

在基站完成上述过程后，簇间通信的转发形式也就随之确定了。

3.5 本章小结

本章详细介绍了 LEACH 协议的设计原理、物理模型以及运行过程。同时，针对 LEACH 协议的一系列特点，总结了一些 LEACH 协议的缺点与不足。而这些不足对于整个网络的生存周期的影响是不言而喻的。针对 LEACH 协议的缺点与不足，给出了 MD-LEACH 协议，虽然新协议大体轮廓以分簇为基础，但具体实现方式已经与 LEACH 协议有了很大的区别，克服了 LEACH 协议的一些缺点与不足，为提高网络生存周期提供了有力的保障。本章给出了 LEACH 协议和 MD-LEACH 协议的整体设计与实现的思想，为后续协议的实现以及仿真结果的比较打下了坚实的基础。

第 4 章 算法实现及算法结果的验证与评价

4.1 系统实现

4.1.1 LEACH 协议的仿真实现

4.1.1.1 通信模型

为了便于比较，LEACH 协议采用 Heinzelman 等人提出的简化无线通信模型^[39]，如图 4-1。

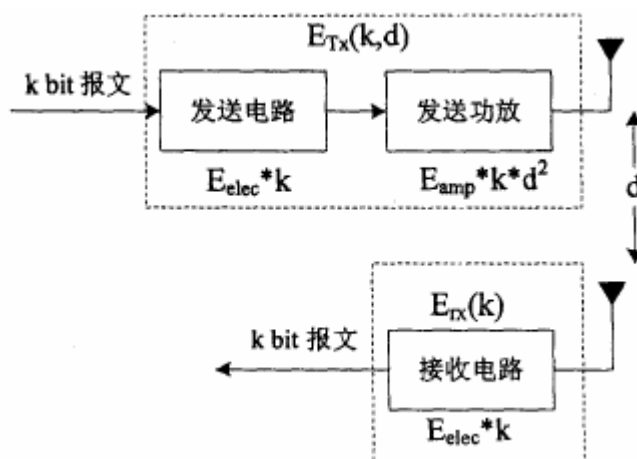


图 4-1 无线通信模型

假设发送或接收电路消耗为 E_{elec} ，传输功放为 ϵ_{amp} ，信号传输则采用自由空间传输模式，特征如公式 4-1 所示。由此，发送一个长度为 k 比特的消息，距离为 d ，能量消耗为：

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx_elec}(k) + E_{Tx_amp}(k, d) = E_{elec} \cdot k + \epsilon_{amp} \cdot k \cdot d^2 \quad (4-1)$$

接收这个消息，能量消耗为：

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx_elec}(k) = E_{elec} \cdot k \quad (4-2)$$

首先假设传输信道是对称的，如此再给定信噪比条件下，从传感器 A 到传感器 B 传输一个消息消耗的能量和从 B 到 A 传输相同信息的能量消耗相同。此外，假设所有传感器按固定速率持续采集数据，每一轮都有数据发送。

表 4-1 无线通信特征

参数名称	取值
发送消耗 E_{Tx_elec}	50nJ/bit/m
接收消耗 E_{Rx_elec}	
$(E_{Tx_elec}(k) = E_{Rx_elec}(k) = E_{elec})$	
初始能量 E	0.5J
感应半径 R	15m
传输功放 ϵ_{amp}	100pJ/bit/m ²
簇头节点所占比例 p	5%
报文融合消耗	5nJ/bit

4.1.1.2 具体实现

在设定了通信模型之后，下面将介绍具体实现的程序主体流程。
协议总体流程如图 4-2 所示，对应得程序总体流程如图 4-3 所示。

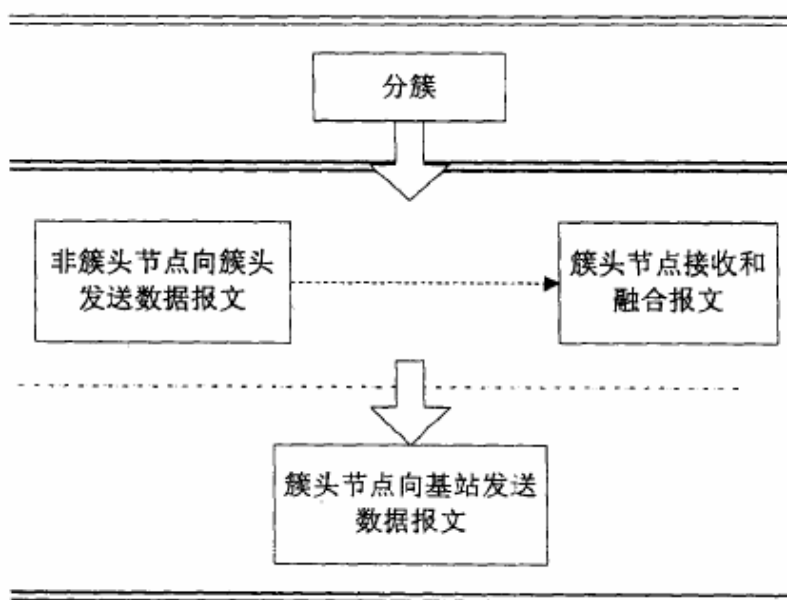


图 4-2 协议一轮整体流程

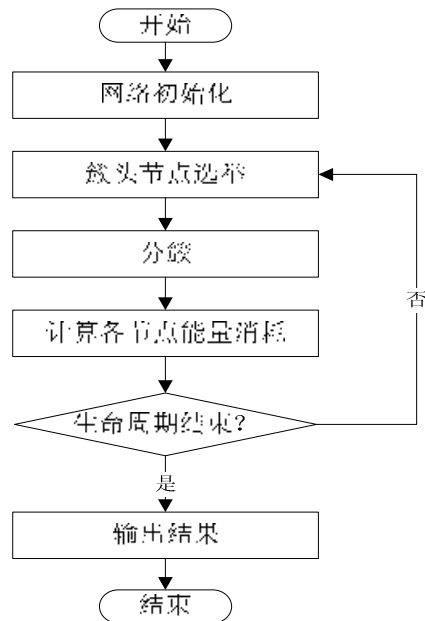


图 4-3 LEACH 协议实现流程图

采用前述中的通信模型，将 100 个无线传感器节点均匀分布在边长 D 米的方形监测区域内，基站坐标为 $(D/2, -100)$ ，与最近的节点距离在 100m 以上，如图 4-4 所示。

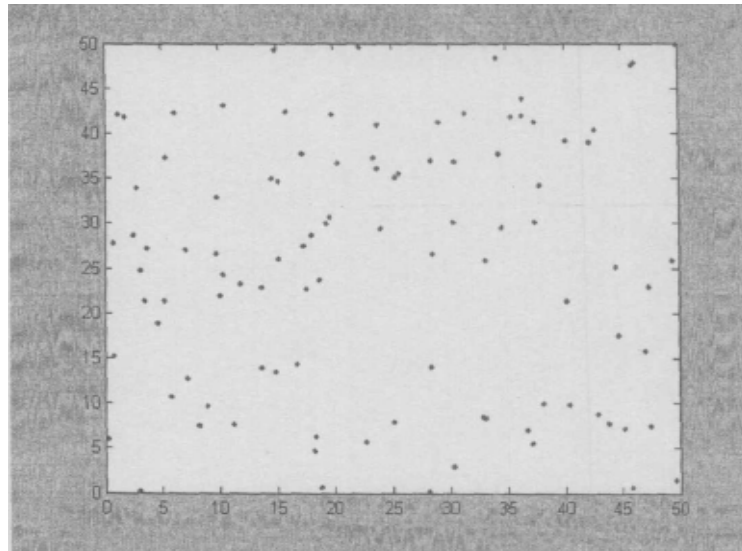


图 4-4 100 个传感器节点随机分布的网络， $D=50$

根据图 4-3，程序主要由以下几个部分构成：

(1) 网络初始化

网络初始化主要包括一些初始参数的设置，以及传感器节点的构造。网络初始化参数是用 `const` 定义的，而传感器节点是用一个 `sensor` 类定义的。这个 `sensor` 类中包括该传感器的位置、剩余能量、当前状态、簇头节点指针、邻居节点信息等，根据不同协议的要求可对其进行扩充。所有传感器用一个双向链表存储。

程序开始阶段要随机生成这些节点的位置信息，均匀分布在如图 4-4 所示的 $D \times D$ 方形区域内。

(2) 簇头选举

LEACH 协议的簇头选举按公式 (3-3) 实现。在程序实现中，给每个节点设置了一个状态变量 `flag`，`flag=1` 表示在本次循环中该节点已经担任过簇头，反之则没有，没过 $1/P$ 轮，将所有节点的 `flag` 变量清零，开始新循环。此外，为了指示节点状态，定义了一个枚举类型 `HEAD`，用于指示节点的状态，节点为簇头则状态为 `YES`，否则为 `NO`。

在每一轮初始阶段，所有 `flag=0` 的节点都生成一个 $(0, 1)$ 之间的随机数，如果数字小于本轮的 $T(n)$ （节点担任簇头的概率）值，则该节点成为簇头，其主体语句为：

```
Seq=rand()/(double)RAND_MAX;           //生成 0, 1 间的平均数
Tn=p/(1-p*(t%int(1/p)));                 //簇头判定条件
```

要注意的是，文献^[39]中提出每一轮簇头数量为 5 个，并不是指每一轮都刚好有 5 个簇头，而是每轮按 0.05 的概率选举簇头，在节点数为 100 个的情况下，期望值为 5，因此每轮的簇头数可能多于或少于 5 个，只是在概率上趋于 5 个。在极个别情况下甚至可能出现簇头数为 0 的情况，这种情况下每个节点直接与基站进行通信，能量消耗很大，因此这种情况要尽量避免，例如可以规定，出现此情况则重新进行簇头选举。

(3) 簇建立过程

簇头一经选出就向全网广播，各节点根据收到簇头广播信号的强弱选择信号最强的簇加入。在程序中则用距离簇头的远近来判断，选择离它最近的簇加入。距离用 `transmit_len` 变量表示，并将所有非簇头节点的 `cluster_head` 指针指向其簇头。最后通知簇头，簇头用 `num_cluster_node` 变量存放其包含的节点数量。整个簇建立阶段流程如图 4-5 所示。

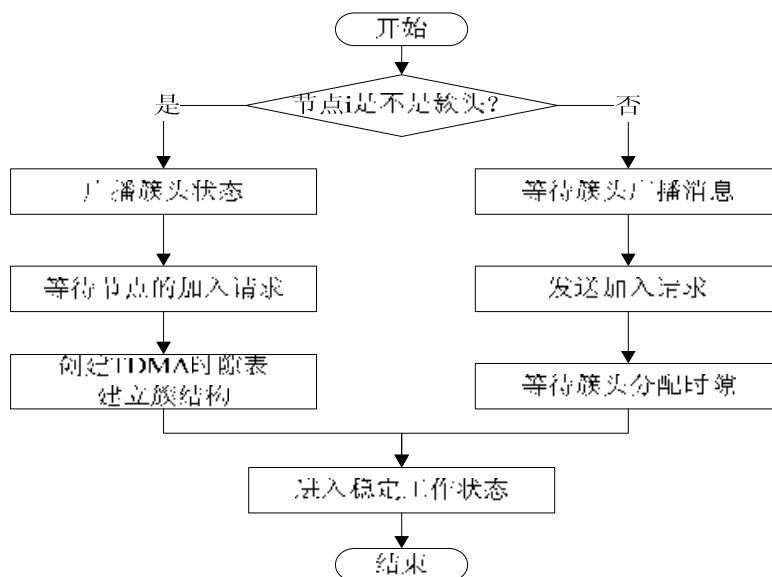


图 4-5 簇建立阶段流程

(4) 计算能量消耗

按公式 (4-1)、(4-2) 计算所有节点的能量消耗。在计算能量消耗时的主要问题是能量消耗的实时性计算。

传感器网络实际运行中簇头节点和非簇头节点的能量消耗是同时进行的，各节点按时序表与簇头节点通信。这种情况下，如果簇头节点在一轮的中途死亡，则该簇的 TDMA 时隙表中前面的节点要发送数据，而后面的节点在该轮中则不会发送数据。为了实现这种实时性，给各个节点都设置了一个指向其簇头的指针 `cluster_head`，并将所有头节点放置于链表的末端，程序运行中每一轮从链表头向表尾依次计算各节点的能量消耗，也就是先计算非头节点的能量消耗，再计算头节点的。程序中非头节点发送数据报文之前，先根据 `cluster_head` 指针判断其头节点是否死亡，若未死亡，则发送报文并计算能量消耗，同时根据其 `cluster_head` 指针计算其簇头节点接受和融合报文的能量消耗。当所有非头节点都计算完毕之后，则先判断各头节点的状态，若其已经死亡，则删除该节点，否则计算其向基站发送数据消耗的能量。

4.1.2 MD-LEACH 协议的仿真实现

为了便于比较，MD-LEACH 协议的无线通信模型采用与 LEACH 一致的无线通信模型。

在设定了通信模型之后，下面将介绍具体实现的程序主体流程。程序的

总体实现流程如下图 4-6 所示。

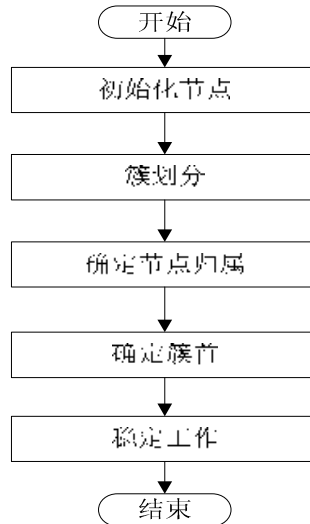


图 4-6 MD-LEACH 协议总体流程

采用前述中的通信模型，将 100 个无线传感器节点均匀分布在边长 D 米的方形监测区域内，基站坐标为 $(D/2, -100)$ ，与最近的节点距离在 100m 以上，如图 4-7 所示。

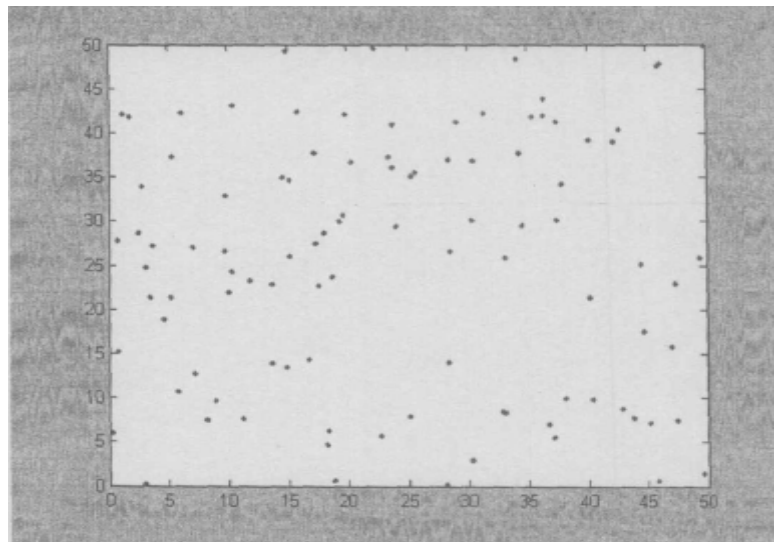


图 4-7 100 个传感器节点随机分布的网络， $D=50$

根据图 4-6 的流程，程序主要由以下几个部分构成

(1) 节点初始化阶段

节点初始化主要包括一些初始参数的设置。网络初始化参数是用 `const` 定义的，而传感器节点是用一个 `Sensor` 类定义的。这个 `sensor` 类中包括该

传感器节点的位置、剩余能量、当前状态、簇头节点指针、节点 ID、簇 ID 等,根据不同协议的要求可对其进行扩充。所有传感器用一个双向链表存储。

程序在初始化过程中,要在给定区域对节点进行随机分布,并且将节点的位置信息和初始能量等信息分配给所有节点。流程如图 4-8 所示。

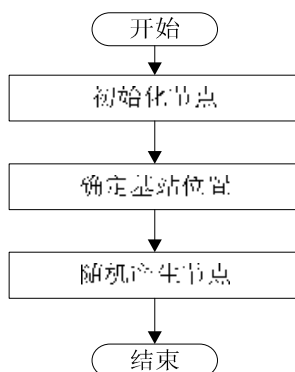


图 4-8 初始化节点

(2) 簇划分阶段

在该阶段,由基站对已经形成的感知区域进行簇划分。这里需要借助前述说明过的“最优簇头数量公式”和“最佳簇半径公式”。通过簇划分的过程,使圆形的簇区域全部覆盖感知区域。流程如图 4-9 所示。

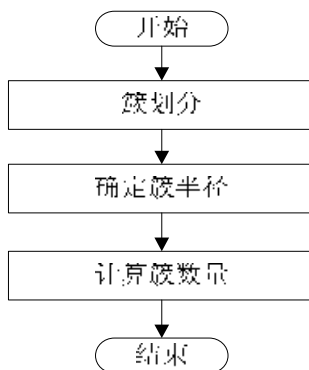


图 4-9 簇划分过程

(3) 确定节点归属阶段

感知区域的簇划分结束之后,对于感知区域的所有感知节点来说,自身属于哪个簇的问题还没有明确,这就涉及到了节点归属于哪个簇的问题。在对所有节点和簇进行编号(ID)的基础之上,由基站对所有节点计算距离所有簇圆心的距离,根据计算得到的距离,比较出某节点具体归属于某个簇。程序的具体流程如图 4-10 所示。

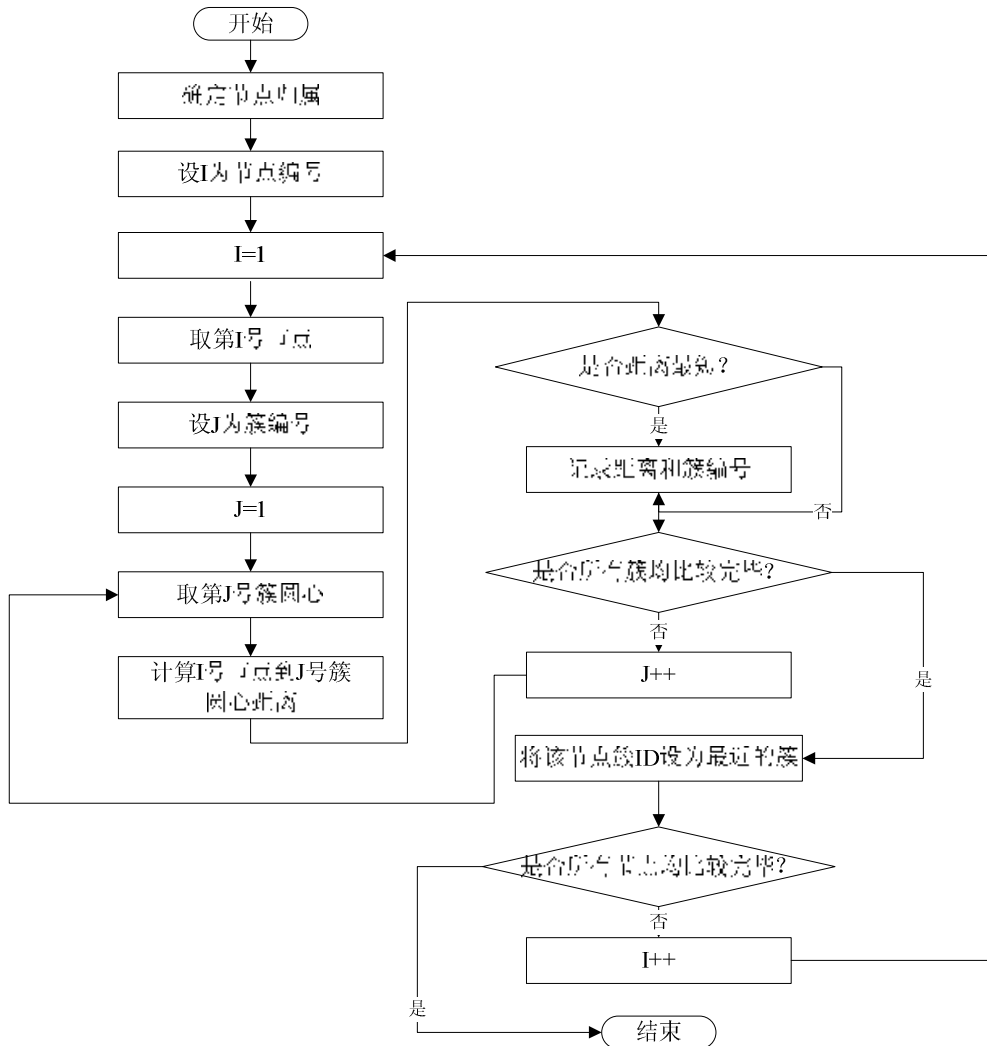


图 4-10 确定节点归属

(4) 簇首确定阶段

所有节点都明确了自身的簇归属问题之后，需要对每个簇的主簇首以及备用簇首进行确定。由基站对某个簇所包含的所有节点距离本簇圆心的距离进行计算，之后比较计算结果。距离本簇簇首最近和其次近的两个节点被指定为主簇首和备用簇首。

所有簇的主簇首和备用簇首均确定完毕之后，由基站记录主簇首和备用簇首的 ID 并向全网广播。告知所有节点簇首确定的消息，所有感知节点比较自身 ID，确认自身是否被选中成为簇首。流程如图 4-11 所示。

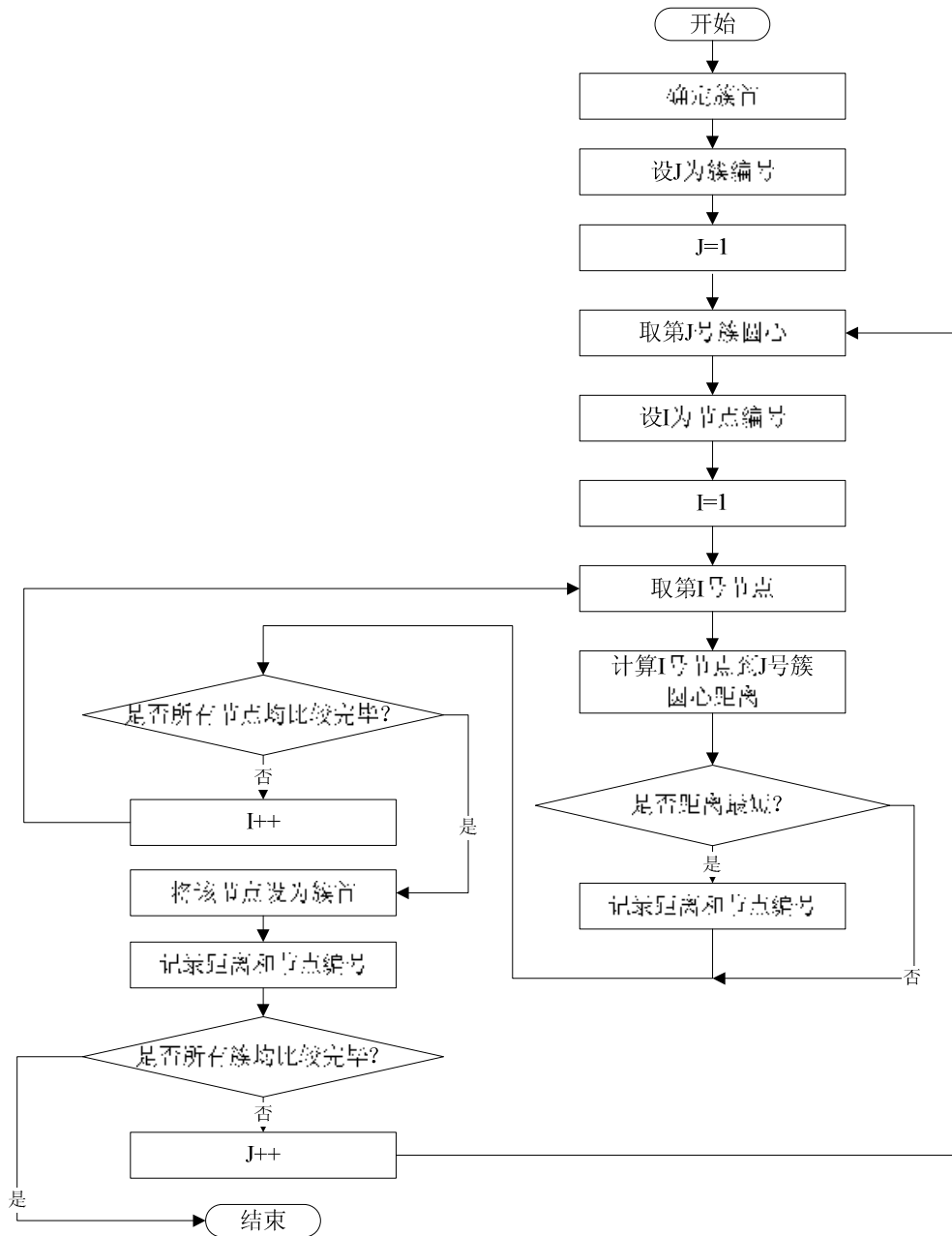


图 4-11 簇首确定

(5) 稳定工作阶段

网络进入稳定工作状态后，由预先设定好的 flag 状态值决定自身的身份，身份判断完毕后，节点各自进入自己的角色。

簇首节点在执行过程中，首先为本簇内的成员节点分配 TDMA 时隙，

并将时隙广播给所有成员节点。将成员节点发来的数据融合并通过路由选择向基站上报完数据之后，开始将自身剩余能量于初始能量进行比较，发现如果该值低于 30%，降级自身，成为成员节点。随后备用簇首由成员节点唤醒，充当主簇首。基站收到簇首更迭消息后，重新为该簇选出备用簇首。

成员节点在执行过程中，需等待簇首的 TDMA 时隙表建立好，并通知自身后，才能进入数据发送状态。在自身的时隙时间内进行于簇首节点的通信。经过一个数据采集与发送周期之后，等待新的时隙。如果在时间 T 内未接收到来自簇首的时隙表，表明主簇首已经降级，通知备用簇首升级成为主簇首。

所有节点正常运行一定时间之后，开始有节点陆续死亡，将节点死亡时间依次记录至预先设定好的变量中，最终以文本的形式输出，方便后续对生存周期的比较工作。

稳定工作状态的流程如图 4-12 所示。

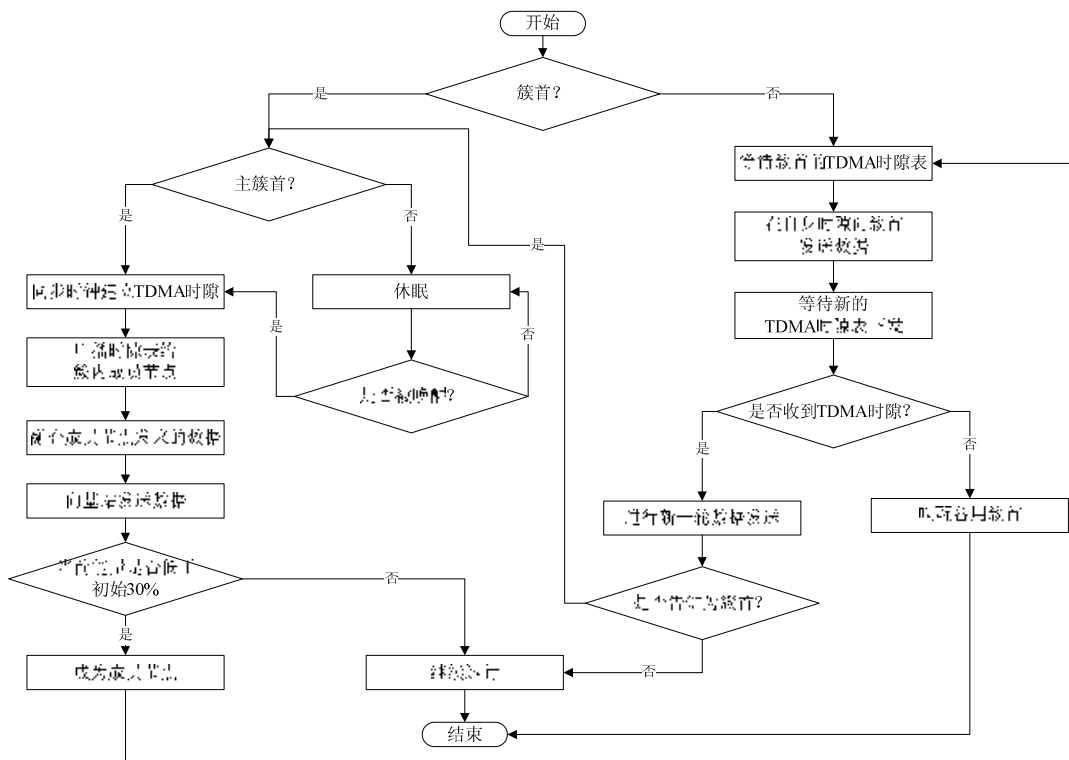


图 4-12 稳定工作状态

4.2 分析及仿真结果

在实现了 LEACH 协议和 MD-LEACH 协议的仿真实现之后，在本节内容中，将对两个协议的性能进行比较，从实验数据上说明 MD-LEACH 协议相比于 LEACH 协议的优点。

在前人所做的有关于 LEACH 协议的改进中，一般仍然采用与 LEACH 协议相似的“轮”的机制，就是通过协议执行的“轮”的数量，进行网络生存期的比较。也就是将执行的“轮”的数量等价地认为是网络的生存时间，即“轮”数越多，网络的生存周期越长。

但这种比较“轮”数的方式，在 LEACH 协议与 MD-LEACH 协议进行比较时是不能采用这种“轮”数比较方式的。因为本文提到的 MD-LEACH 协议在实现时突破了 LEACH 协议按“轮”运行的方式，不再按照“轮”为周期运行，这也就使在比较协议时，不能在按照传统的“轮”数量比较的方式来衡量网络的生存周期了。基于以上考虑，本文在比较 LEACH 协议和 MD-LEACH 时，直接采用比较两个协议运行时网络的生存时间的方式。在传感器网络的生存时间衡量标准问题上，一般存在三种标准：

- (1) 网络的第一个节点死亡，即标志网络失效
- (2) 网络中 70% 节点死亡，即标志网络失效
- (3) 网络中的全部节点死亡，即标志网络失效

在本文的性能比较中，这三种衡量标准将全部应用到。目的是为了获得一个更加准确、全面的性能分析结果。具体实验参数设置见表 4-2。

表 4-2 模拟参数

参数	取值	取值
感知区域尺寸	100*100	200*200
基站位置	50, 175	50, 200
节点数量	100	500
感知距离	30	40
$E_{elec}(nJ/bit)$	50	50
$E_{fs}(pJ/bit/m^2)$	13	13
$E_{amp}(pJ/bit/m^4)$	0.0013	0.0013
$E_{DA}(nJ/bit)$	5	5
数据包大小(bytes)	50	50

在本节中，将对 LEACH 和 MD-LEACH 协议进行全面的性能比较，在实验数据的比较中得到 MD-LEACH 优于 LEACH 的结论。

4.2.1 节点数量与运行时间的关系

设置：感知区域面积为 100×100 ，部署的节点数量分别为 100 和 500，基站的位置坐标为 (50, 200)，感知区域要求 100% 被覆盖（即所有节点都为工作节点）。实验结果如图 4-13 和图 4-14 所示。

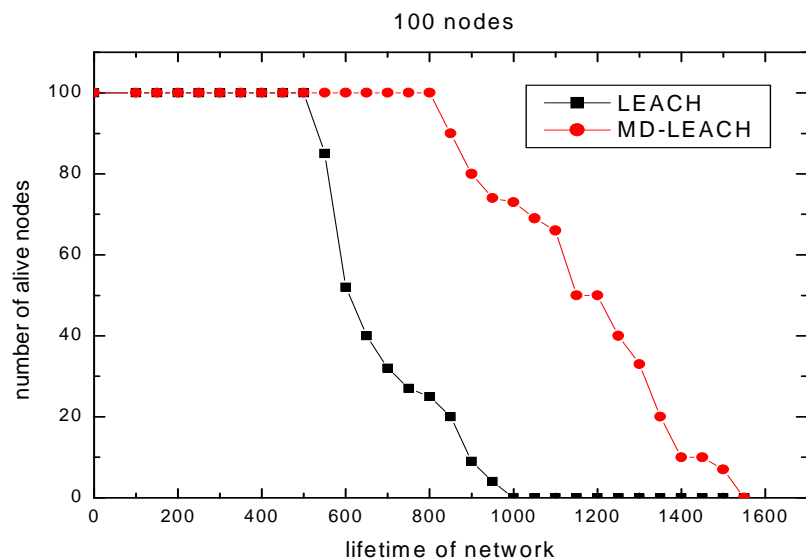


图 4-13 100 个节点时，LEACH 和 MD-LEACH 的生存时间比较

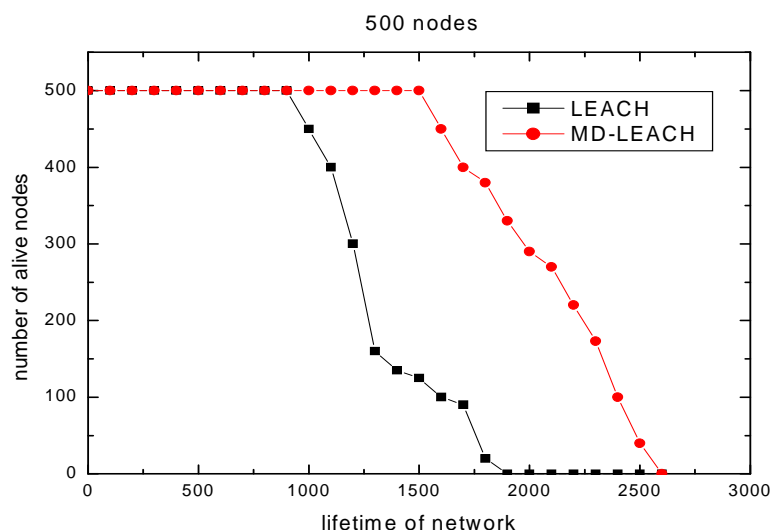


图 4-14 500 个节点时，LEACH 和 MD-LEACH 的生存时间比较

从以上两个仿真结果可以很明显的看出，在网络的生存时间方面，MD-LEACH 协议的生存时间要大大高于 LEACH。从仿真结果的走势可以看出，基本图形并没有因为节点数量的增加而改变，只是由于节点的增多，使网络的生存时间有了一点的增加。从上图形的结构可以看出，LEACH 协议从第一个节点死亡到最后一个节点死亡，经历的时间相对 MD-LEACH 协议较短，也就是说 LEACH 协议在分担能量方面还是有可取之处的，也是 MD-LEACH 协议还需要进一步改进的地方。但 MD-LEACH 相比 LEACH 协议的生存时间的提高在 30% 以上。

4.2.2 基站位置对性能的影响

设置：感知区域面积为 100×100 ，部署的节点数量为 100，基站位置从 (50, 175) 到 (50, 400)，MD-LEACH 协议的簇半径为 30，感知区域要求 100% 被覆盖（即所有节点都为工作节点）。仿真结果如图 4-15、图 4-16 和图 4-17 所示。

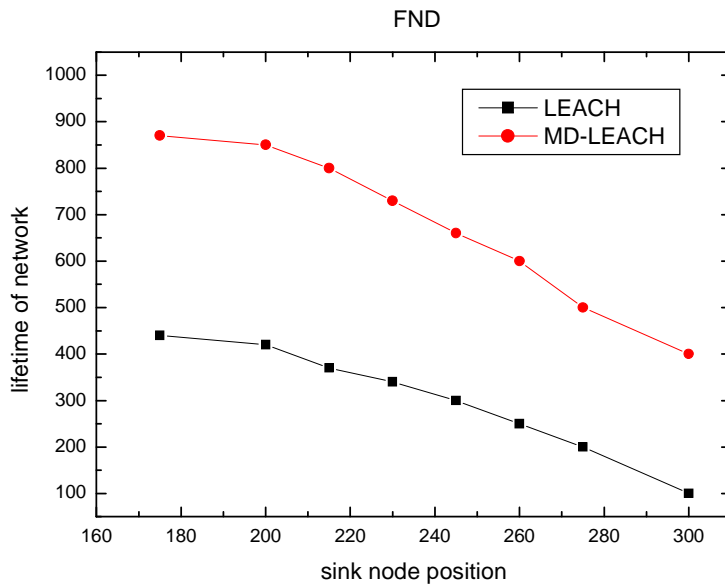


图 4-15 基站位置变化与生存时间的关系（FND）

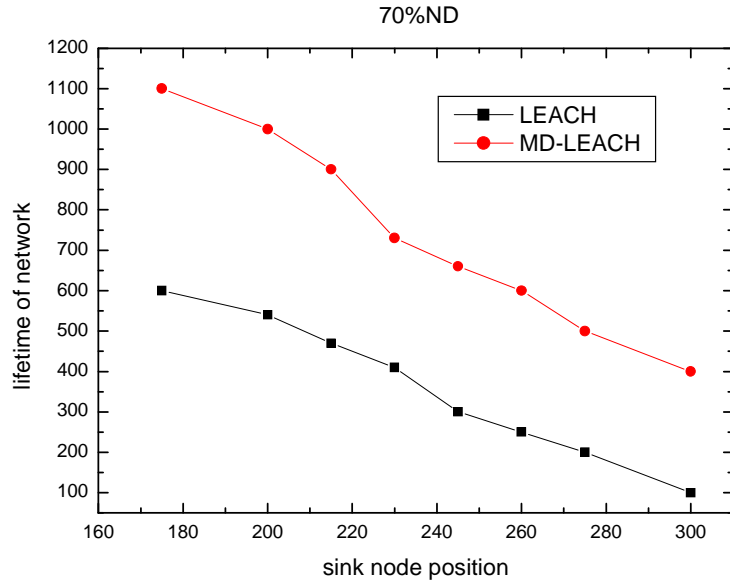


图 4-16 基站位置变化与生存时间的关系（70%ND）

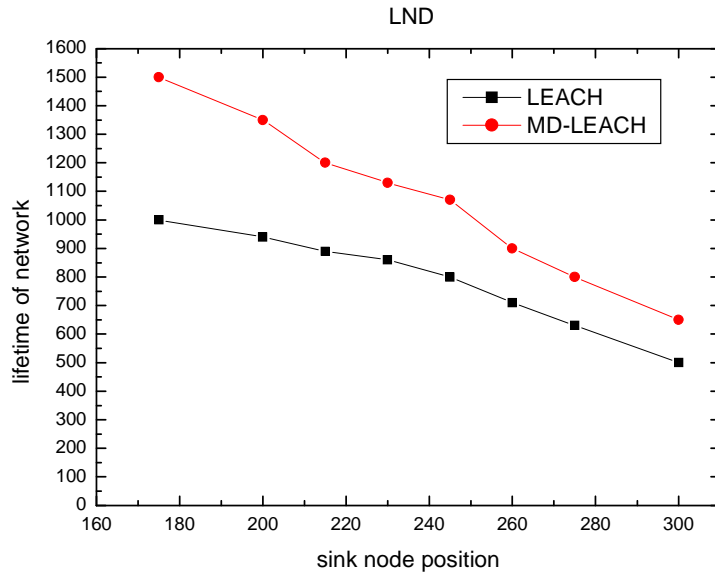


图 4-17 基站位置变化与生存时间的关系（LND）

随着基站位置远离感知区域，导致与基站通信的节点的能量消耗大幅度增加。因此，与基站直接通信的节点越多，其协议的性能就下降的越快。从

仿真曲线可以看出，MD-LEACH 相对于 LEACH 协议的优势仍然很明显。但相比较而言，从最后节点死亡（LND）的图形可以看出，LEACH 协议与 MD-LEACH 相对于第一个节点死亡（FND）和 70% 节点死亡（70%ND）劣势没有前两个图形明显。从以上三个仿真图形可以看出，MD-LEACH 在基站位置改变时，仍然体现出了比较明显的优势，也就是可扩展性得到了一定的体现。

4.2.3 感知区域面积对性能的影响

设置：感知区域面积为 $100*100 \sim 400*400$ ，部署的节点数量为 100，基站与感知区域的距离为 100，MD-LEACH 协议的簇半径为 30，感知区域要求 100% 覆盖（即所有节点都为工作节点）。仿真结果如图 4-18、4-19 和 4-20 所示。

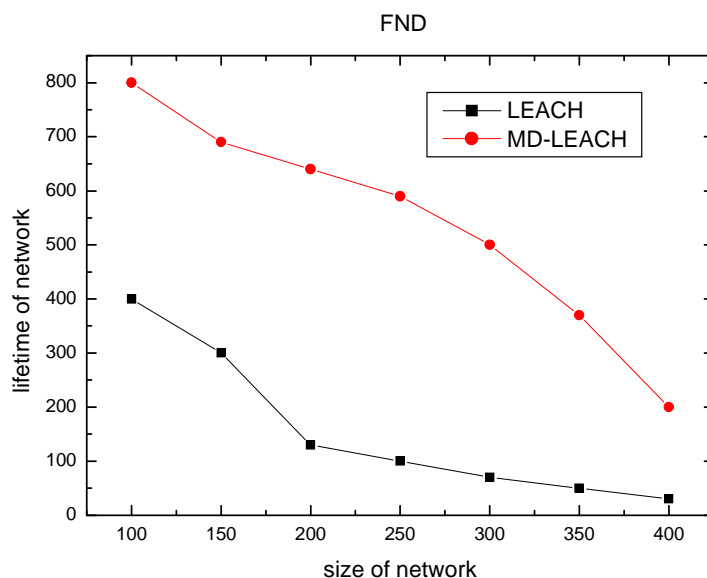


图 4-18 感知区域面积变化与生存时间的关系（FND）

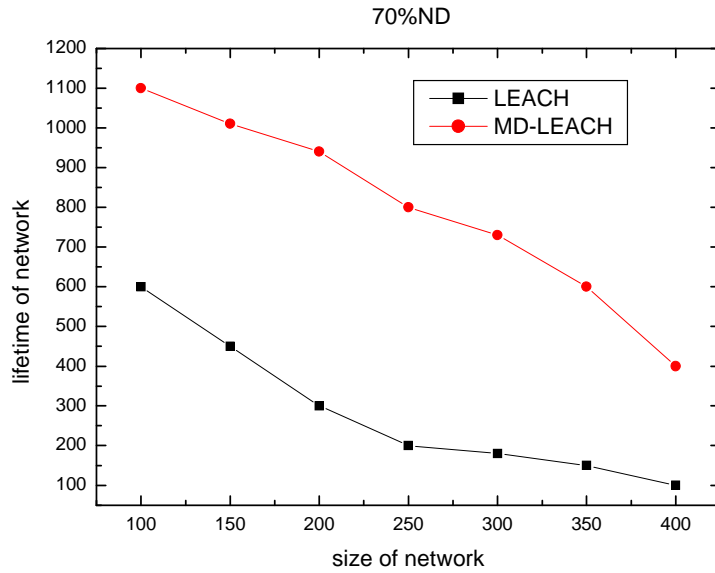


图 4-19 感知区域面积变化与生存时间的关系（70%ND）

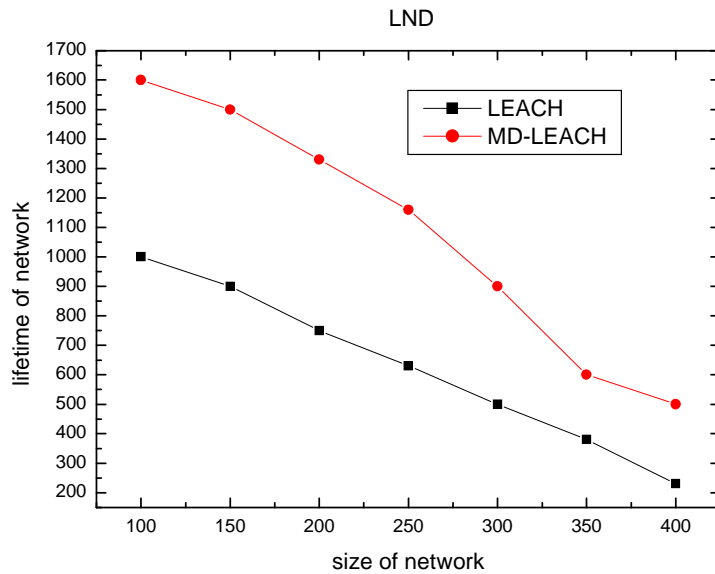


图 4-20 感知区域面积变化与生存时间的关系（LND）

图 4-18、4-19 和 4-20 说明了 MD-LEACH 协议和 LEACH 在不同感知区域面积下网络生存时间的变化。从仿真图形上看，MD-LEACH 协议的曲线变化程度一直比较柔和，随着感知区域面积的增加，变化不是特别突然。而

LEACH 协议，在第一个节点死亡（FND）和 70% 节点死亡（70%ND）图形中的感知区域在 100~250 这个阶段下降速度明显加快，到感知区域从 250~400 这个阶段变化就相对较平和了。但是同时，这个阶段的生存时间也所剩无几了。从该三个仿真结果可以看出，MD-LEACH 相对于 LEACH 协议的网络生存时间方面的优势仍然很明显，也就是在感知区域扩大的情况下，MD-LEACH 协议仍然能够保证比较好的网络生存时间。

4.3 无线传感器网络的农业应用

目前无线技术在农业中的应用比较广泛，但大都是具有基站的星型拓扑结构的应用，并不是真正意义上的无线传感器网络。农业一般应用是将大量的传感器节点构成监测网络，通过各种传感器采集信息，以帮助农民及时发现问题，并且准确地确定发生问题的位置，这样农业将有可能逐渐地从以人力为中心、依赖于孤立机械的生产模式转向以信息和软件为中心的生产模式，从而大量使用各种自动化、智能化、远程控制的生产设备。

众所周知，我国农业生产仍停留在家庭作坊式的人工劳工方式上，与国外私有农场的科学生产相比，生产力水平十分落后。这也是我们国家的农业生产力水平比较低的原因。近几年，国家农业科技工作者在不断改良农业种植技术的同时，也把目光集中在了与计算机相关的技术手段，而传感器网络就是可以很好的解决多种农业问题的关键技术之一。在西方国家，通过传感器网络辅助农业生产已经有了很多实际工程项目；在我国，也已经开始在经济作物的温室中应用无线传感器网络来辅助生产，从而达到提高产量的目的。通过大量的实际应用表明，应用传感器网络辅助农业生产，可使产量上升、成本相对下降。

在应用传感器网络提高经济收益的同时，也带来了增加了额外成本的问题，这就需要在传感器网络的技术研究方面，做更多的工作。而减低传感器网络成本的最直接手段，就是让已经布设好的网络节点更长时间的工作。而一个传感器网络的性能，很大程度上取决于网络在建立的时，所采用路由协议的优劣。也就是路由协议的性能直接决定了网络的生存时间。故本文以传感器网络的路由协议为突破口，实现了比流行的 LEACH 协议性能更好的 MD-LEACH 协议，大大优化了网络性能。

4.3.1 温室环境应用

在温室环境里，单个温室即可成为无线传感器网络的一个监测控制区，采用不用传感器的传感器节点和具有简单执行结构的节点构成无线网络来测量改变土壤温度、土壤成分、PH 值、降水量、温度、空气湿度和气压、光照强度、CO₂ 浓度等来获得作物生长的最佳条件，同时将生物信息获取方法应用于无线传感器节点，为温室精细调控提供科学依据。如基于视觉技术探测生物信息，利用多光谱反射原理探测植物生长状况等。最终使温室中传感器、执行机构标准化、数据化，利用网关实现控制装置的网络化，从而达到现场安装组网方便、增加作物产量、改善品质、调节生长周期、提高经济效益的目的。

4.3.2 节水灌溉

具有简单控制功能的无线传感器网络节点，采用电池供电通过相关的电源处理可以控制不同中小功率的直流电磁阀，加上节点的休眠状态将网络的工作时间延长到一年以上，如果采用太阳能电池板，能源方面就不需要过多的考虑。由于传感器网络多跳路由、信息互递、自组织网络及网络通行时间同步等特点，使灌区面积，节点数量不会受到限制，可以灵活增减轮灌组，加上节点具有的水利信息、土壤、植物、气象等测量采集装置、通信网关的 Internet 功能与 RS 和 GPS 技术结合的灌区动态管理信息采集分析技术、作物需水信息采集与精量控制灌溉技术、专家系统技术等构建高效、低能耗、低投入、多功能的农业节水灌溉平台。可在温室、庭院花园绿地、高速公路中央隔离带、农田井灌灌溉区等区域，实现农业与生态节水技术的定量化、规范化、模式化、集成化，促进节水农业的快速和健康发展。

4.3.3 环境监测及动物监测

无线传感器网络在环境研究方面可用于监视农作物灌溉情况、土壤空气情况、牲畜和家禽的环境状况和大面积的地表检测，可用于气象和地理研究等。

通过布置多层次的无线传感器网络检测系统，对牲畜家禽、水产养殖、稀有动物的生活习性、环境、生理状况及种群复杂度进行观测研究，也可用于对森林环境监测和火灾报警。同时也可以应用在精准农业中，来监测农作

物中的害虫、土壤酸碱度和施肥状况。

4.4 本章小结

本章在之前章节论述的基础之上，详细阐述了 LEACH 协议和 MD-LEACH 协议的实现过程。通过协议的实现说明了网络生存时间的提高原理和方式。通过大量的仿真数据，最终得出的结论与最初设想的提高网络生存时间的目的相符。仿真结果说明了，MD-LEACH 协议在延长网络生存时间方面，优于 LEACH 协议。

尽管在网络生存时间方面，MD-LEACH 协议与 LEACH 协议相比的优势比较明显，但 MD-LEACH 也存在着缺点。LEACH 协议是与地理位置无关的，而 MD-LEACH 协议需要节点配备有向天线，为了能够得到节点的坐标。这样，相对于 LEACH 协议，MD-LEACH 协议的成本有所增加。也是 MD-LEACH 协议的缺点所在。

在应用方面，主要介绍了有效能量无线传感器网络在农业监测方面的应用，通过传感器网络技术的应用，使农业生产效率有了进一步的提高。

结 论

本文对无线传感器网络中基于聚类的路由协议进行了研究,概述了无线传感器网络中路由协议的特点、设计要求和分层通信模型。根据路由协议的共同属性,对基于聚类的路由协议进行了分类,综述了具有代表性的几种协议。LEACH 协议是一种典型的聚类路由协议,详尽分析了其中的聚类建立和稳定工作状态。提出了一个以 LEACH 协议为基础,全新的有效能量聚类路由协议。

本文对现存的无线传感器网络路由协议进行了总结和深入分析,并针对 LEACH 协议的问题描述,本文在多个方面进行了改进,提出了一种层次结构的有效能量的无线传感器网络路由协议 MD-LEACH。在协议中,基站负责计算节点距离和簇半径等信息,通过比较节点与簇中心距离的方式来决定主簇首,取代了 LEACH 协议频繁选举簇首的方式。并提出了备用簇首的概念,有效地节省了能量。在成簇方式上,用圆形簇区域取代了 LEACH 的分布式成簇方式,使覆盖区域更加合理。簇半径确定的过程中,以能量模型为基础确定了最优的簇半径。簇内通信完毕之后,通过中间节点转发的方式实现簇间通信,避免了远距离节点的能量过早耗尽,有效地延长了网络生存时间。本文提出的簇首选择和簇划分机制保证了整个网络节点传输负载的均衡,具有能耗低、生存时间长的优点。

本文以提出的算法为基础,使用 NS2 对协议实现进行了仿真,并对测试结果进行了详细的分析。分析结果表明,MD-LEACH 比 LEACH 有更长的网络生存期,和更好的网络扩展性。网络的生存时间比 LEACH 协议延长 30% 以上。相对于 LEACH 协议,MD-LEACH 协议的性能得到了显著的提高,但也同时存在着一些问题。最直接的就是定位设备的应用,导致了网络成本有一定程度的上升。这也是我在今后的学习过程中将要解决的问题。

传感器网络的实际工业应用,将会随着感知节点费用的降低而越发普及。目前,在环境监测,特别是农业环境监测方面的应用比较广泛。随着应用的不断深入,新的路由算法也将不断产生并应用于工业领域。

参考文献

- 1 孙利民等.无线传感器网络.清华大学出版社, 2005:3~23
- 2 李建中等.传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展.软件学报. 2003, 14(10):1717~1727
- 3 任丰原等.无线传感器网络.软件学报. 2003, 14(7):1282~1291
- 4 马祖长等.无线传感器网络综述.通信学报.2004,25(4):114~124
- 5 Akyildiz LF. A survey on sensor networks. IEEE Communication Magazine.2002,40(8):102~114
- 6 Akyildiz LF. Wireless sensor networks:A survey.Computer networks. 2002,38(4):393~422
- 7 CHEE-YEE CHONG..Sensor Networks-Evolution,Opportunities,and Challenges. Proceedings Of The IEEE.2003,91(8):1247~1256
- 8 Estrin D.Next century challenges:Scalable coordination in Sensor Network.Proceedings of the 5th ACM/IEEE international conference on Mobile Computing and Networking.Seattle.IEEE Computer society. 1999 ,263~270
- 9 Hong W TinySchema.Creating attributes and commands in TinyOS. <http://telegraph.cs.berkeley.edu/tinyos/>
- 10 University of California at Berkeley.TinyOS.<http://webs.cs.berkeley.edu/tos>
- 11 石胜飞,李建中,王朝坤,李金宝.HA-DMDB 基于数据模型趋势分析的 Cache 一致性管理策略.计算机研究与发展.2004, 41(07):1240~1245
- 12 孙学斌.无线传感器网络中目标定位算法的研究.计算机工程与应用.2004, (03):132~134
- 13 黄少昱等.无线传感器网络中的路由技术.计算机工程与应用.2004. (19): 123~126
- 14 郑增威等.若干无线传感器网络路由协议比较研究.计算机工程与设计. 2003, (09):28~31
- 15 贾惠芹等.基于 BP 神经网络的分布式传感器网络的可靠性分析.铁道学报.2002, 24(06): 80~83
- 16 叶驰等.传感器网络的能量管理.计算机工程与应用.2004, (08).196~198

- 17 Boulis A. Node-level energy management for sensor networks in the presence of multiple application. The 1st IEEE Int'l Conf. on Pervasive computing and Communication, Dallas-Fort, Worth, Texas, USA, 2003
- 18 Galstyan A. Distributed online localization in sensor networks using a moving target. The 3rd Int'l Symposium on information Processing in Sensor Networks (IPSN'04), Berkeley, California, USA, 2004
- 19 Shih E. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. Proceeding of ACM MobiCom 2001. 2001, 272~286
- 20 Hedetniemi S. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks. Networks. 1998(18):319~349
- 21 Kulik J. Negotiation-based protocols for dissemination information in wireless sensor networks. Wireless Networks. 2002, 8(8):169~185
- 22 Heinzelman W R. Adaptive protocol for information dissemination in wireless sensor networks. Proceeding of the ACM MobiCom'99, Seattle, Washington, 1999. 174~185
- 23 Zhong L C. Data link layer design for wireless sensor networks. Communication for Network-Centric Operations, Creating the Information Force, Washington, 2001
- 24 Guo C. Low power distributed MAC for ad hoc sensor radio networks. IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM'01), San Antonio, TX USA, 2001
- 25 Shepard T. A channel access scheme for large dense packet radio networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review (October 1996), 26(4):219~230
- 26 Dorigo M. The ant system: optimization by a colony of cooperating agent. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics-part B, 1996, 26(1)
- 27 Noury N. Monitoring behavior in home using a smart fall sensor. Proceeding of the IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology. 2000, 607~610
- 28 Heinzelman W. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Transaction on Wireless Communication. 2002, (10):660~670

- 29 Nagpal R. Organizing a global coordinate system from local information on an ad hoc sensor network. Information Proceeding in Sensor Networks: Second International Workshop, IPSN 2003 (Palo Alto, April 2003), No. 2634, in Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, pp. 333~348
- 30 Ian F. Akyildiz. Wireless sensor networks: a survey. Computer networks. March 15, 2003, 38(4): 393~422
- 31 Warneke B. Smart dust: communicating with a cubic-millimeter computer. IEEE Computer. 2001, 34(1): 44~51
- 32 SHIH E. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. Proc of ACM Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, Italy, 2001. 272~286
- 33 Qiangfeng Jiang. Routing protocol for sensor networks. Consumer Communication and Networking Conference, 2004. CCNC 2004. First IEEE 5-8 Jan, 2004: 93~98
- 34 Wei Ye. Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks. IEEE, IEEE/ACM Transaction on networking. June 2004, 12(3): 493~506
- 35 Tijs van Dam. An Adaptive Energy Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems. Nov 2003, 171~180
- 36 Sohrabi K. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. IEEE Personal Communications. 2000, 7(5): 16~27
- 37 Saltzer J. End-to-end arguments in system design. ACM Transactions on Computer Systems. 1984, 2(4): 195~206
- 38 Chen Y. A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks. Proceedings of Tenth International Conference on Computer Communications and Networks, Scottsdale, USA, 2001
- 39 Heinzelman W R. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking New York, USA, 1999: 2~16
- 40 Lindsey S. PEGASIS: Power-Efficient gathering in sensor information systems. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 2001, 13(9): 924~

935

- 41 Katayoun Sohrabi. Protocol for self-Organization of a Wireless Sensor Network. IEEE Personal Communications. October 2000, 5(5): 16~27
- 42 Ossama Younis. HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks. IEEE Transaction on Mobile Computer, Oct-Dec 2004, 3(4): 366~379
- 43 Vlady Ravelomanana. Extremal Properties of Three-Dimensional Sensor Networks with Applications. IEEE Transaction on Mobile Computer. Jul-Sep 2004, 3(3): 246~257
- 44 Yong Ma. System Lifetime Optimization for heterogeneous Sensor Networks with a Hub-Spoke Topology. IEEE Transaction mobile computing, Jul-Sep. 2004, 3(3): 286~294
- 45 Enrique J. Analysis of Energy Consumption and Lifetime of Heterogeneous Wireless Sensor Networks. Global Telecommunications Conference 2002, GLOBECOM'02. IEEE Volume 1: 17~21

哈尔滨工业大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《无线传感器网络聚类路由协议的研究与仿真》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文研究工作做出重要贡献个人和集体均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签字：

日期： 年 月 日

哈尔滨工业大学硕士学位论文使用授权书

《无线传感器网络聚类路由协议的研究与仿真》系本人在哈尔滨工业大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨工业大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨工业大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅，同意学校将论文加入《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》和编入《中国知识资源总库》。本人授权哈尔滨工业大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

哈尔滨工业大学硕士学位涉密论文管理

根据《哈尔滨工业大学关于国家秘密载体保密管理的规定》，毕业论文答辩必须由导师进行保密初审，外寄论文由科研处复审。涉密毕业论文，由学生按学校规定的统一程序在导师指导下填报密级和保密期限。

本学位论文属于

保密□，在

年解密后适用本授权书

不保密□

（请在以上相应方框内打“√”）

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

致 谢

回首研究生阶段的两年多时光，首先要感谢我的导师马培军和张丽杰老师，感谢二位老师从始至终对我的论文工作的关心和帮助。在论文的选题、研究的思路、文章的内容和结构等方面都做了精心的指导，对于论文研究过程中出现的各种疑难问题，他们在任何时候都耐心的给予了解答。正是因为他们那严谨的治学态度、扎实的科研作风和渊博的学识影响和激励了我，使我能够克服一切困难，努力完成了课程学习和论文研究工作。同时，我也不会忘记在课程学习阶段曾经教过我的老师们，他们的教导为我完成论文提供了知识的保证。

诚挚地感谢黑大伊思特软件有限公司总经理洪海教授，在项目开发和论文的撰写过程中给予了我极大的关心、帮助和支持，洪老师丰富的工程实践经验和对工作不懈的追求以及谨慎谦和的为人态度，都是我学习的楷模。

感谢两年来教育我们的所有任课老师和软件学院师生。感谢他们的谆谆教诲，是他们用渊博的知识和高水准的专业技能将我带进一个更高的知识的殿堂，他们敢于开拓的精神和高尚的人格魅力将永远影响着我。

个人简历

2001 年 7 月毕业于黑龙江大学计算机应用专业，同年留校任教。

2004 年 9 月入哈尔滨工业大学软件学院攻读软件工程硕士。

2006 年 3 月进入黑大伊思特软件有限公司实习，从事无线传感器网络路由协议的研究与应用工作。