

NS2 中仿真结果也表明本文提出的算法大幅度提高了节点的生存能力, 延长了网络生存周期。由于 LEACH 协议并没有考虑在移动环境中的应用, 在移动环境中表现不佳, 本文在此基础上提出移动环境中聚簇路由协议。该协议结合地理位置信息, 综合考虑了节点的移动速度、节点密度、剩余能量水平及预计能耗水平等因素。仿真结果表明移动环境中的能量均衡聚簇路由协议在平衡节点能量消耗、延长网络生存周期等方面要好。

**关键词:**传感器网络; 能量均衡; 路由协议; 聚簇路由协议

# RESEARCH ON ENERGY-BALANCED CLUSTERING ROUTING PROTOCOL IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Major: Computer Software and Theory  
Name: Zhu Haiming  
Supervisor: Shan Zhilong

## ABSTRACT

Wireless sensor nodes integrate sensor technology, wireless communication network technology and smart embedded operating system. It is in a feature of small size, self-organization and carrying limited energy. Compared to traditional networks, those different characters cause people pay more attention to declining energy level, and prolonging the lifecycle of wireless sensor networks.

This paper analyses the basic features and architecture of wireless sensor networks, points out the key routing technology in wireless sensor networks, and analyses the energy-balanced way in some flat routing protocols such as SPIN、DD、MTE. And then, our text analyses routing technology and energy balanced way with LEACH, giving an analytical model with nodes' energy dissipated. LEACH adopts a distributed algorithm, and each node uses a thresh and random number to decide whether itself to be clusterhead or not, but the quality of clusterheads cannot be assured. No clusterhead or all nodes are clusterheads sometimes.

Our protocol is an energy-balanced clustering routing protocol based on LEACH in wireless sensor networks. Taking the energy level of nodes into considering, it has improved the process of setting-up and data transmission, and greatly improved the survival ability of nodes. Clusterhead detect energy of neighbor nodes, it selects a new clusterhead when clusterhead's energy is lower than average energy. Analysis shows our method balanced the energy of nodes and deduced the dissipated energy. Result of simulating in NS2 demonstrates that our protocol improved the survival ability and prolonged networks life cycle. LEACH ignored the the application of moving environment. Our energy-balanced clustering routing

protocol in moving environment incorporated the geographic information, considered the residual energy, evaluated the energy cost in future and extended the application at moving scene. At last, we deduce the dissipated energy, and analysis some quality index such as average dissipated energy, networks life cycle by simulating in NS2.

**KEY WORDS:** Wireless Sensor Network; Energy-Balanced; Routing Protocol; Clustering Routing Protocol

## 目 录

第一章 绪论 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究目的与意义 .....	3
1.3 本文主要工作 .....	3
1.4 论文结构 .....	4
第二章 无线传感器网络 .....	6
2.1 无线传感器网络概述 .....	6
2.2 无线传感器网络体系结构 .....	6
2.3 无线传感器网络的特点 .....	7
2.4 无线传感器网络路由协议概述 .....	8
2.5 无线传感器网络路由协议关键技术 .....	8
2.6 无线传感器网络主要路由协议 .....	11
2.6.1 Flooding 和 Gossiping .....	11
2.6.2 SPIN 协议 .....	12
2.6.3 DD 协议 .....	13
2.6.4 MTE 协议 .....	13
2.6.5 能量感知路由协议 .....	14
2.7 本章小结 .....	15
第三章 LEACH 协议分析 .....	16
3.1 LEACH 协议 .....	16
3.2 LEACH 协议算法分析 .....	16
3.3 LEACH 能耗模型分析 .....	19
3.4 LEACH 算法不足 .....	21
3.5 本章小结 .....	23
第四章 改进的能耗均衡聚簇路由协议 .....	24
4.1 分布式能耗均衡聚簇路由协议 .....	24
4.1.1 簇首建立 .....	24
4.1.2 数据传输 .....	25
4.1.3 簇维护与保持 .....	26
4.2 EBCA-D 协议分析 .....	26
4.3 仿真分析 .....	28
4.3.1 NS2 仿真环境 .....	28
4.3.2 仿真参数 .....	31
4.3.3 度量指标 .....	32
4.3.4 仿真比较 .....	33
4.4 本章小结 .....	35
第五章 移动环境中能耗均衡聚簇路由协议 .....	36
5.1 网络节点部署 .....	36
5.2 簇首选择的方法 .....	37
5.3 EBCA-C 算法详述 .....	38
5.4 仿真分析 .....	40
5.5 本章小结 .....	41

第六章 总结与展望 .....43

参考文献 .....45

发表论文与科研项目 .....48

致 谢 .....49

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)是当今信息领域新的研究热点, WSNs 通常由大量密集的传感器节点构成, 网络节点能量、计算和通信能力都比较有限。

20 世纪末期, 随着人们对无线传感器网络的深入研究, 无线传感器网络具备了巨大实用价值, 因而它引起了世界许多国家军事部门的关注, 同时在工业界和学术界也都引起了人们广泛兴趣, 对无线传感器网络的各项研究也如火如荼地开展起来。美国国防部等军事部门表现了极大的兴趣, 先后设立了一系列无线传感器网络在军事上的研究项目。美国的 IT 行业如 Intel、Microsoft 等也开始了无线传感器网络方面的研究。此外, 日本、德国、英国、意大利等发达国家也纷纷开展了在无线传感器网络这个领域上的研究。一些商品也渐渐地开始投入实际使用, 但总体上来说, 尚有许多难题未曾解决, 真正实用化尚需时日。

我国目前也已经有较多的高校和科研机构投入这方面的研究, 包括清华大学、浙江大学、哈尔滨工业大学、中科院软件所及自动化所等。随着无线传感器网络不断丰富应用, 支持无线传感器网络的传感器技术、无线通信技术、嵌入式实时操作系统等关键技术也日趋成熟。

无线传感器路由协议是 WSNs 中的一项关键技术, 由于无线传感器节点资源受限的特点, 传统的路由协议并不适合 WSNs, 设计能够有效节省能量, 延长网络生命周期的路由协议是无线传感器网络研究的一个重点。最早是将传统网络中的 Flooding 协议和 Gossiping 协议<sup>[1][2]</sup>应用于无线传感器网络。这两个协议给网络带来极大的数据冗余, 在节点众多的 WSNs 中尤为明显, 给 WSNs 带来极大负担, 更由于 WSNs 中节点的能量有限, 削弱了这两个协议在 WSNs 中的应用。SPIN(Sensor Protocols for Information via Negotiation)协议<sup>[3][4]</sup>在数据发送前的信息协商机制消除了 Flooding 和 Gossiping 方法中的“内爆”和“重叠”问题, 有效减少了网络冗余数据量, 提高了能量的利用率。DD(Directed Diffusion)协议<sup>[5]</sup>建立了一个以数据为中心的网络, 网络节点只对感“兴趣”的信息进行处理, 且在数据传输过程中应用了数据融合技术, 更进一步减小了数据的冗余, 为网络

节点节能提供了有利的条件。MTE (Minimum Transimission Energy) 算法<sup>[6]</sup>数据传输中, 每个节点都选择对自己最有利节能的方式, 因此离基站节点越远的节点的能量得以保存, 但离基站越近的节点由于担任过多转发任务, 使得整个网络能量消耗不均。

LEACH<sup>[7]</sup> (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 协议属于一种聚簇路由协议, 它采用随机分簇的方法, 通过聚簇以减少网络中节点与基站直接通信而减少能量消耗, 通过两层通信减少了从源节点到基站节点的数据转发跳数, 减小了网络时延, 且通过定时随机选择节点担任簇首的方法使得各节点的能耗值趋于均衡化。这种方法使得协议易于实现, 但是簇首分布不均容易导致簇头节点负载不均, 使得部分簇首节点因负载过大而过早消亡。

LEACH-C 是 LEACH 的一种改进型算法, 将 LEACH 中随机建立簇头改为由基站节点主动选择簇头。通过模拟退火优化算法, 提高了簇首选择的质量。TEEN 协议<sup>[8]</sup>类似于 LEACH 协议, 采用了相同的聚簇方式, 但簇头根据 sink 节点距离的不同形成层次结构, 并利用了过滤方式来减少数据传输量。PEGASIS 协议<sup>[9]</sup>在 LEACH 协议的基础上为采用无通信量的簇头选举方式避免了频繁选举簇头的通信开销, 但该协议要求每节点知道全网络中其他节点的位置, 通过贪心算法选择最近的邻节点形成链, 这种计算开销非常大; PEGASIS 还要求节点都具有与 sink 节点通信的能力; 另外如果链过长的时候, 传输的时延将会增大, 实时应用在这种情况下并不适合。WCA<sup>[10]</sup>算法是一种基于权重值来选择簇首的方法, 通过衡量各考虑因素的权重分配权重值, 并根据最终权值决定簇首。但在簇首选择的数量上并没有明确的约束, 所以其成簇的质量不如 LEACH-C 协议, 但其采用权重值的方法可以比较容易的得到扩展。

本文建立在 LEACH 协议基础之上, 首先调整了 LEACH 协议建立簇的过程, 优化簇首的选择, 均衡了节点的能量消耗, 其次在数据传输时往往采用了过滤, 融合等技术提高网络利用率。延长了网络生命周期, 并通过理论分析和仿真分析验证了改进后的路由协议的一些性能指标。LEACH-C 是 LEACH 的一种改进算法, 它收集网络节点信息, 将簇首的选择过程交给基站, 以此来提高簇首选择的质量。由于在无线传感器网络中, 有很多场景是移动环境, 但 LEACH-C 路由协议在设计的时候并没有考虑到节点的移动性, 因此, 扩展 LEACH-C 协议在移动

环境下的应用很有必要,扩展移动性后的方法结合节点移动速率、负载情况、能量消耗速度、簇成员与簇头间的距离平方和等因素建立起权重值,通过权重值的大小来决定节点是否成为簇头,从而建立高效的能量均衡策略。最后在 NS2 中建立模拟仿真环境,对本文给出的模型进行仿真比较,通过仿真来验证无线传感器网络的平均能耗性能和网络生存周期性能。

## 1.2 研究目的与意义

无线传感器网络路由协议的由于应用的不同,其采用的解决方案也不尽相同。由于无线传感器节点具有体积小、所携带电源小、通信范围有限等特点,因此路由协议的设计将需要根据具体的应用场景尽可能在这些约束条件限制下以使得网络能够工作得更好更长久。LEACH 协议是一种应用在小型范围内的层次型路由协议,通过聚簇的方式减小了数据传输的跳数,也减轻了节点传输数据到基站节点的能量消耗,并采用定时轮换簇首来平衡节点之间的能量消耗,它比平面型路由协议的网络生存周期更长。但是 LEACH 本身由于其簇首的产生完全依赖于自身信息和随机数,所以成簇的质量无法保证,会使得簇首的负载不均或是过低能量的节点担任簇首。因此,在 LEACH 的基础之上研究其能量均衡方式以延长网络生存周期,同时将 LEACH 协议扩展于可移动型场景中都将具有重要意义。

## 1.3 本文主要工作

在无线传感器网络中,LEACH 协议采用了随机成簇方法,若节点担任簇首的轮次间隔越长,那么当选簇首的命中率也大幅度提高,也就相当于较多能量的节点更容易被当选为簇首,同时,网络定时在新一轮簇首选择过程中更换簇首,以防止担任簇首的节点能量消耗过度,进而延长网络生命周期。因此控制簇首的选择、加入的成员数量、数据融合是平衡能耗水平和延长网络寿命的主要策略。一个合理的簇首选择方法能够平衡该网络的能量消耗。LEACH-C 加入了各节点的信息状态,通过搜索优化的簇首集,提高了成簇的质量,降低了节点的能耗。本文主要针对 LEACH 协议当中的问题提出自己的解决方案,主要工作如下:

(1) 首先从无线传感器网络的特点出发, 综合全面的分析了无线传感器网络与传统网络的差别, 展示了其多方面的应用, 指出了 WSNs 发展所需要解决的关键技术问题, 重点分析了现有的路由协议的优劣, 进而引入本文所要研究的 LEACH 协议。

(2) LEACH 协议由于其分布式算法在成簇质量方面的差异, 导致其在能耗均衡方面、网络生存周期、数据报文传输效率方面的性能都大打折扣, 本文在 LEACH 的基础上引入了竞争半径的概念, 通过主动抑制簇内可加入的节点平衡了簇首的负载情况。

(3) LEACH 路由协议约定时间自举产生簇头, 担任簇首的节点负责收集簇内成员数据信息, 进行数据融合并将数据发送给基站节点。由于簇首需要等到下一轮才重新进行选举, 本轮当簇首能量下降后仍一直担任簇首职能会造成簇首能量过度消耗。本文因此提出在簇内利用簇首掌握簇内成员的局部信息, 通过主动让出簇首位置给节点能耗较多且与各成员节点距离平方和最小的节点。此举通过局部的优化保证了簇内能量消耗的平衡, 结果也表明该方法减小了簇内能量的消耗水平, 从而延长了网络生命周期。

(4) LEACH-C 是一种集中式的算法, 该方法首先排除比网络平均能量值低的节点当选为簇首的可能, 然后通过优化簇首与其各成员间的距离平方和的值减少簇内各成员节点与簇首通信能量的消耗。但这种方法所考虑的因素并不适合在有节点移动的场合, 当节点以一定速度移动, 这个时候网络拓扑发生改变, 长时间的簇首保持不变性需要等到下一轮才会对这种变化做出处理, 因此本文考虑了在运动型场景中使用基于权值的能耗均衡分簇方法, 该方法综合考虑了节点的移动性, 节点的能量水平以及节点的密度等情况, 而且该方法在不同的应用当中可以很容易地扩展, 仿真结果也表明该方法在运动型场景中的表现较好。

(5) 本文对所提出的算法及改进方案分析了其能耗状况, 并将各算法用 NS2 进行模拟仿真, 从仿真的各个场景当中分析了各算法的优劣。

## 1.4 论文结构

后续论文按如下方式进行组织安排:

第二章 概述了无线传感器网络的特点, 介绍了无线传感器网络的基本概念、

体系结构和自身特点,介绍了目前常见的网络体系结构框架下路由协议的基本情况,指出目前路由协议相关工作重点,详细分析了无线传感器网络的几种主要路由协议。

第三章 首先简要介绍了 LEACH 协议的提出背景、设计思想,然后着重介绍了 LEACH 协议的运行机制、实现方法,给出了 LEACH 协议的能耗分析模型,最后指出了该协议存在的不足。

第四章 首先详细介绍了 LEACH 基础之上的分布式能耗均衡聚簇路由协议,定量分析了改进部分的能量消耗,最后通过在 NS2 仿真环境中进行仿真比较,详细比较了节点的平均能耗水平、节点数据包发送成功率、簇首负载情况及网络生存周期等指标。仿真结果表明改进后的 EBCA-D 在上述指标中要比 LEACH 好。

第五章 移动环境中能耗均衡聚簇路由协议扩展了 LEACH 协议在运动场合下的应用,该改进型算法 EBCA-C 引入了基于权重的聚簇算法,通过由基站集中收集网络节点信息,综合考虑节点的运动性、当前能量水平,节点密度等情况,设计和实现了一个适合于运动型场景的能耗均衡聚簇路由协议。最后进行仿真性能比较,并通过对实验结果的分析,来评估算法的性能。

第六章 总结了本文研究的创新点及主要贡献,同时对论文的不足进行了分析,并对未来的工作做进一步的展望。

## 第二章 无线传感器网络

### 2.1 无线传感器网络概述

无线传感器网络是随着无线通信、微电子技术以及传感器技术而发展起来的一种新兴的网络。这种网络由多个单节点组成，各个节点通过传感器技术获取所在环境的感知信息，对数据简单处理以后，通过无线通信技术传送信息给用户。这些能力使得其在军事国防、环境监测、生物医药、抢险救灾以及商业应用等领域具有广阔的应用前景<sup>[11], [12], [13], [14], [15], [16]</sup>。

### 2.2 无线传感器网络体系结构

无线传感器网络体系结构包括了硬件体系结构和软件体系结构两部分。无线传感器网络要求组成的节点可靠有效，而且，满足小型化、低成本、低能耗要求，为节点配备合适的传感器、必要的计算单元、内存资源和通信设备。因此，传感器节点一般由控制器、存储器、传感器和执行器、通信设备、电源五个主要部分组成，其单节点<sup>[12][15]</sup>构成如图 2-1 所示。

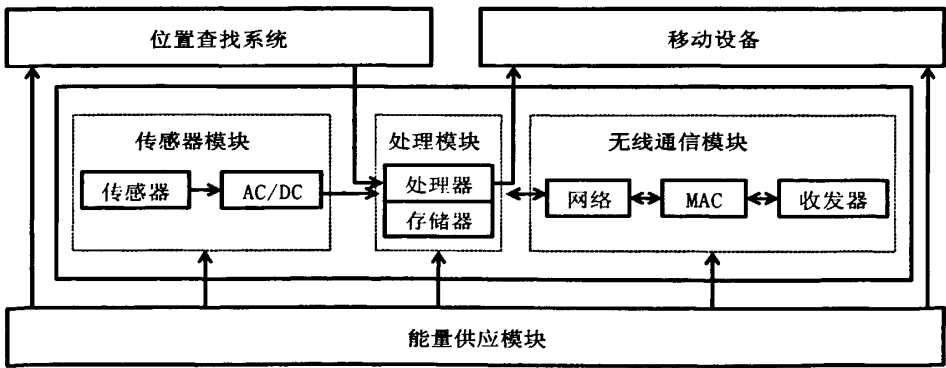


图 2-1 传感器节点的主要硬件组成情况

无线传感器网络通过在监测区域部署大量廉价的传感器节点，利用传感器节点收集到数据后，将通过传回给接收节点(Sink)，最终传送回给终端用户。图 2-2 展示的是数据通过多跳的方式传回 Sink 节点，Sink 节点可以通过互联网或者卫星与任务管理节点进行通信。

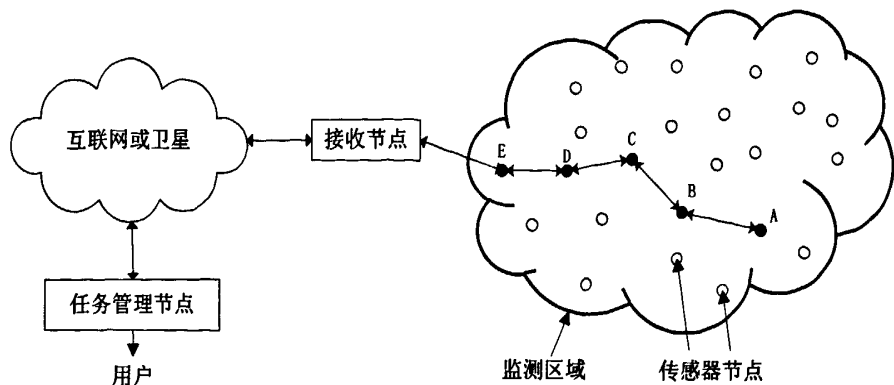


图 2-2 无线传感器网络结构<sup>[12][16]</sup>

接收节点和所有的传感器节点使用的协议栈<sup>[12][16]</sup>如图 2-3 所示。该协议栈由应用层，传输层，网络层，数据链路层，物理层，以及跨层的任务管理平台，移动管理平台和能量管理平台组成。

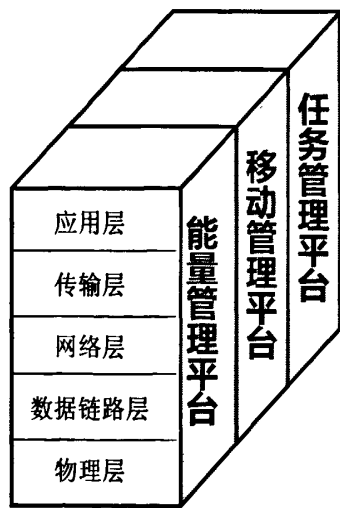


图 2-3 无线传感器网络协议栈

## 2.3 无线传感器网络的特点

从前述可知，无线传感器网络中的节点均具有传感控制、计算处理和无线通信等特点，这与传统的网络有较大区别。无线传感器网络是具有自组织性的，多跳的，以数据为中心的网络。与 WSNs 最为相似的是移动自组织网络(Mobile Ad hoc networks, MANET)，他们之间有着共同点<sup>[16]</sup>，比如独立组网和无中心，自组织、自动发现、自动配置、自愈，多跳路由，动态的网络拓扑结构，特殊的无线信道特征，移动终端的局限性，安全性差，生存时间短等。但两者之间也存在着

很多区别,从应用和设备方面来讲,MANET 采用了高能电池,设备较为强大,而 WSNs 由于节点简单,电源供应能力有限,其通信耗能高;由于计算能力有限,计算耗能较低;从节点性能考虑,WSNs 节点的计算、存储、通信能力更有限;从部署的数量来讲,WSNs 节点数量远远多于 MANET。

## 2.4 无线传感器网络路由协议概述

路由协议主要负责将数据分组从源节点通过网络转发到目的节点,它包括了两个方面的功能,其一是寻找出从源节点到目的节点的优化路径,其二是将数据分组转发给合适的节点。当前的无线传感器路由协议从网络的结构上<sup>[3]</sup>主要可分为平面路由协议,层次型路由协议,基于地理位置的路由协议。随着时代的发展,目前已经出现了很多的新的路由协议,因此我们这里首先对各种路由协议进行分类,不同的分类方法给了我们在不同的具体场合下应用的一些标准,也更便于我们对无线传感器的路由协议更好地进行学习和研究。WSNs 路由协议根据应用的特征,一般可进行如下归类:多跳路由协议,多路径路由协议,基于地址路由协议,以数据为中心的路由协议,查询驱动路由协议,平面/层次路由协议,数据聚合的路由协议,保证 QoS 的路由协议,能量均衡的路由协议,主动路由协议、按需路由协议和混合式路由协议。有些路由采用了多种策略组合来实现,故该路由协议可能归属于不同的类别。

## 2.5 无线传感器网络路由协议关键技术

由于 WSNs 资源有限,又与具体的应用场景紧密相关,所以在不同的环境当中宜采用不同的网络配置方式。而且,由于能量的限制迫使人们不得不从多个角度来考虑更低的能耗,以使网络的生命周期尽可能地延长。当今对无线传感器网络研究的热点主要集中于 WSNs 路由协议的研究,包括了减少通信量以节约能量<sup>[12]</sup>,调整网络的负载不均,提高路由协议的鲁棒性,满足在某些特定场合的安全需求等。根据 WSNs 的特点,目前无线传感器网络路由协议继续向以数据为中心,基于地理位置的方向发展。

无线传感器网络路由协议与传统网络路由协议目的基本上相同,都是将数据分组从源节点发过一跳或多跳传送给目的汇聚节点。它需要完成路由选择和数据

转发两大功能。差别是传统网络基本上不用考虑其能耗问题,更关注的是其端到端的延迟、网络利用率以及拥塞避免及负载均衡等问题。相比之下,无线传感器网络节点资源有限(能量、计算能力、通信范围),只能够通过局部的信息来自组织构建路由,对于不同的应用场景,很难找出一个通用型的路由协议。无线传感器网络的任务也就决定无线传感器网络路由协议的最主要目标就是在数据通信过程当中延长网络的生存周期,通过各种能源管理的技术优化网络的性能,以尽可能地避免因节点能量不足而造成网络通信任务失败的情况。

无线传感器网络节点资源有限,因此其路由协议的设计也面临着许多因素的挑战,这些因素是 WSNs 满足高效通信必须克服的关键。下面我们给出 WSNs 路由协议当中设计的关键因素。

(1) 网络节点部署。WSNs 中的节点部署与和应用场景有着密切关系,通常的部署有预先设置或者随机化分布两种方式。在预先设置的方式当中,传感器节点通过人工布置,数据通过预定的路径传播。而在随机化部署方式当中,无线传感器节点被随机的部署在应用环境当中,各节点通过自组织的方式自组成网。如果节点的分布并不是均匀地,为了使网络的连接性能、能效都较好,办法之一是优化聚簇。内部的传感器由于能量和带宽的限制,往往愿意进行短距离信息传送,因此,目前我们见到的大部分的无线传感器路由协议都是采用多跳方式组成的。

(2) 网络动态变化下的能耗。传感器节点由于是在无线环境中进行数据传输的能量有限,因此,节省用于通信和计算的能量的方法也就自然地变得很重要了。节点的生存周期与电池的能量大小密切相关。多跳的 WSN 中,每个节点都担负着一个双重角色:数据发送源和数据路由节点。如果有的传感器节点由于电源能量不足而导致节点停止运作,这时网络的拓扑环境也就发生了改变,相应地就要求重新组织网络,将数据包重新路由。

(3) 数据报告模型。WSNs 中的数据感知和报告模型也与应用有关,数据报告的方式可以基于时间驱动型、事件驱动型、查询驱动型和混和型。时间驱动型数据报告模型适合于需要周期性地监控数据的应用。这种场景下,传感器节点需要周期性地切换传感模块和通信模块,首先感知环境数据,然后将感兴趣的数据按照一个固定的时间间隔传送给接收站点。事件驱动型和查询驱动型模型,传

传感器节点会突然接收到来自于 BS 站点指令,要求其感知某事件任务或者是查询某事件,因此这样的模型适合于实时应用。从上可以看出,路由协议的能量损耗及其路由稳定性都与数据报告模型有很大关联。

(4) 容错性问题:由于不足的电量、自然破坏或环境干扰等因素,有的传感器节点有可能失效或者出现故障,那么网络应当不受或尽可能少受这些因素的影响而维护网络的稳定性。一旦节点失效,MAC 层和路由协议必须得重新生成新链路,将正确数据包完好发送往 BS 站点。这需要节点能灵活调整通信模块发射功率和信号速率,或者将数据包发往能量热区以减少节点的能耗。因此,在具有容错能力的网络当中要考虑多层次的冗余配置。

(5) 网络节点的可扩展性及动态变化。感知区域中放置的传感器节点的数量成百数千,甚至更多,任意一个路由方法必须能够在如此众多节点的网络中协同工作。除此之外,传感器网络路由协议也应能随环境事件的变化相应可扩展。事件发生前,大部分传感器节点可以保持睡眠状态。大部分的网络体系假设网络节点是静止不动的,然而事实上的许多应用场景中,节点或者基站节点有时候是处于移动状态,运动节点的路由信息相比静态节点的路由更具有挑战性。除此之外,不同应用下感知到的现象要么是动态的,要么是静态的,例如目标跟踪和检测就属于动态场景,而森林防火监测就属于静态场景。监测静态事件只是简单的产生数据报告流量,而大部分的动态事件应用需要周期性地报告和持续地产生较大的流量。

(6) MAC 层问题:由于多跳传感器网络中,通信节点由无线介质连接。无线信道像隐藏终端和显终端都影响着网络的运行。传感数据的带宽需求都比较地低,一般地也就是在  $1 \sim 100 \text{ kb/s}$ ,基于 TDMA 的路由协议是无线传感器网络 MAC 层设计的一种方法,它可以比像 CSMA 这样的基于竞争的协议(如 IEEE802.11)要更省能量。

(7) 连通性和覆盖问题。无线传感器网络中较高的节点密度可以增加节点间的连通性。因此,人们都希望传感器节点拥有较高的连接度。当网络拓扑发生变化和网络规模产生变化后,节点失效降低了网络的性能,而且,连接性依赖于节点分布的随机性。另一方面,传感器节点获取特定的环境视角,给定的传感器节点的环境视角无论是在范围还是精确度方面都是极其有限的,它只能够覆盖的

是有限的物理环境区域。因此,区域覆盖也是 WSNs 的一个重要设计参数。

(8) 数据融合。传感器网络的节点会得到很显然的数据冗余,从多个节点发出的相似包可以融合在一起以减少数据量的传输。数据融合一般通过某个特殊的函数将从多个源产生的数据复合在一起,例如取最大值、最小值或平均值。这种技术在许多路由协议当中用来获得较高能量效率和数据传输优化。在这些情况下,节点可以通过使用像波束成型这样的技术来产生更多精确的输出信号,以此来复合接收到的信号,并减少这些信号的噪音。

(9) QoS。有些应用场合,传感器节点感知的数据应当在一定时期内传送给基站节点,否则数据就会因过了时效而变得无用。在时间约束型的应用中,最大延迟时间这个指标显得尤为重要。然而许多的应用场合由于有限的能量条件直接影响到网络的生命周期,能量因素比有质量保证的数据传输更为关键。当能量下降后,网络可以通过降低传输服务的质量,从而降低节点的能量消耗水平,延长整个网络的生存周期。能量感知路由协议需要考虑这些因素。

## 2.6 无线传感器网络主要路由协议

### 2.6.1 Flooding 和 Gossiping

传统的平面路由协议主要是 Flooding (泛洪) 和 Gossiping<sup>[1],[2]</sup>,这两种协议是最为简单,也是最为经典的传统网络路由协议。在 Flooding 协议中,节点产生或是收到数据后即向所有邻居节点广播,直到数据包生命周期终止或是到达目的地后则停止传播。该协议简单易用但存在有“内爆问题”(Implosion,某一个节点可能同时从多个邻节点收到多份相同的数据)和“重叠问题”(Overlap,某些节点收到从同一监控区域的多个节点发送的几乎相同的数据),这极易使得网络快速消亡。Gossiping 协议在 Flooding 协议基础之上做了改进,节点将产生或是收到数据后将数据随机转发,这样避免了内爆,但增加了数据传输的时延。这两个协议由于不需要维护路由信息,也没有任何的算法调度,所以较为简单,但是它们的扩展性很差,由于众多冗余数据的传输,造成网络利用率低,能耗较大,网络生存周期时间短,很难应用于较大规模的网络。

2.6.2 SPIN 协议

SPIN 协议<sup>[3][4]</sup>也是一种平面路由协议,它以抽象的元数据对数据进行了命名,命名方式没有统一的标准,可根据具体的实际需要来考虑。SPIN 协议存在着四种不同的形式:SPIN-PP, SPIN-EC, SPIN-BC, SPIN-RL, 前两种方式采用点对点传播,后两种方式使用广播介质进行传播信息。SPIN-EC 在 SPIN-PP 的基础上考虑了节点的功耗, SPIN-RL 是对 SPIN-BC 的完善,考虑了如何恢复无线链路引入的分组差错与丢失。SPIN 协议采用了三种数据报文: ADV、REQ、DATA, 其中 ADV 和 REQ 消息长度较小,用于发布数据通告和做出数据请求。当节点产生或是收到数据后,并不直接将数据广播,而是根据自身的资源情况和数据利用情况将包含元数据的 ADV 消息向邻节点通告,邻节点需要该数据时,向其发送 REQ 请求,节点再向其邻节点发送包含数据的 DATA 消息。与 Flooding 协议和 Gossiping 协议相比,较小的 ADV 消息减轻了内爆问题,数据命名机制解决了重叠问题,节点根据需要来传输数据提高了网络的利用率。其缺点是:当某节点的邻节点都不需要该节点产生或转发的数据时,将导致数据不能继续转发而产生“数据发送盲点”问题,最终导致接收节点无法接收到数据,尤其是当 sink 节点较少的时候,这个问题将更加严重;当某节点的邻节点都需要该节点产生或转发的数据时,一方面增加了 ADV, REQ 等消息的传送致使数据量增大,另一方面将导致数据继续任意转发,浪费了节点能量和网络资源。图 2-4 表示的是 SPIN-PP 协议的数据传播过程。

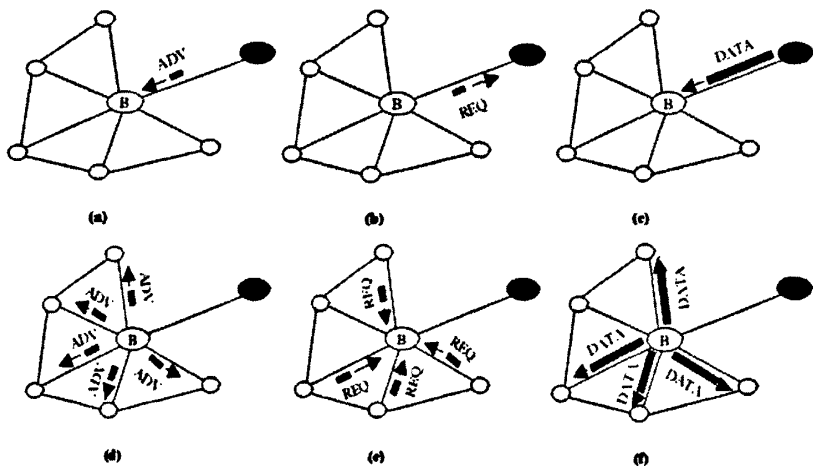


图 2-4 SPIN-PP 协议

### 2.6.3 DD 协议

定向扩散 (Directed Diffusion, DD) 协议<sup>[6]</sup>是一个以数据为中心, 基于查询驱动的路由协议, 它也对数据进行命名。sink 发布需求数据的“兴趣”, 先 flooding 包含属性列表、上报间隔、持续时间、地理区域等信息的查询请求 Interest, 沿途节点按需对各 Interest 进行缓存与合并, 并根据 Interest 计算、创建包含数据上报率、下一跳等信息的梯度, 从而建立多条指向 sink 点的路径。sink 节点可增强数据上报间隔较小或者是速率更高的路径以满足实际需求。该协议采用了查询驱动机制按需建立路由, 无需保存网络全部信息; 多路径健壮性较好, 使用数据聚合减少了数据通信量; 根据实际情况增强或减弱路径能够有效利用能量。缺点是兴趣的发送采用 flooding 方式, 梯度建立的开销很大, 并不适合多 sink 节点的网络; 其由 sink 发送兴趣来建立网络, 且在数据聚合过程采用了时间同步技术, 会带来较大开销和时延, 所以也不适合环境监测等即时信息高速网络。DD 协议一次查询只上报一次数据造成的协议开销过大问题, 基于 DD 协议的改进算法 Rumor 协议<sup>[17]</sup>改善了这种状况。Schurgers<sup>[18]</sup>等人提出的基于梯度的路由协议是 DD 协议的一个变种, DD 协议的另一变种 CADR<sup>[19]</sup>通过尽量激活靠近事件周围的节点进行路由传输以减少时延。图 2-5 显示的是 DD 协议的工作原理。

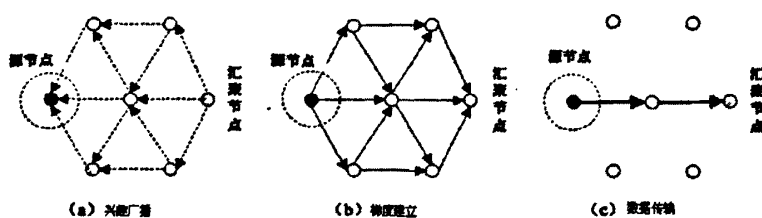


图 2-5 DD 协议的工作原理

### 2.6.4 MTE 协议

MTE 协议出现在文献[6]中, 节点会选择离自己平面距离最近的节点进行路由的转发, 如图 6 所示。

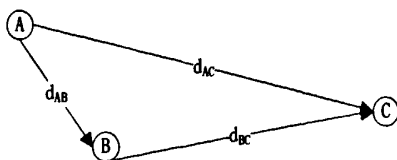


图 2-6 MTE 中节点间距离关系

MTE 在满足公式(2.1)时，节点 A 才将数据从节点 B 转发至节点 C。

$$E_{TX}(d=d_{AB}) + E_{TX}(d=d_{BC}) < E_{TX}(d=d_{AC}) \quad (2.1)$$

这种路由协议实现简单，开销小，每个节点只需要把数据转发给通往 sink 节点的下一跳节点即可。由于靠近 sink 节点的传感器节点会较多地转发邻节点传给 sink 节点的数据，导致节点之间负载不平衡，越靠近 sink 的节点能量消耗速度越快，最终影响整个网络的生命周期。

### 2.6.5 能量感知路由协议

能量感知就是根据节点的可用能量(即节点的当前剩余能量)或传输路径上的能量需求，选择数据转发的路径。能量感知路由策略主要有以下几种：

(1) 最大剩余节点能量路由。从数据源节点到汇聚节点的所有路径中选取节点剩余能量之和最大的路径。

(2) 最小能耗路由。从数据源节点到汇聚节点的所有路径中选取节点能耗之和最小的路径。

(3) 最少跳数路由。从数据源节点到汇聚节点的所有路径中选取跳数最少的路径。

(4) 最大最小剩余节点能量路由。每条路径上有多个节点，且节点的可用剩余能量不同，从中选取每条路径中可用能量最小的节点来表示这条路径的可用能量。

C.Rahul 等人提出了基于多径的能量感知路由算法<sup>[21]</sup>。该算法在源节点和目的节点之间建立了多条路径，根据路径上节点通信能耗和剩余能量状况给每条路径赋予一定选择概率。由于该概率与能量相关，可将通信能耗分散到多条路径上，从而使得数据传输可以均衡消耗整个网络的能量，最大限度延长网络的使用寿命。

命。该多径能量感知路由协议包括三个阶段：路由建立阶段、数据通信或数据传播阶段和路由维护阶段。每个节点都知道到达目的节点的所有下一跳节点，需要计算选择每个下一跳节点传输数据的概率，该概率与节点能量通信代价的倒数成正比。概率的计算是通过节点到目的节点的通信代价来估算的。由于存在多径，所以该代价值应当是各个路径的加权平均值。该协议的缺点是没有考虑对跳数的优化，且需要通过周期性地从目的节点到源节点实施泛洪查询来维护路由信息，增加了协议开销。文献[21]改进了这个缺点，它将蚁群优化算法应用于无线传感器网络的路径选择，提出一种基于蚁群优化的无线传感器网络能量均衡路由算法。该算法利用蚁群的动态适应性和寻优能力在网络最短路径和能量均衡消耗之间进行平衡，以达到网络能量的优化均衡消耗。文献[22]在DD协议上利用节点的区域信息控制兴趣数据包的转发和通过最佳跳数值控制探测数据的扩散范围。文献[23]在LEACH协议上采用从控制簇成员的范围和数目并且结合考虑节点剩余能量的方式来形成簇。文献[24]对Flooding, DD, LEACH协议的生命周期进行了量化分析，给出了网络生命周期的一般估算模型。文献[26]给出了能量有关路由协议的系统化分类，指出了节省能量的各种方法。

## 2.7 本章小结

本章首先简述了无线传感器网络的基本概念，包含其体系结构及自身特点。然后根据目前常见的网络体系结构框架简要介绍了无线传感器路由协议相关内容，详细地阐述了无线传感器网络的拓扑管理控制、能量控制、路由协议及MAC层协议、QoS支持等关键支撑技术，最后着重介绍了无线传感器网络的几种主要路由协议的优缺点，为后续章节奠定基础。

## 第三章 LEACH 协议分析

### 3.1 LEACH 协议

LEACH 协议<sup>[7]</sup>是由 MIT 的 Heinzelman 等学者第一个提出数据聚合的层次路由协议,为了平衡网络中各个节点的能耗,协议周期性的按“轮”来随机选举簇头。成为簇头的节点在无线信道中广播这一消息,其余节点选择加入信号最强的簇头,节点通过一跳通信将数据传送给簇头,簇头也通过一跳通信将聚合后的数据传送给 sink 节点。该协议采用随机选举簇头的方式避免了簇头过分消耗能量,提高了网络生存时间,数据聚合能有效减少数据通信量。不过 LEACH 协议仍存在不足:由于仍采用一跳通信,虽然传输时延小,但要求节点具有较大功率通信能力,其可扩展性差,不适合大规模网络;簇头的轮循由时间确定,而与节点剩余和位置无关,簇头的频繁选举导致了大量的广播信息,使得网络消耗了能量;当远离 Sink 节点的簇头节点时,与 Sink 节点采用直接通信耗费了较多的能量。TEEN 协议<sup>[8]</sup>类似于 LEACH 协议,采用了相同的聚簇方式,但簇头根据 sink 节点距离的不同形成层次结构,并利用了过滤方式来减少数据传输量。PEGASIS 协议<sup>[9]</sup>在 LEACH 协议的基础上为采用无通信量的簇头选举方式避免了频繁选举簇头的通信开销,但该协议要求每节点知道全网络中其他节点的位置,通过贪心算法选择最近的邻节点形成链,这种计算开销非常大;PEGASIS 还要求节点都具有与 sink 节点通信的能力;另外如果链过长的时候,传输的时延将会增大,因此 PEGASIS 在这种情况下并不适合实时应用。

### 3.2 LEACH 协议算法分析

LEACH 协议假设:

- (1) 各节点均能与 sink 节点进行通信。
- (2) 各节点初始能量值相同。
- (3) 节点各方向上的能耗值相同。
- (4) 各节点采用统一时间间隔定时竞选簇首。

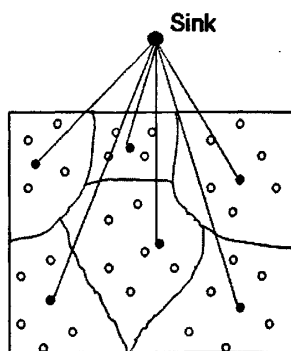


图 3-1 LEACH 聚簇示意图

LEACH 协议采用一种分布式算法, 图 3-1 所示为其网络示意图, 该协议将分布于网络区域的节点自动成簇, 每一簇确定一个节点作为簇首, 数量约为网络节点的 5%<sup>[7]</sup>, 簇内节点只与簇首通信, 簇首将数据进行简单融合后与 sink 节点直接通信。簇内成员只需要知道本簇内簇首即可, 且与簇首传输数据只需要消耗少量能量, 簇首也只需要维护簇内较少节点信息即可。为了避免簇首节点能量消耗过快, LEACH 协议当中约定一定时间后便重新选举簇首, 由不同节点轮流担任簇首, 以此实现能量的均匀消耗。LEACH 算法分为簇形成阶段 (setup phase) 和簇稳定 (steady-state phase) 阶段, 这两个阶段合起来称为一轮 (round)。其中簇稳定阶段远远长于簇形成阶段, 这样可以避免频繁的簇首选举, 也就避免了簇首选举所带来的额外能量开销。在簇形成阶段, 每个传感器节点生成一个 0 与 1 之间的随机数值, 如果该随机数小于阈值  $T(n)$ , 那么这个节点就被选为簇首。其中阈值  $T(n)$  的大小由公式 (3.1) 来确定:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p * (r \bmod (\frac{1}{p}))} & n \in G \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3.1)$$

其中  $p$  为簇首节点占网络节点总数的比例,  $r$  是簇首选举的轮次,  $G$  是最近  $1/p$  轮中未当选成为簇首的节点。图 3-2 表明了节点成为簇首概率可能性, 从中可以看出, 最近  $1/p$  轮未成为簇首的节点变成簇头的机会是越来越大。

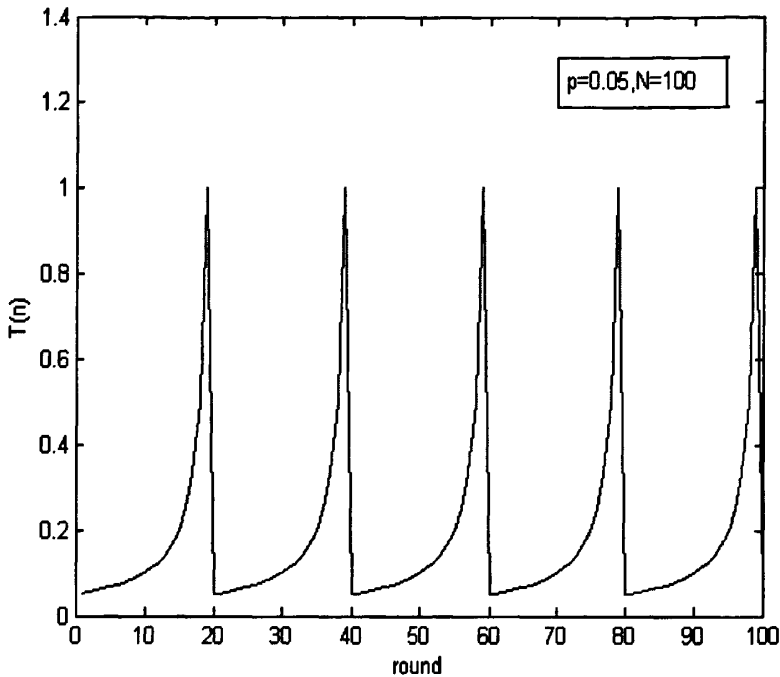


图 3-2  $T(n)$  值随轮次变化关系图

成为簇首的节点随后向全网发送广播信息，节点根据接收到信息的强度来决定自身加入哪个聚簇，并告知相应的簇首。簇首根据周边节点回馈的相应信息，基于 TDMA 来为簇内成员分配时隙。簇建立阶段具体流程如图 3-3 所示。

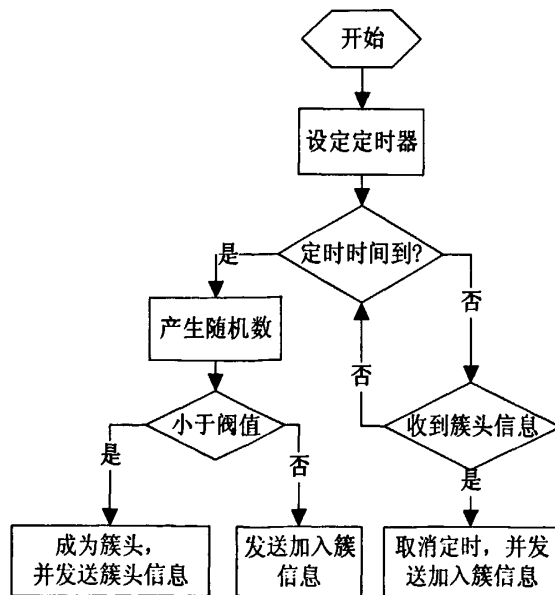


图 3-3 LEACH 协议簇建立阶段节点流程

式 (3.1) 中，若簇首节点数目为  $p$ ，节点总数为  $N$ ，则每个节点担任簇首的

概率值为:

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{k}{N - k * (r \bmod (\frac{N}{k}))} & n \in G \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3.2)$$

故当第  $t$  轮时簇首节点数目的期望值为

$$E(CH) = (N - k * (r \bmod (\frac{N}{k}))) \times \frac{k}{N - k * (r \bmod (\frac{N}{k}))} = k \quad (3.3)$$

在簇稳定阶段, 簇内成员持续采集所监测的数据。在簇首为之分配的时隙内传到簇首, 簇首进行数据融合后再将数据传送到 sink 节点。经过指定的时间后, 进入下一轮再次选举出簇首。为减少各簇间信息干扰, 在各簇内采用不同的 CDMA 编码。

### 3.3 LEACH 能耗模型分析

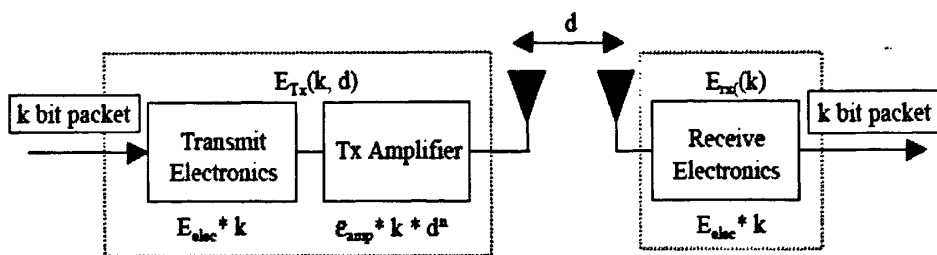


图 3-4 无线能量消耗模型

LEACH 协议所应用的能量消耗模型如图 3-4 所示, 图中  $d$  表示传输距离,  $k$  表示为传输数据量。传感器节点能量损耗是由维持收发机工作和无线传输两部分能量损耗组成的。其中发射机的发射能量  $E_{Tx-elec}(k)$ , 接收机接受信号的能量  $E_{Rx-elec}(k)$ , 功率放大器消耗的能量  $E_{Tx-amp}(k, d)$ 。则当传输距离为  $d(<d_0)$ , 传感器发送  $k$  比特的数据包所消耗的能量为

$$\begin{aligned} E_{Tx}(k, d) &= E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d) \\ &= E_{elec} * k + \epsilon_{amp} * k * d^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

自由空间传输模型(Friis 模型)的接收信号功率的计算公式:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \quad (3.5)$$

其中  $d$  为发送方和接收方的距离;  $P_t$  为发射的信号功率,  $G_t$  和  $G_r$  分别表示发送方和接收方天线增益;  $L(L \geq 1)$  为系统损耗,  $\lambda$  是波长。在 NS 模拟时, 通常取  $G_t = G_r = 1$  和  $L = 1$ 。在 Friis 模型中, 通信范围为以发射方为圆心的一个圆。如果接收方在这个圆里则可以接收所有的包, 否则丢失所有的包。

两极地面反射模型(Two-ray ground reflection model)中的接收信号功率公式:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{(d)^4 L} \quad (3.6)$$

其中  $d$  为收发双方的距离;  $h_t$  和  $h_r$  分别为发射天线和接收天线的高度。  $L = 1$ 。

设  $d_0 = \frac{4\pi \sqrt{L} h_t h_r}{\lambda}$ , 其中  $L$  是跟传播无关的系统损耗, 一般假定取值

1,  $h_r$  是接收天线的高度,  $h_t$  是发送天线的高度,  $\lambda$  是载波信号的波长。在  $d < d_0$  时, 采用自由空间能量消耗模型, 此时与距离的平方成正比; 当  $d \geq d_0$  时, 采用两极地面传输模型, 此时与距离的四次方成正比。于是

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} E_{elec} \times k + \varepsilon_{Friis-amp} \times k \times d^2 & (d < d_0) \\ E_{elec} \times k + \varepsilon_{two-way-amp} \times k \times d^4 & (d \geq d_0) \end{cases} \quad (3.7)$$

接收机消耗的能量为  $E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k) = k \times E_{elec}$ , 式中  $E_{elec}$  为每比特数据在发送或接收过程中所消耗的能量。

从式(3.7)中可以看出, 当距离大于  $d_0$  时能量消耗较大, 因此一般情况下直接传输距离小于  $d_0$  时能量消耗较低, 距离较远的节点通过中间节点的转发来减小能量的消耗。

设有一长为  $l$  的数据包, 从传感器节点采集经簇首转发至基站, 其中簇内能量消耗:

$$E_{inCH}(l, d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-amp}(l, d) \quad (3.8)$$

簇首发送到基站消耗的能量  $E_{toBS}(l, d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-amp}(l, d)$ ，因此对每一比特网络的能量总消耗可写成  $E_{total} = E_{inCH} + E_{toBS}$ 。

在 LEACH 的每一帧中，每个簇首节点要接收本簇其它成员节点直接发来的数据，把它们聚合后发送给 BS，故簇首的能耗为：

$$E_{CH} = \left( \frac{N}{k} - 1 \right) E_{Rx}(l) + E_{Tx}(l, d_{toBS}) = l \times E_{elec} \frac{N}{k} + l \varepsilon_{amp} \times d_{toBS}^2 \quad (3.9)$$

考虑到网络中传感器节点均匀分布在  $M \times M$  大小的区域中，故  $d_{toBS}^2$  的均值为

$$E[d_{toBS}^2] = \int_0^M \int_0^M [(x - x_{BS})^2 + (y - y_{BS})^2] \frac{1}{M^2} dx dy \quad (3.10)$$

每个簇成员节点，在每一帧中，只需要向簇首节点发送数据

$$E_{inCH} = E_{Tx}(l, d_{toCH}) = l E_{elec} + l \varepsilon_{amp} d_{toCH}^2 \quad (3.11)$$

另外由文献[20]知：当簇首数为  $k$  时，对  $d_{toCH}^2$  的期望值为

$$E[d_{toCH}^2] = \frac{M^2}{2k\pi} \quad (3.12)$$

由此可以得出 LEACH 协议在一帧中，每个非簇首节点向 BS 节点发送长度为  $l$  的数据的总能耗为：

$$\begin{aligned} E_{total} &= E_{inCH} + E_{toBS} \\ &= 2(N-k)lE_{elec} + (N-k)l\varepsilon_{amp} \left( \sum_{i=0}^{N-k} d_{toCH}^2(i) + \sum_{i=0}^k d_{toBS}^2(i) \right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

### 3.4 LEACH 算法不足

(1) 簇区域划分的不均：LEACH 算法中簇首的产生具有极大的随机性，无法保证获得到最优化的簇区域划分方案，其成员数量的不均，当某个区域内的簇内成员较多时，簇首显然要消耗更多的能量来负担较多簇成员节点的数据传输，而且簇内的成员节点会因为长时间的轮转才能够获得数据传输的机会，降低了数据包的传输效率，增大了数据传输的时延，文献[27][28]给出了节点数与成簇区域之间的优化关系。另一方面较远的簇首与 sink 节点进行通信，也会消耗过多的能量，造成网络部分较远节点能量消耗加速<sup>[30]</sup>。同时在簇内可能会出现部分簇

首相距过近或部分区域的节点离簇首太远的情况，大大增加了节点的传输能耗。

(2) 网络每经过一段时间后，全部簇首即开始重新选举簇首，并向全网广播簇首信息，簇首选举一方面使得在簇首选举的过程当中消耗额外能量，另一方面又使得各节点的负载均衡，进一步实现节点能量消耗均衡。若选定的时间间隔过长，那么在每一轮的稳定阶段，簇内簇首节点数据传输量大，容易造成该节点能量消耗过快，造成部分节点能量消耗不均，容易导致部分节点过早消亡。若选定时间间隔过短，则频繁选举会造成额外能量消耗过大。

事实上，随着时间往后推移，各存活节点平均能量值减少，仍然采用固定时间间隔竞选簇首，会导致部分担当簇首的节点能量过度消耗，加速死亡。所以应该根据其能量消耗速度来调整其定时器间隔值，以便尽快让能量较多的节点负担起责任，以使网络生命周期延长。

(3) LEACH 协议不但要求每个节点之间均能够相互通信，还要求能够与 sink 节点能够通信，这个要求会导致 LEACH 协议的应用规模非常小。

(4) 低能量节点当选簇首：由于节点采用随机数与阈值进行比较，缺乏了解网络的整体信息，使得能量较低的节点亦可能成为簇首，加速该节点的死亡。

LEACH-C 是在 LEACH 上所做的改进，在簇首建立阶段，网络中各节点发送各自的位置信息及剩余能量值给基站，基站收集到所有节点的信息后，首先选定能量值高于网络平均能量的节点作为可能的簇首，然后随机选出固定比例数 5% 的节点当选为簇头，接着通过模拟退火算法找出本轮中距离平方和的最优值，最后基站将选定的簇首节点消息发送给网络中的每个节点，各节点根据基站发布的公告信息加入距离最近的簇首，这样网络便通过基站的集中算法建立了簇。稳定阶段与 LEACH 相同。

LEACH-C 解决了 LEACH 算法中节点由随机数来决定是否当选为簇首，每轮产生的簇首没有确定的数量及位置等问题，提高了簇的生成质量。但是由于网络节点必须向基站周期性地报告其能量和位置等信息状态，这种额外的能量消耗，给网络带来了较大的开销，会影响到网络的流量和时延等因素。其次，随着网络的运行，当有节点死亡后，算法仍然保持同样数量的簇首，并没有按照 5% 的比例来自动调节簇首的数量，越往后，会显得簇首越多，这也加速了网络节点的死亡。再次，LEACH-C 适合于在静态场景当中，并没有考虑在移动型场景当

中的适用情况，当网络中出现有移动类型的节点后，LEACH-C 对于选择的簇首并没有任何在移动性方面的考虑，所以 LEACH-C 协议表现比较差，节点平均移动速度越快，其网络生存周期性能下降得越发明显。

### 3.5 本章小结

本章首先简要介绍了 LEACH 体系路由协议，然后详细讨论了 LEACH 协议的提出背景、设计思想、运行机制和实现方法，给出了 LEACH 路由协议的能量消耗分析模型，最后分析了 LEACH 路由协议和 LEACH-C 路由协议各自不足之处。

## 第四章 改进的能耗均衡聚簇路由协议

针对 LEACH 协议所存在的不足, 本文首先提出改进的分布式能耗均衡聚簇路由协议 (Distributed Energy-Balanced Clustering Algorithm, EBCA-D)。图 4-1 是 EBCA 算法沿用 LEACH 路由协议采用的时间图, 协议按时间轮运行。每轮开始是簇首选举阶段, 然后是簇首稳定阶段。为防止簇首的频繁选举, 同样设定簇首稳定时间要远长于建簇时间。稳定阶段时间被划分成多个帧, 每个帧内根据簇内成员节点数目的情况划分成多个时间片。

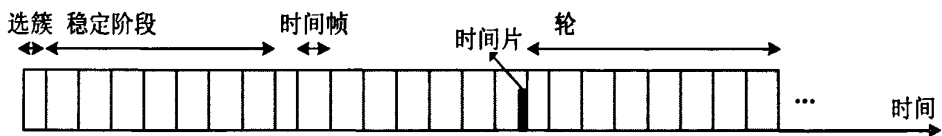


图 4-1 EBCA 时间图

### 4.1 分布式能耗均衡聚簇路由协议

为了使得簇首节点在网络中的分布均匀, 这里引入竞争半径  $R$  作为簇首与簇首之间的最小竞争距离。下面给出建立簇首的详细过程。

#### 4.1.1 簇首建立

EBCA-D 在分簇建立阶段的流程图类似于图 3-3。具体的建立步骤如下:

(1) 第一阶段: 各节点向依靠发送不同强度信号探测竞争半径  $R$  内的邻近节点, 并把探测到的邻节点能量、地理位置坐标等信息加入到邻节点列表中。

(2) 第二阶段: 若该节点能量值低于邻节点平均值, 则放弃成为簇首的资格。否则各节点根据自己的  $T(n)$  值与所产生的 0-1 之间的随机数  $\text{rand}$  进行比较。如果该值低于随机数值, 则该节点成为候选簇首节点, 然后向在自己竞争区域内的邻节点广播簇首消息  $\text{ADV\_WILL\_CH}$ , 且等待各节点的回应; 否则该节点表示为普通成员, 同时等待网络中簇首消息的广播。

(3) 第三阶段: 若候选簇首节点同时收到竞争区域内其他节点的  $\text{ADV\_WILL\_CH}$  消息, 则从邻节点信息列表中找出该节点到邻节点的距离平方

和, 值较小者成为簇首, 向网络广播 ADV\_CH 消息。节点接收到邻近节点的多个簇首广播的 ADV\_CH 消息后, 找出与其距离最小的簇首, 向该簇首发送加入请求消息 JOIN\_REQ。

(4) 第四阶段: 若节点到等待定时器超时后, 仍未收到 ADV\_CH 消息, 表明网络中并无节点担任簇首, 则高于邻节点平均值的节点主动担任簇首, 发布 ADV\_CH 消息。

(4) 第五阶段: 簇首接收到各 JOIN\_REQ 消息后, 簇首采用 TDMA 为要加入的簇内成员分配通信时隙, 同时为了减少各簇之间信号的干扰, 采用 CDMA 方式为簇内各节点分配码片, 最后将时隙信息与码片信息打包成 ADV\_SCH 调度消息发送给各个要加入的簇内成员。每一轮中, 我们设定数据稳定传输阶段的时间要远远大于簇首建立阶段的时间, 以减少簇首生成的额外开销。此外, 增加一个数据融合时间片, 以保证簇首在本时间帧内各时间片收集到的数据进行融合, 然后将融合后的数据转发给基站节点。

#### 4.1.2 数据传输

簇首为簇内成员分配好时间片以后, 簇成员节点就可以在属于自己的时间片内唤醒其通信模块与簇首通信, 该轮时间片用完后再将通信模块关闭, 以此来保存能量。簇首收到簇成员节点的数据信息后, 并不立即将数据发往基站, 而是缓存起来。等到所有成员节点传完信息, 到达本时间帧的尾部时间片再对数据进行分析、融合, 然后将融合后的数据发往基站节点。簇成员节点在传送的数据时捎带自身能量给簇首, 簇首发送完本帧数据后, 检查自身能量是否低于本簇内能量平均值。若低于平均值, 则簇首找出簇内能量值高过平均值的节点集  $C(N)$ , 并找出与簇内各成员节点距离平方和最小的节点  $N_{\min\_dist}$  作为新的簇首。旧簇首重新为存活节点分配时间片, 并将节点信息直接移交给新簇首, 然后发送 ADV\_CHANGE\_CH 消息通知簇内其他成员将簇首切换至新簇首节点。新簇首收到该消息后, 将自己的下一跳节点 ID 设为基站节点的 ID, 同时根据旧簇首重新分配的时间片与成员节点进行通信; 其他节点收到该消息后, 则将其下一跳节点 ID 设为新簇首节点 ID, 根据 ADV\_CHANGE\_CH 消息的内容找出自己的时间片信息, 并在新的时间片与新簇首进行数据通信。图 4-2 显示了簇内时间片的轮转

方式。



图 4-2 簇内时间片轮转图

### 4.1.3 簇维护与保持

当簇首节点在运行过程当中死亡后，各成员节点停止发送数据，以等待下一轮时间的到来，重新聚簇。当成员节点死亡后，则簇首节点在分配给该节点的时间片内收不到该节点的数据，则可认定该节点死亡。在下次轮换簇头时，担任簇首的节点若仍不能够收到该节点的 JOIN\_REQ 消息，则不再为该节点分配时间片。死亡的节点不再参与簇内数据的传输。

## 4.2 EBCA-D 协议分析

### (1) 相关参数取值

由于竞争范围的存在，且网络中节点均匀分布，故各竞争范围内的节点成员数目分布也都是比较地均匀，因此，各簇首的负载也就比较合理。为合理产生簇首数量，假定网络为在  $M \times M(m^2)$  的区域内部署  $N$  个传感器节点，如果产生的簇首数量为  $p$ ，节点的竞争半径为  $r$ ，那么各节点的竞争半径可视作簇的半径，其最小值  $r \geq \frac{M}{\sqrt{N \cdot p \cdot \pi}}$ ，当  $r \geq \sqrt{2} \cdot M$  时，区域内任何一个节点的竞争范围都将可以覆盖整个区域，网络也将退化为单点簇的情况。可以看出：当网络中存活节点数减少时，此时  $r$  值将增大。后续仿真环境中，考虑到  $M=100$ ， $N=100$ ， $p=0.05$ ，故可以将  $r$  值取定在  $25.2313 \leq r \leq 141(m)$  之间。

### (2) 能耗分析

EBCA 算法采用 LEACH 使用的无线电能耗模型，其能量消耗方式详细计算过程可参看前面 3.3 节，本小节具体给出与 LEACH 协议不同之处的能耗分析。

EBCA-D 协议和 LEACH 协议的执行过程类似, 都是基于随机簇头选举, 通过轮转簇头的方式来取得整个网络节点能耗分布的均匀。所以节点发送数据的能量消耗也就变得一致。因此主要部分的能量消耗与式 (3.13) 相同, 但是 EBCA-D 协议在局部利用损失极小能量来切换簇头在保证了由较高能量节点轮流担任簇头, 更能够均衡局部区域内节点的能量消耗。

假设某个簇内有  $m$  个成员节点, 连同簇首共  $m + 1$  个传感器节点, 若共进行了  $x$  ( $x < m$ ) 次簇首切换, 考虑到节点在网络中平均分布, 因此可将各簇内成员与簇首节点之间距离视为相同, 所以可假定发射每个数据包需要消耗能量  $e$ , 在簇首不轮转的情况下, 簇首消耗能量  $xme$ , 则平均消耗能量为

$$\bar{e} = \frac{xme + xme}{m+1} = \frac{2m}{m+1} xe \quad (4.1)$$

若簇头轮转情况下, 则有  $x$  个节点担任簇首, 担任过簇首的节点消耗能量

$$E = (x-1)e + me \quad (4.2)$$

没有担任过簇首的节点消耗能量值为

$$E' = xe \quad (4.3)$$

则各节点平均消耗能量为:

$$\begin{aligned} \bar{e}' &= \left( \sum_{i=1}^x [(x-1)e + me] + \sum_{j=1}^{m-x} xe \right) / (m+1) \\ &= [x(x-1)e + xme + (m-x)xe] / (m+1) \\ &= \frac{2m-1}{m+1} xe \end{aligned} \quad (4.4)$$

显然有  $\bar{e} > \bar{e}'$ , 由此可以看出, 实行轮转的方式较不轮转的方式平均能量值已经有所下降。

### (3) 数据融合率

由于簇内成员在簇首的竞争半径范围内, 也就意味着各节点的感知范围交叉面积增大, 因此其数据的关联程度也高, 当网络节点的密度增大时, 这一现象更加明显, 因此在此时能够提高数据的融合率。如图 4-3 所示节点感知范围相交时, 两个节点感知到的交叠区域数据可以被视为相同数据, 因而能够在簇首节点进行数据的融合。图 5-1 中, 假定分别部署于  $O$ 、 $O'$  的两个节点之间的距离为  $d$ , 其感知半径为  $r$ , 可求得相交部分区域面积为:

$$S = \begin{cases} 2r^2 \arccos \frac{d}{2r} - d \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{4}} & 0 \leq d \leq 2r \\ 0 & d > 2r \end{cases} \quad (4.5)$$

则每一帧数据的融合率为

$$\alpha = \frac{S}{2\pi r^2} \quad (4.6)$$

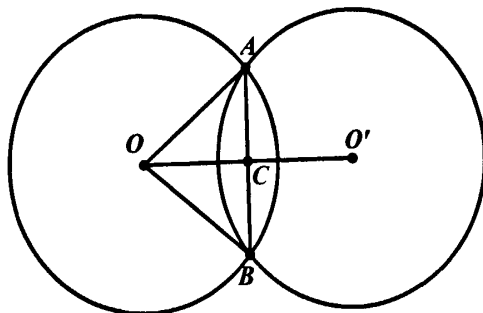


图 4-3 节点感知范围相交示意图

具体融合的方法可以根据具体的应用来确定,比如可以是求平均值、最大值、最小值、感知范围的其他信息等等。

## 4.3 仿真分析

### 4.3.1 NS2 仿真环境

#### (1) NS2 简介

NS2 是 Network Simulator Version 2 的简称,它是一款面向对象的、离散事件驱动的网络模拟器,来源于 1989 年的 Real Network Simulator 项目,它可以完整地模拟整个网络环境。经过 1995 年美国国防部高级研究计划局 DARPA 资助的 VINT(Virtual InterNetwork Testbed)计划,在 LBL, Xerox PARC, UCB 和 USC/ISI 的协助下发展。随后 NS 的开发有 DARPA 的 SAMAN 项目和 NSF 的 CONSER 项目的支持。目前,NS2 是免费的开源软件,也是通信和计算机网络领域的协议研究的主流平台之一。它采用开放式的体系结构,有着大量协议库的支持,被广泛应用于局域网、广域网、蜂窝网和卫星网络的模拟。NS2 使用 OTcl(面向对象的 Tcl 脚本语言)和 C++语言,其中 C++常用于编写协议的实现部分以提高模拟

程序的运行效率,而 OTcl 则常用于定义网络拓扑、配置业务源和会聚点、收集和统计信息等模拟配置描述,以便灵活改变网络中经常需要更改的部分。

## (2) NS2 层次结构

NS2 采用面向对象、离散事件驱动的模拟方法,对实际网络建模,模拟效率高,系统易于扩展,使用两种语言兼顾了模拟的效率以及系统建模的灵活性。NS2 经过了长久的发展历程,也积累了丰富的协议支持库,它能够支持 TCP/IP 栈中各层所涉及到的协议。

NS2 采用两级体系结构,为了提高代码的执行效率,NS2 将数据操作与控制部分的实现相分离,事件调度器和大部分基本的网络组件对象在后台使用 C++ 实现和编译,该层一般称为编译层,主要实现对数据包的处理的功能;NS2 的前端采用一个 OTcl 解释器,又称为解释层,主要实现对模拟环境的配置、建立、控制。从用户角度看,NS2 是一个具有仿真事件驱动、网络构件对象库和网络配置模块库的 OTcl 脚本解释器。NS2 中编译类对象通过对 OTcl 连接建立了与之对应的解释类对象。

## (3) NS2 的功能模块

通常情况下,模拟器模拟工作的开始,就是通过创建一个 Simulator 类的实例后开始的。Simulator 类可以看成是对整个仿真器的封装,含 node、link、agent、packet、LAN 等成员类。通过这个仿真器调用各种方法生成节点,进而构造网络拓扑图,对仿真的各个对象进行参数配置,定义事件,然后根据定义的事件,模拟整个网络活动的过程。在创建模拟器对象时,在构造函数中同时也创建一个该模拟器的调度器(Event Scheduler)。仿真器封装了许多功能模块,最基本的是节点、链路、代理、数据包格式等等。

1) 事件调度器:由于 NS2 是基于事件驱动的,调度器也就成了 NS2 的调度中心,它可以跟踪仿真时间,调度当前事件链中的仿真事件并交由产生该事件的对象处理。目前的 NS2 提供了链表、堆、日历表和实时调度器四种不同数据结构的调度器用来满足不同的需要。

2) 节点:是由 TclObject 对象组成的复合组件,在 NS2 中可以表示端节点和路由器。每个节点具有唯一的地址表示(id 标识)。节点分单播节点和组播节点两种,节点的内部通过 nodetype 变量来区分,其默认类型为单播节点。节点为

每一个连接到它的业务源分配不同的端口，用于模拟实际网络中的端口；另外，节点有一个路由表以及路由算法，由地址分类器根据目的地址转发数据包。

3) 链路：由多个组件复合而成，用来连接网络节点。所有链路都是以队列的形式来管理分组的到达、离开和丢弃。在链路中增加 Trace/EnqT、Trace/DeqT、Trace/DrpT 以及 Trace/RecvT 等对象可以跟踪每个数据包到达、进入、离开队列以及被丢弃的时间；还可以用队列监视器来监测队列长度和平均队长的变化情况。

4) 代理：负载网络层分组的产生和接收，也可以用在各个层次的协议实现中。Agent 类包含源及目的节点地址、分组类型、大小、优先级等状态变量，并利用这些状态变量来给所产生的分组的各个字段赋值。每个 Agent 连接到一个网络节点上（一般都是端节点），由该节点给它分配一个端口号。Agent 是实现 UDP 协议及各种版本 TCP 协议的基类。

5) 包：由头部和数据两部分组成。头部包括 cmnheader、ip header、tcp header、rtp header 及 trace header 等，其中最常用的是通用头结构 cmn header，该头结构中包含一个唯一的标识符，包类型、包大小及时间戳等。头结构的格式是在仿真器创建时被初始化的，各头部的偏移量也被记录下来，在 Agent 产生一个包之后，所有的头部都同时生成，用户能够根据偏移量来存取各头部所包含的信息。一般情况下，Packet 只有头部，没有数据部分，这样可以减小模拟过程中的数据处理量，加快仿真运行速度。

NS2 中对于无线网络节点与有线网线节点有所区别，图 4-3 是本文仿真实验中将使用到的移动节点模块图。

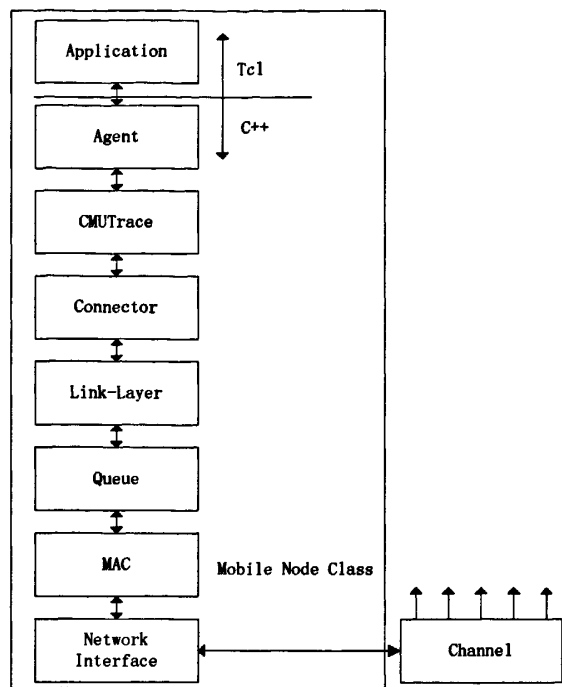


图 4-3 NS2 中无线节点模块图

(4) NS2 网络仿真过程<sup>[36]</sup>

基于 NS2 网络仿真的一般步骤：首先判断 NS2 中是否包含需要仿真算法对应的功能模块，如果有，则只需要根据仿真需要编写 Tcl 测试脚本执行，然后分析实验所记录的数据，得出结论；如果不包含该功能模块，则必须对 NS2 进行功能扩展，构成新的 NS2 仿真系统，再进行前述的工作。具体过程如图 4-4 所示。

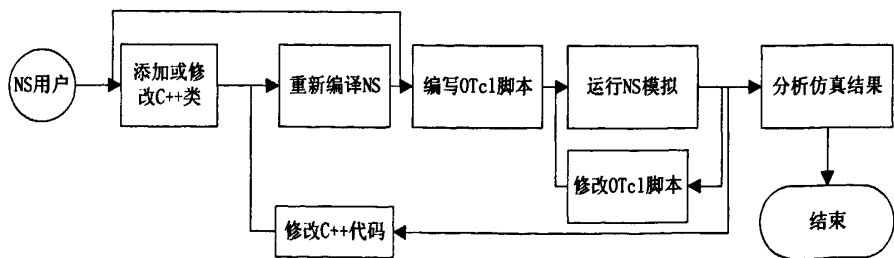


图 4-4 NS2 仿真流程

4.3.2 仿真参数

参照 Heinzelman 提出的分簇仿真模型，我们在 NS2 仿真环境下将各参数按表 1 中模拟实验参数取值。

表 1 NS2 模拟实验参数

参数	取值
$E_{init}$	2J
$E_{elec}$	50 nJ/bit
$\varepsilon_{amp}$	100 pJ/bit/m <sup>2</sup>
N	100
M	100m
$l$	500bytes
$p$	5%
基站坐标	(50,175)
竞争半径	35m

其中 100 个节点随机分布在  $100 \times 100$  (m<sup>2</sup>) 的区域内。

### 4.3.3 度量指标

Heinzelman 的仿真实验表明 LEACH 协议相比于 FLOOD、DD 等平面路由协议最小传输能量(MTE)、静态分簇(Static-Cluster)等算法有较大提高,而 EBCA-C 协议针对 LEACH 的不足而进行改进的算法,为方便比较两者的异同,我们在相同条件下对两个算法在 NS2 环境下进行仿真,以便比较各自优劣。下面是仿真中涉及到的性能指标:

(1) 平均能耗值  $E_a$ : 假设  $E_i$  是节点的初始能量值,  $E_f$  是节点最后和剩余能量值,  $N$  是当前存活的节点数量, 那么

$$E_a = \frac{\sum_{k=1}^n E_{ik} - E_{fk}}{N} \quad (4.7)$$

(2) 数据传输率: 数据传输率=成功传送数据/请求数据, 通常情况下, 无线链路可能由于信号干扰严重而导致传输失败, 或者是因为节点繁忙未能接收数据, 或者是因为传输距离较远接收到的信号太弱而未能够正确传输数据。理想情况下比率为 1, 当实际数据传输率小于理想值 1 时, 它表明协议设计容许数据有传输失败的情况, 然而如果实际数据传输率大于理想值 1 时, 表明接收结点不止一次收到该数据包。很显然, 收到重复包会导致系统的能量消耗额外的能量, 在协议当中, 应该尽量减少这种冗余。

(3) 簇成员节点数方差 (VAR)

簇内节点平均值为  $\mu = \frac{N - n_c}{n_c}$ ，其方差取定为

$$D(n) = \frac{1}{n_c} \sum_i (x_i - \mu)^2 \quad (4.8)$$

显然，当其值越小时，表明簇内平均节点值波动越小，也就表明簇的负载越均衡，考虑当  $N=20$  时，理想情况是 4 个簇，每个簇包含 4 个节点，那么  $\mu = (20-4)/4=4$ 。其方差值  $D(n)=0$ ，这个时候表明网络的负载是相当平衡的了。

#### (4)生存周期

无线传感器网络能耗均衡路由协议的目标是降低网络节点的能耗，均衡节点在各区域和时间上的能耗，因此网络生存周期越长越好。

### 4.3.4 仿真比较

首先，图 4-5 给出了节点平均能量消耗值随轮数的变化情况图。从节点平均能耗图中很明显可以看出，EBCA-D 路由协议由于采用的轮转簇头的方式，节点的能量得以平衡到簇内每个较高能量的成员节点当中，所以在局部簇首选择的时候，自动倾向了能量较多、距基站节点更近的节点，这样也减小了该节点担任簇头所带来的能量消耗。

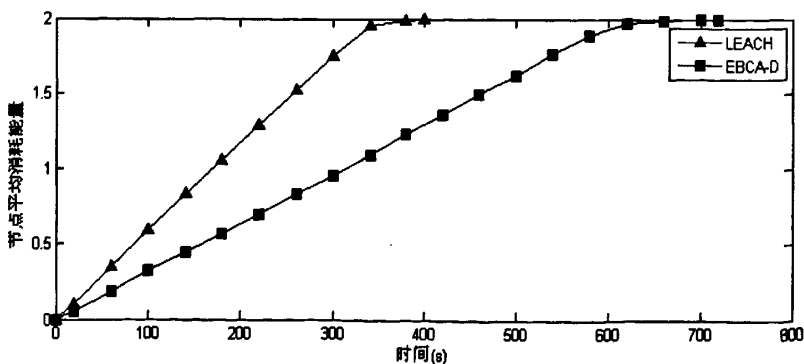


图 4-5 节点平均能耗图

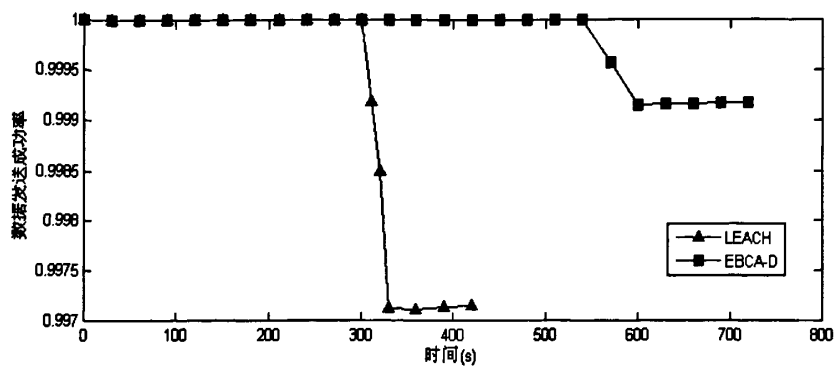


图 4-6 数据成功发送率关系图

图 4-6 是各轮当中数据从传感器节点发出，最终到基站节点成功接收的比率图。由于我们假设的环境中并无链路出错情况出现，所以在无节点死亡的时候，都无数据发送失败，在各自生存周期的后期，都有一定幅度下降，但 LEACH 协议后期，节点数目大幅下降之后，数据传送的成功率下降速度很快，幅度也较 EBCA-D 算法要高。从这个方面来讲，EBCA-D 要比 LEACH 协议表现稍好。

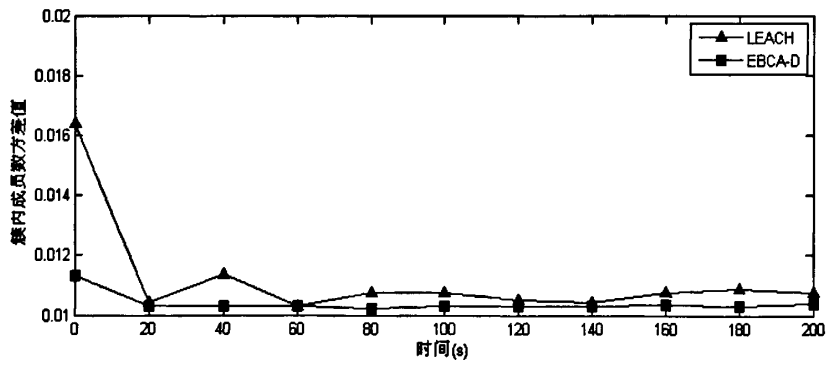


图 4-7 各轮中簇内成员数目波动情况图（前 200s）

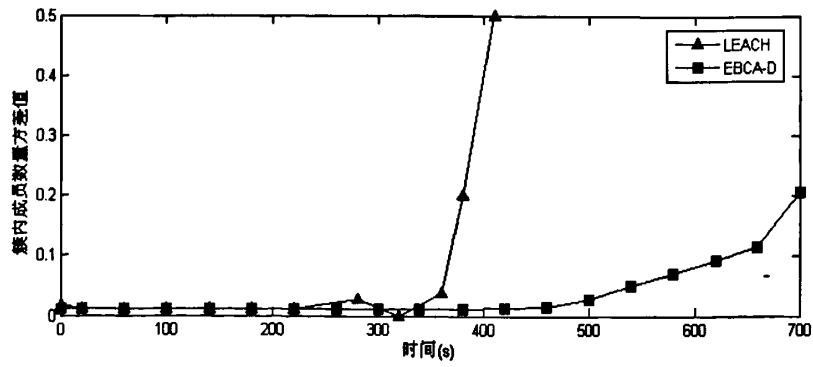


图 4-8 各轮中簇内成员数目波动情况图

图 4-7 和图 4-8 均是簇内成员数在各时刻中的变化情况图，图 4-7 是图 4-8 的前 200 秒，从图 4-7 和图 4-8 中都可以看出，LEACH 协议各轮簇首的数量并不稳定。相比之下，EBCA-D 由于采用竞争半径来控制簇内成员数量，所以簇内成员数量方差值变化并不明显。这都表明了 EBCA-D 算法具有良好的负载均衡能力，因而在整体上也能够更好地平衡各簇内的能量消耗水平。

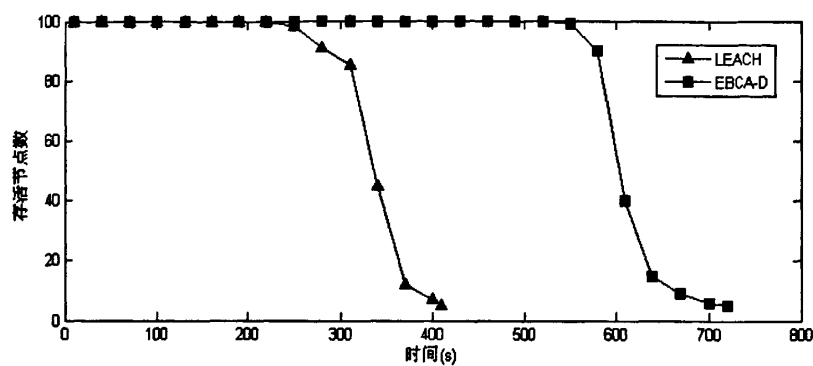


图 4-9 网络生存周期

图 4-9 给出了网络存活节点的变化情况图，图中第一个节点死亡的时间，LEACH 几乎是 EBCA-D 的一半。但两者类似的是，当第一个节点出现死亡后，后续节点的死亡率在后期都比较高。EBCA-D 协议中，到第 550 秒时尚无节点死亡，而在第 600 秒时，已经有近半节点死亡，剩下的一半节点最终也只再运行了 100 多秒，直到第 720 秒附近，网络最终因节点数目太少而退出运行。可见，无节点死亡的运行时间在整个网络生命周期当中保持了较大的比例，达到了 75%，而 LEACH 协议无节点死亡运行时间只达到了整个网络生命周期的 60%，且整个生存周期都大为缩短。

4.4 本章小结

本节首先详细介绍了基于 LEACH 改进后的分布式能耗均衡聚簇路由协议的实现过程，并分析了该协议与 LEACH 不同之处的能量消耗情况，最后通过仿真实验，比较了两个协议的平均能耗值、数据成功发送率、簇内成员波动情况以及网络生存周期等性能指标。结果表明，改进后的 EBCA-D 算法在上述指标中均表现较优，降低了节点的平均能耗值，延长了网络的生存周期。

## 第五章 移动环境中能耗均衡聚簇路由协议

Flooding, Gossiping, SPIN, DD 等平面路由协议建立路由后传输数据, 在移动环境中, 由于节点随时处于移动状态, 拓扑的快速变化使得原有路由失效, 为了建立一种快速适应网络拓扑的变化, 两层路由跳数的 LEACH 协议成为一个较好的选择, 但 LEACH-C 协议未考虑节点移动性的情况, 因此本文提出一种可适用于移动环境的能耗均衡聚簇路由协议 (Centralized Energy-Balanced Clustering Algorithm, EBCA-C)。该协议基于 LEACH-C, 也是一种自组织, 自适应地聚簇路由协议。它首先由 LEACH-C 中的方法计算出确定区域当选簇首的数目, 在簇首的选择过程当中, 综合考虑了节点的成员数量、节点与成员间的距离、节点移动速度和节点的累积消耗能量, 通过对这些值赋予一定权值, 选择出移动速度较小, 节点能量值较高, 负载比较合理的节点担任簇首, 以此来平衡节点间的能量消耗。

### 5.1 网络节点部署

节点感知最小覆盖原则: 在监测区域 A 内优化布置传感器节点, 则覆盖整个监测区域的最少节点数  $n_{\min}$  需要满足式 (5.1)<sup>[31]</sup>

$$\frac{n_{\min} \cdot \pi r^2}{S_A} = \frac{2\pi}{\sqrt{27}}, \text{ 即 } n_{\min} = \frac{2}{\sqrt{27}r^2} M^2 \quad (5.1)$$

其中  $S_A$  是监测区域的面积,  $r$  是传感器的传感半径, 此处假定网络区域为一  $M \times M$  大小区域。

节点通信最小覆盖原则: 为了在通信上覆盖整个网络, 假设一个  $M \times M$  区域内, 每个节点的通信半径为  $R$ , 则整个网络需要的节点数目  $n'_{\min}$  满足式 (5.2)

$$n'_{\min} \cdot \pi R^2 = M^2 \text{ 即 } n'_{\min} = \frac{M^2}{\pi R^2} \quad (5.2)$$

一般的  $r < R$ , 所以有  $n'_{\min} < n_{\min}$ , 故在网络部署时监控区域的节点数应该保证以传感器感知信息所需的最少节点数目为准。但为了在通信上亦保证节点能够覆盖网络, 故网络节点部署数量应以通信所需要的最少节点数目为准, 若将式 (5.2)

视作簇覆盖, 因为 LEACH 协议中簇首节点数量为网络节点数量的 5%, 故簇半径为

$$R = \frac{M}{\sqrt{0.05\pi N}} \tag{5.3}$$

其中 N 为节点总数。

5.2 簇首选择的方法

(1) 最高节点度算法, 最高节点度算法是一个基于度的分簇算法, 假定 A 是节点 B 在传输范围内的一个邻节点, 则 A 算作是 B 节点的一个结点度, 如此便可计算网络当中所有节点的通信范围内的节点度, 找出其中节点度最大的几个节点作为簇首, 这种方法可以极大减小簇头更换的频率。但担任簇首的节点一方面会因为长期担任簇首而导致能量消耗太快, 另一方面这种算法容易导致簇首分布过于集中, 相互之间容易出现干扰, 第三方面该方法的数据传输数率较低, 当簇内节点数目增多时, 数据包的吞吐率下降。

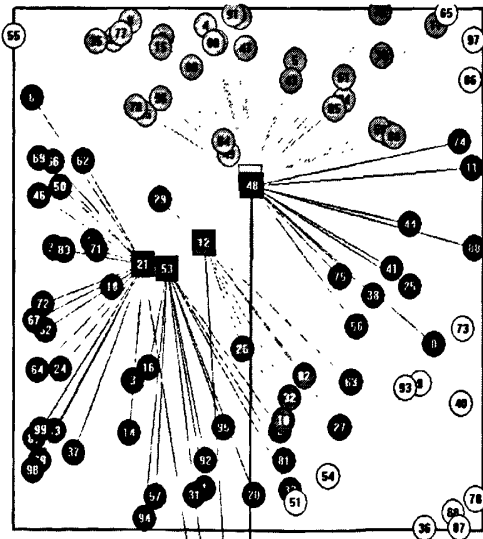


图 5-1 最大节点度成簇算法

图 4-3 给出了在  $100 \times 100(m^2)$  区域内, 节点通信半径为 50 时候取得的分簇结果, 结果显示簇首相距容易集中在一处, 并不利于整个网络节点能量消耗的均衡。

(2) 最小 ID 算法, 该算法为每个节点分配唯一 ID 号, 算法从相邻节点中选出具有最小的 ID 号作为簇头, 能与两个簇头相邻接的节点将成为网关, 网关

节点可以与相邻的两个簇通信。这种方法较之最大节点度可以提高吞吐率,但这种算法采用的是随机生成的节点 ID,算法本身并不更新 ID,即网络中存在的节点 ID 会固定不变,由于 ID 小的节点会长期担任簇头,因此簇头能量会很快下降,最终很快退出网络;而网络对于簇内成员数量并无约束,当网络中节点密度较大时,簇内节点数量较多时,簇头负载会较大,从而也未能平衡网络节点的能量消耗。

(3) 节点权重算法,该方法由 Basagni 在文献[33][34]中提出的两种算法:分布式分簇算法(Distributed Clustering Algorithm, DCA)和分布式移动自适应分簇算法(Distributed Mobility Adaptive Clustering algorithm, DMAC)中提出。两种方法中,每个节点被分配一定的权重,权重值较高的节点可以成为簇首,否则成为通信半径内某个簇首的簇内成员。

### 5.3 EBCA-C 算法详述

上节中所述簇首选择方法都比较简单,但是都不太实用。因此,本节将根据上节所述的节点权重法进行相应改进,同时将该方法应用于 LEACH-C 协议。LEACH-C 协议中只考虑了剩余能量值,而忽视了各簇成员的数量,以及簇内成员与簇首之间的距离,也没有考虑节点的移动性,所以在移动环境的成簇的过程当中应该考虑这些被忽视的因素,这样使得各簇首的节点负载相对平衡。EBCA-C 算法的计算比较简单,可跟随环境应用的变化而具有较好的可扩展性。在具体的环境应用当中,只需要增加相应的考虑因素即可。

#### (1) 基于权重的簇首选择过程

步骤 1. 查找出每个节点  $v$  在通信半径范围内的节点,称作邻节点。节点的邻接度定义为

$$d_v = |N(v)| = \sum_{v' \in V, v' \neq v} \{dist(v, v') < tx_{range}\} \quad (5.4)$$

显然,节点的邻接度反映了以该节点为中心的节点密度情况,邻接度越大,说明该处节点密度也大,若以该节点作簇首,则该节点的负载也就越大。

步骤 2. 为每个节点计算连接度差值

$$\Delta_v = |d_v - \delta| \quad (5.5)$$

其中  $\delta$  表示传感器节点理想的度, 例如在 LEACH 协议当中, 认为选取 5% 的簇首数比较合理, 则在有 100 个节点的场景当中, 每个簇首应该有 19 个成员, 也就是说这个时候  $\delta$  取值为 19 是比较理想的。

步骤 3. 对每个节点  $v$ , 计算该节点与它邻节点的距离平方之和

$$D_v = \sum_{v' \in N(v)} \{dist^2(v, v')\} \quad (5.6)$$

步骤 4. 计算节点从开始直到当前时间  $T$  的平均运动速度, 记移动平均值为  $M_v$ , 则其值为:

$$M_v = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2} \quad (5.7)$$

其中  $(X_t, Y_t)$  和  $(X_{t-1}, Y_{t-1})$  分别是节点  $v$  分别在  $t$  和  $t-1$  时刻的坐标。

步骤 5. 计算节点  $v$  作的累积消耗能量  $P_v$ , 该值反映了该节点是否比普通节点消耗了更多的能量。

步骤 6. 计算每个节点的复合权重值

$$W_v = w_1 \Delta_v + w_2 D_v + w_3 M_v + w_4 P_v \quad (5.8)$$

其中,  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$ 、 $w_4$  分别是各自相应系统体系内的权重因子, 且

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1 \quad (5.9)$$

步骤 7. 选择  $W_v$  值最小的节点作为簇头, 所以被选的节点的邻节点都不再参与簇头的选举。

步骤 8. 重复步骤 2-7, 直到选出的簇头数满足 Heinzelman 在 LEACH 中所提出的最佳簇首数为止, 此时完成簇首选举过程。

步骤 9. 基站将选出的簇首向全网发布。各节点收到基站发布的簇首消息后, 决定自己是否成为簇首。如果不是, 则加入最近的簇首, 成为该簇中的一员。

## (2) 稳定阶段过程

EBCA-C 算法在稳定阶段数据的传输与聚簇的维护如第四章 4.1.3 节所述一致。

5.4 仿真分析

本节所涉及仿真参数如 4.3.2 节中表 1 所示。下面分别设置静态场景和移动场景，静态场景中节点不发生移动，移动场景中的节点平均移动速度为 1m/s。 $tx_{range}$  的值由最小簇半径来选择。由 5.1 节中讨论，取  $M=100$ ,  $N=100$ ,  $p=0.05$ ，则  $tx_{range} \approx 25.23$ 。式 (5.8) 在静止场景中  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$ 、 $w_4$  分别取经验值为 0.3、0.3、0、0.4；移动场景中取为 0.2、0.1、0.4、0.3。

(1) 网络节点平均能耗比较

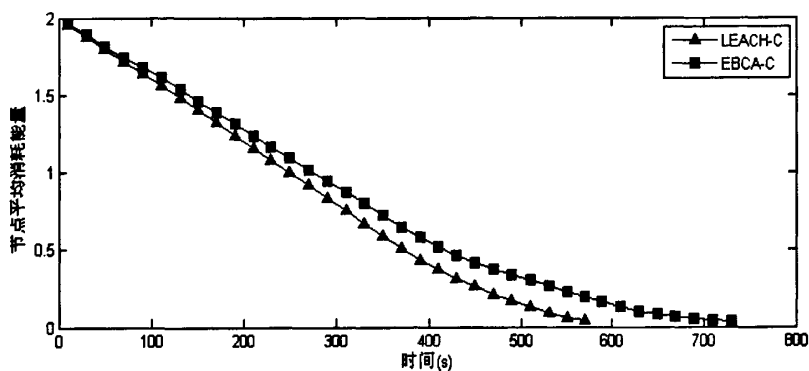


图 5-2 节点平均能耗图（静态场景）

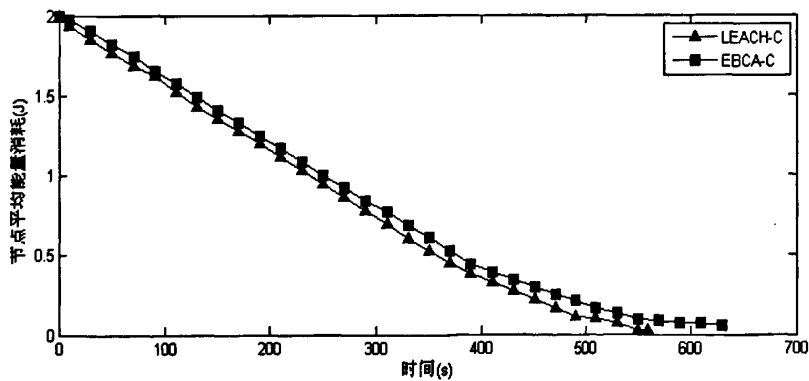


图 5-3 节点平均能耗图（移动场景）

图 5-2 和图 5-3 分别是 LEACH-C 和 EBCA-C 在不同场景下的节点平均能耗图，在静态场景当中，EBCA-C 协议中的节点由于考虑了簇首的负载平衡，考虑了节点的移动性，选择移动速度较小的节点为簇首，所以在节点平均能耗速度上要较慢；而在 LEACH-C 协议中，显然簇首节点消耗能量速度要较快。

(2) 存活节点数目比较

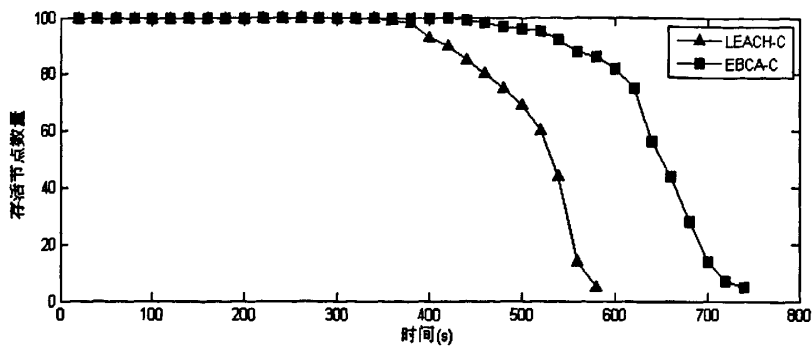


图 5-4 存活节点数量关系图（静态场景）

图 5-4 是在静态场景下节点的存活率，EBCA-C 算法综合考虑了节点的能量状态水平、簇首节点的负载情况以及簇首节点的预计能量消耗水平，所以其能量消耗总体上较 LEACH-C 缓和，因而表现更优。

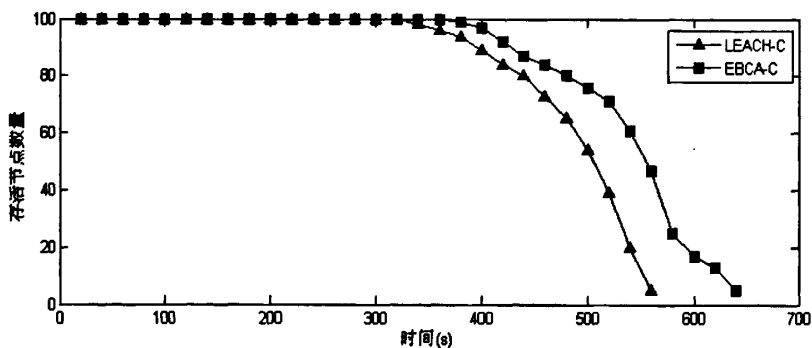


图 5-5 存活节点数量关系图（移动场景）

图 5-5 是节点平均运动速度为 1m/s 时候的存活节点数量关系图，在运动场合中，EBCA-C 更综合考虑了节点的运动状态，运动速度较低的节点更容易被当选为簇首，这样也就保证了簇的基本稳定性，因而节点的生存周期也要较 LEACH-C 更长。

5.5 本章小结

本章扩展了 LEACH-C 在移动环境的能量均衡方式。首先介绍了在移动环境中进行环境监测需要满足的条件，其次给出了传统的聚簇算法，再次考虑在移动环境下扩展 LEACH-C 协议，扩展后的路由协议 EBCA-C 首先排除比网络所有节点平均值低的节点当选为簇首的可能，然后综合考虑了节点密度、节点移动速度、节点与邻节点间距离平方和、节点的剩余能量等约束条件，并对每个条件赋予权

值，最后选择出权值最小的节点作为簇首。本章最后给出了 LEACH-C 路由协议和 EBCA-C 路由协议在静止和移动两个场景下的仿真比较。通过对节点能量消耗水平及网络生命周期两个性能指标的比较，证实了 EBCA-C 算法在移动环境下比 LEACH-C 更具有较优表现。

## 第六章 总结与展望

无线传感器网络是当今的一个新兴的技术领域,它具有自组织性、在特定领域内监控能力强、成本相对低廉等优点,因此已经引起了许多国家军事、学术、工业界的关注。但网络节点电源能力有限、通信范围小、计算能力不强等特点都使得无线传感器网络有别于传统网络,因此其路由协议也需要针对不同的应用场合开发新的路由协议。

本文介绍了无线传感器网络的基本概念、体系结构、应用领域,并指出了无线传感器网络路由协议目前所涉及到的各方面的关键技术,总结了无线传感器网络路由协议的研究现状。通过对现有主要路由协议的对比分析,我们得以从聚簇路由协议 LEACH 协议开始研究其性能及应用环境。针对 LEACH 路由协议的局限性,分别对 LEACH、LEACH-C 提出了 EBCA-D、EBCA-C 两种改进型算法,

EBCA-D 通过引入竞争半径的概念,平衡了各簇的节点成员数量;通过在簇内动态切换簇首节点,在局部平衡了各节点间的能量消耗;并通过在时间片划分时预留时间片资源以供簇首节点对数据进行有效的融合减少了发送往基站节点的数据包,从而减少簇首节点的能量消耗。通过对 EBCA-D 算法与 LEACH 算法的仿真可以看出,基于能量均衡的分簇路由协议在平衡能耗方面具有明显的优势,节点的负载情况有较显著改善,由于能量的均衡消耗,使得数据包的传输成功率也要较高,最终 EBCA-D 算法延长了网络生命周期。当然,EBCA-D 算法本身基于 LEACH 协议,并没有考虑网络规模方面的变化所带来的影响,同时也没有考虑节点移动的因素进来,另外在模拟参数方面,均为沿用 LEACH 协议中所用参数值,在具体的环境应用中的取值还有待进一步推导验证。

EBCA-C 算法综合考虑了节点密度、与邻节点距离关系、平均运动速度及能耗水平等四个因素,LEACH-C 只考虑了节点的能耗水平和与邻节点距离关系这两个因素;与 LEACH-C 采用复杂的模拟退火算法来优化选择网络簇首节点相比,EBCA-C 算法具有实现简单,运算高效,可扩展性强等优点。由于 EBCA-C 算法考虑了节点的运动速度,因此在移动环境中比 LEACH-C 算法更具有适应性;EBCA-C 算法也综合考虑了节点的密度状况,平衡了簇内成员节点的数量,在一定程度上平衡了簇首节点的能耗水平,进而平衡整个网络能耗水平,最终取得比

LEACH-C 更长的网络生命周期。另一方面, 基于权重的方法简单, 而且可扩展性较强, 适用于未来其他方面因素的考虑。但是对于权重因子的优化选择, 本文并无涉及, 这些权重因子对网络的性能会产生重大影响, 今后可以针对不同的应用开展以权重因子的择取进行进一步地研究。

## 参考文献

- [1] S.Hedetniemi, A.Liestman. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks[J]. Networks, 1988, 18(4): 319~349.
- [2] Haas ZJ, Halpern JY, Li L. Gossip-Based ad hoc routing[J]. In: Proc. Of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Communications Society, 2002, 1707-1716.
- [3] Joanna Kulik, Wendi Rabiner Heinzelman, and Hari Balakrishnan. Negotiation-based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks. ACM BOBICOM'99.
- [4] W.Heinzelman, J.Kulik, H.Balakrishnan. Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks. Proc. 5th ACM/IEEE Mobicom Conference (MobiCom '99), Seattle, WA, August, 1999, 174~185.
- [5] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh AGovindan, Deborah Estrin. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. IEEE/ACM Mobicom 2000[17].
- [6] T.Shepard. A Channel Access Scheme for Large Dense Packet Networks. In ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 1996, 26(4): 219-230.
- [7] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, In: Proc. of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences. Maui: IEEE Computer Society, 2000, 3005-3014.
- [8] Manjeshwar A, Agrawal DP. TEEN: A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In: Int'l Proc. of the 15th Parallel and Distributed Processing Symp. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001. 2009-2015.
- [9] Lindsey S, Raghavendra CS. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information system. In: Proc. of the IEEE Aerospace Conf. Montana: IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 2002. 1125-1130.
- [10] Mainak Chatterjee, Sajal K. Das and Damla Turgut. An On-Demand Weighted Clustering Algorithm(WCA) for Ad Hoc Networks[J]. in proceeding of IEEE

- Globecom'00, 2000:1697-1701.
- [11]Jamal N.Al-Karaki, Ahmed E.Kamal, Routing Techniques in Wireless Sensor Networks:A Survey[J], IEEE Wireless Communications. 2004,1(6):6-28.
- [12]任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络[J].软件学报,2003,14(7):1282-1291.
- [13]唐勇,周明天,张欣.无线传感器网络路由协议研究进展[J].计算机学报,2006,17(3):410-421.
- [14]G.J.Pottie and W.J. Kaiser. Embedding the Internet: Wireless Integrated Network Sensors [J]. Communications of the ACM, 2000, 43(5):51-58.
- [15]I.F.Akyildiz, W.Su, Y.Sankarasubramaniam, E.Cayirci. Wireless sensor networks: a survey [J]. Computer Networks, 2002,38(4):393-422.
- [16]邱天爽,唐洪,李婷,等译.无线传感器网络协议与体系结构[M].电子工业出版社.2007.
- [17]Braginsky D, Estrin D. Rumor routing algorithm for sensor networks.In:Proc. Of the 1st workshop on sensor networks and applications. Atlanta:ACM Press,2002.22-31
- [18]Schurgers C, Srivastava MB. Energy efficient routing in wireless sensor networks. In:Proc.of the MILCOM on Communications for Network-Centric Operations:Creating the Information Force.Virginia:IEEE Communications Society,2001.357-361.
- [19]Chu M,Haussecker H, Zhao F. Scalable information-driven sensor querying and routing for ad hoc heterogeneous sensor networks.The Int'l Journal of High Performance Computing Applications,2002,16(3):293-313.
- [20]Heizelman W. Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks[D].MIT.2000.
- [21]Rahul C. Shah,Jan M. Rabaey. Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks. Wireless Communications and Networking Conference, 2002.
- [22]梁华为、陈万明、李帅、梅涛、孟庆虎.基于蚁群优化的无线传感器网络能量均衡路由算法.模式识别与人工智能.2007,20(2).
- [23]乐世成,王培康.无线传感器网络中的节能路由算法[J].计算机工

- 程. 2008, 34(7).
- [24] 郭春学, 肖丽. 无线传感器网络路由协议分析与改进. 传感技术学报. 2009, 4.
- [25] 路纲、周明天、余垫、牛新征、刘匣、郑方伟. 无线传感器网络路由协议的寿命分析. 软件学报. 2009. 20(2):375-393.
- [26] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco, Andrea Passarella. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. Ad Hoc Networks. 2009, 7:537-568.
- [27] 陈静, 沈鸿. MELEACH 一个高效节能的 WSN 路由协议[J]. 传感技术学报, 2007, 20(9):2089-2094.
- [28] 肖伟茂, 王力. 一种基于 LEACH 的无线传感器网络路由算法[D]. 西安:西安电子科技大学, 2006.
- [29] 杜胜永, 柴乔林. 基于最大连通度的生成簇优化算法[J]. 计算机应用, 2006, 26(6):186-189.
- [30] Stanislava Soro, Wendi B. Heinzelman. Cluster head election techniques for coverage preservation in wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7: 955-972.
- [31] 张华忠, 刘志杰, 于鹏程. WSN 中负载均衡的 LEACH 通信协议研究[J]. 计算机工程与设计. 2007, 28(18):4403-4406.
- [32] 毛莺池, 刘明, 陈力军等. DELIC:一种高效节能的与节点位置无关的传感器网络覆盖协议[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(2):187-195.
- [33] BASAGNI S. Distributed clustering for ad hoc networks[A]. Proceedings of International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks[C]. Washington(DC):IEEE Computer Society Press, 1999. 310-315.
- [34] BASAGNI S. Distributed and mobility-adaptive clustering for multimedia support in multi-hop wireless networks[A]. Proceedings of Vehicular Technology Conference, 1999-Fall, Vol 2[C]. Piscataway(NJ):IEEE, 889-893.
- [35] Kristoffer Clyde Magsino, H. Srikanth Kamath. Simulations of Routing Protocols of Wireless Sensor Networks. proceedings of world academy of science, engineering and technology, 2009, 38:215-217.

## 发表论文与科研项目

### 发表论文:

[1] 朱海明, 单志龙. 基于 LEACH 的线性预测能耗均衡路由协议. 计算机技术与发展 (已录用)

### 科研项目:

本人参与黄埔海关缉私局边控在逃业务系统的系统分析、设计, 负责核心部分软件设计和开发。

## 致 谢

衷心地感谢我的导师单志龙教授！感谢单老师三年来无微不至的照顾，以及在整个的研究生学习、科研阶段所给予的支持与帮助。单老师治学严谨，对问题剖析深刻，见解独到，学识渊博却很谦虚；态度和蔼，平易近人，品德高尚却又不外扬。本论文也是在单老师的悉心指导和关心下完成的，从课题选择、方案制定、工作实施到论文修改完善，无不渗透着他的心血。总之，单老师无论是在学习、科研，还是工作、生活、为人处事方面都给我树立了一个优秀的榜样。

感谢王立斌副教授在论文开题时提出的宝贵意见，王老师严谨的治学精神、实事求是的态度是我人生中一笔宝贵的精神财富。

感谢始终关爱我的父母和家人，是他们的支持使我能够顺利完成这一阶段的学习和毕业论文！

感谢所有曾给予我关心和帮助的人，是他们让我克服了一个又一个的难关，是他们给予的支持鼓励着我在人生舞台上更精彩！

