

杭州电子科技大学

硕士学位论文

题 目：具有能量补给的异构传感器网络
分簇路由算法研究

研 究 生 徐向南

专 业 通信与信息系统

指导教师 肖明波 教授

完成日期 2015 年 3 月

杭州电子科技大学硕士学位论文

**具有能量补给的异构传感器网络
分簇路由算法研究**

研 究 生： 徐向南

指导教师： 肖明波 教授

2015 年 3 月

**Dissertation Submitted to Hangzhou Dianzi University
for the Degree of Master**

**Clustering Routing Algorithm
for HWSN with Energy Harvesting**

Candidate: Xu Xiangnan

Supervisor: Prof. Xiao Mingbo

March, 2015

杭州电子科技大学

学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明： 所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名： 日期： 年 月 日

学位论文使用授权说明

本人完全了解杭州电子科技大学关于保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属杭州电子科技大学。本人保证毕业离校后，发表论文或使用论文工作成果时署单位名称仍然为杭州电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。（保密论文在解密后遵守此规定）

论文作者签名： 日期： 年 月 日

指导教师签名： 日期： 年 月 日

摘 要

无线传感器网络拥有低功耗、以数据为中心、自组织能力强、鲁棒性强等优点，在很多领域都有广泛的应用，并且有着巨大的商业价值，引起了国内外各界广泛的关注。对无线传感器网络的研究可以从很多方面着手，如信息处理方面、路由协议方面、网络优化方面等。本文主要研究无线传感器网络的分簇路由协议，早期的路由协议主要基于同构类型的无线传感器网络设计，而在现实当中由于环境的复杂性，单型号的传感器网络可能无法满足用户需求，因此设计异构类型的无线传感器网络路由协议在某些情况下更有实用价值。本文从能量异构无线传感器网络入手，重点研究了异构无线传感器网络分簇路由算法。

路由协议是无线传感器网络关键技术之一，通过优化网络路由可以达到降低网络能耗、提高网络生存周期的目的。本文首先对分簇路由算法的设计目标、关键技术和性能指标的相关概念作了概述。接着介绍了几种典型的同构传感器网络分簇路由算法和异构传感器网络分簇路由算法，并对各种算法的性能进行了比较。

SEP 算法是较早提出的异构传感器网络分簇路由算法，针对 SEP 算法的不足以及考虑到节点具有能量采集功能，本文提出了一种具有能量补给的异构传感器网络分簇路由算法 EH-SEP。EH-SEP 算法在簇的建立阶段考虑了节点的剩余能量和采集到的能量；在数据传输阶段采用了簇间通信的方式。仿真结果表明，修改后的 EH-SEP 算法适用于具有能量采集的异构无线传感器网络，相比于 LEACH 算法、SEP 算法，EH-SEP 算法在网络的生存周期和网络的吞吐量等性能上都有了较大的提高。

压缩感知可以利用少量信息对原信息进行重构，降低了网络中信息传递量。结合压缩感知技术和分簇路由技术，本文提出了一种基于压缩感知的异构传感器网络分簇路由算法 SEP_CS。算法以降低能耗、延长网络稳定工作周期为设计目标。仿真结果显示，基于压缩感知的分簇路由算法有效的降低了网络的能耗，延长了网络稳定工作的周期，并且数据重构效果也比较理想。

关键词：能量采集；异构传感器网络；分簇路由算法；网络稳定工作周期；节能

ABSTRACT

Wireless Sensor Network (WSN) has many advantages, such as low power consumption, data-centric, self-organization, and strong robustness. WSN finds wide application in many fields and has great commercial value, which has attracted wide attention from home and abroad. The research of wireless sensor network can be from many aspects, such as information processing, routing protocol, and network optimization. In this thesis, we study the clustering routing protocol of WSN. Earlier studies of clustering routing protocol are based on homogeneous sensor network, while in reality our environment can be very complicated, and a single type of sensor network may not meet with the user requirements, so designing the clustering routing protocol for heterogeneous sensor network (HWSN) is more practical in some scenarios. In this thesis, our research is based on HWSN and study of the clustering routing protocol algorithm for HWSN.

Routing protocol is one of key technologies for WSN, and by optimizing the network routing we can achieve the objective of reducing network energy consumption, which improves the network life cycle. In the first part of the thesis, we introduce the concepts of clustering routing protocol in three parts, namely, the goal of designing the clustering routing algorithm, the key of technology, and the performance of clustering protocol. Besides, we also introduced several kinds of typical clustering routing algorithms for homogeneous and heterogeneous sensor network, and compare the various performances of the algorithms.

In the second part of the thesis, we introduce our own works. First, we introduce the algorithm of SEP, which is earlier proposed clustering routing algorithms for HWSN. Then analysis the light of the shortcomings of SEP and take into account the node with energy harvesting, we propose our clustering routing protocol algorithm for HWSN with the energy harvesting, which we called EH-SEP. In the cluster election phase, we consider the residual energy of nodes and the collected energy from the environment. In the data transmission phase, we use multi-hop to transmit the data. Simulation results show that the performance of the EH-SEP is better compared with the LEACH and SEP algorithm. The EH-SEP algorithm is not only suitable for HWSN with energy harvesting, but also greatly improve the network life cycle and the throughput.

In the third part of the thesis, we introduce the compressed sensing (CS) into our scheme, as we know that CS can use a small amount of information to reconstruct the original information, which can reduce the amount of information transmission in the network. So combining with the CS, we propose the SEP_CS algorithm for HWSN. The simulation results show that the clustering routing

algorithm is effective in reducing the network energy consumption and prolonging the stable working cycle of the network, and the data reconstruction performance is also satisfactory.

Keywords: Energy acquisition; Heterogeneous sensor network; Clustering routing algorithm; Stable working cycle of the network; Energy saving

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景与意义.....	1
1.2 能量采集技术.....	2
1.3 异构传感器网络的相关概念.....	3
1.3.1 异构传感器网络的基本结构.....	3
1.3.2 能量采集传感器节点硬件结构.....	3
1.3.3 无线传感器网络协议栈.....	4
1.3.4 异构传感器网络的性能评价.....	5
1.4 国内外研究现状.....	6
1.4.1 无线传感器网络研究现状.....	6
1.4.2 路由协议研究现状.....	7
1.5 论文工作和结构安排.....	8
第 2 章 无线传感器网络分簇路由协议.....	10
2.1 引言.....	10
2.2 分簇路由算法的相关概念.....	10
2.2.1 分簇路由协议的设计目标.....	10
2.2.2 分簇路由协议关键技术.....	11
2.2.3 分簇路由协议的性能评价指标.....	14
2.3 同构传感器网络分簇算法介绍.....	15
2.3.1 LEACH 算法	15
2.3.1.1 簇的建立阶段.....	15
2.3.1.2 数据传输阶段.....	17
2.3.1.3 LEACH 算法的优缺点	17
2.3.2 LEACH 改进算法	18
2.3.2.1 LEACH-C 算法	18
2.3.2.2 PEGASIS 算法	18
2.3.2.3 TEEN 算法	19
2.4 异构传感器网络分簇算法介绍.....	20

2.4.1 DEEC 算法	20
2.4.3 RCR 算法.....	20
2.4.2 PSCD 算法.....	21
2.5 各种算法性能比较.....	21
2.6 本章小结.....	22
第 3 章 具有能量补给的异构传感器网络分簇路由算法.....	23
3.1 引言.....	23
3.2 SEP 算法.....	23
3.3 EH-SEP 算法	25
3.3.1 系统模型.....	25
3.3.2 簇头建立.....	26
3.3.3 簇间路由.....	27
3.4 仿真实验与性能分析.....	28
3.4.1 仿真环境设置.....	28
3.4.2 仿真结果与分析.....	29
3.5 本章小结.....	32
第 4 章 基于压缩感知的异构传感器网络分簇路由算法.....	33
4.1 引言.....	33
4.2 分簇路由协议.....	33
4.3 数据压缩与重构.....	34
4.3.1 数据压缩算法.....	34
4.3.2 数据重构算法.....	35
4.4 仿真实验与分析.....	36
4.4.1 数据压缩仿真.....	36
4.4.2 异构网络性能仿真.....	37
4.5 本章小结.....	39
第 5 章 总结与展望.....	40
5.1 论文总结.....	40
5.2 下一步研究方向.....	41
致 谢.....	42
参考文献.....	43
附 录.....	47

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景与意义

由若干个具有无线通信能力的传感器节点自组织构成的网络称之为无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN)^[1]。无线传感器网络将信息世界和真实的物理世界联系在了一起, 实现了物理世界、计算机世界和人类社会的三元世界的连通^[2,3]。网络中的传感器节点具有信息感知 (Sensing)、信息处理 (Processing)、信息传输 (Transmitting) 和信息提供 (Provisioning) 的能力。在一个无线传感器网络中, 除了感知节点 (Sensor node) 外, 还包括一个或多个汇聚节点 (Sink node)、网关和大量其它功能的传感器节点。无线传感器网络集成了一系列的前沿技术, 它与塑料电子学、仿生人体器官一同被列为未来三大高科技产业。无线传感器网络拥有易移植性、以数据为中心、低功耗、自组织能力强、鲁棒性强等优点, 使得它在很多领域都有广泛的应用, 如智能交通^[4]、环境监测^[5]、目标跟踪^[6]、平安家居^[7]等; 同时也成为了国内外研究学者的研究热点之一。2003 年, 美国 MIT《技术评论》将无线传感器网络列为了 21 世纪最有影响力的 21 项技术之一^[8]。同年, 美国《商业周刊》将无线传感器网络评为改变世界的 10 大技术之一。2008 年, 美国《福布斯》发表文章指出无线传感器网络正慢慢的走向大规模的应用, 将掀起世界信息产业的第三次浪潮。

无线传感器网络通常部署在环境比较恶劣的区域, 有些区域人员无法到达, 节点运行所消耗的能量通常由电池供电, 因此电池容量的大小限制了无线传感器网络的性能和网络工作时长。受成本和节点工作环境的限制, 采用更换节点电池的方式来延长网络的工作时间可能是一种得不偿失的方法, 因此设计能量高效的传感器网络成为研究工作者研究的热点问题之一^[9]。为了降低整个网络的能耗、延长无线传感器网络的生命周期, 人们采取了很多的节能措施, 如研究了各种路由协议、设计了周期性工作/休眠的低占空比工作方式等, 这些措施仅仅是从能耗的角度来达到节能的效果。为了缓解电池容量和网络性能的矛盾, 具有能量采集装置模块的传感器成为了国内外研究的热点。具有能量采集功能的传感器节点能够通过能量采集装置将节点周围潜在可利用的能源, 如太阳能、风能等转化成电能存储在节点的电池或电容中, 给传感器节点提供了额外的能量, 从而来延长传感器网络正常运行的时间^[10]。

路由机制是传感器网络的关键技术之一, 设计有效的路由协议可以让传感器网络的生命周期更长、监测范围更广。虽然具有能量采集功能的无线传感器网络可以从外界得到额外的能量补充, 但如果对采集到的能量不合理利用也会造成能源的浪费, 并且也会影响网络的整体性能。对于具有能量采集功能的无线传感器网络而言, 结合能量采集技术来研究具有能量采集功能的无线传感器的路由问题, 将会得到更好的网络性能。对能量采集型的传感器网络在实际应用中也有着非常重要的意义。

1.2 能量采集技术

能量采集技术是一种可以通过能量采集装置将环境中的其它能源转化成电能的技术^[11]。能量采集效率的高低与能量采集装置的设计原理、装置结构和设计电路有着很大的关系。当节点周围的能源比较弱或者通过能量转化装置输出的功率比较小时，可以通过调整节点的使用功率或积累采集到的能量来满足节点的使用要求。

在我们生存的空间里存在着各种各样可以利用的能源，如太阳能、热能、声能、风能、振动能、电磁场能等，如图1.1所示。如何有效的利用这些潜在的能源，将其转化成可供传感器节点使用的电能，成为了这些年研究工作者研究的重点。经过努力，目前也取得了一些成果，设计出了一些转化率较高的采集装置^[12-14]。

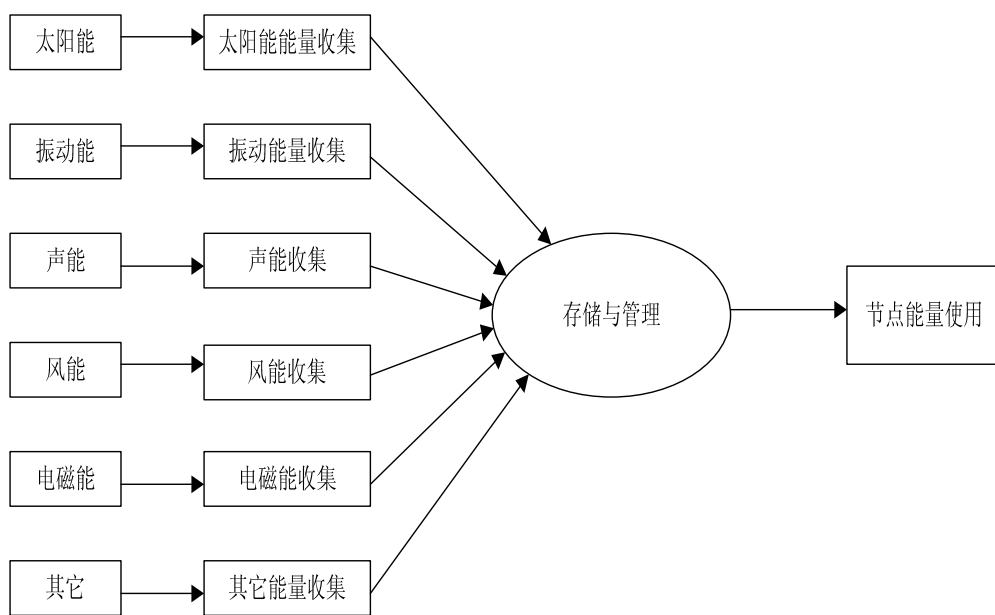


图1.1 环境中的能量采集与使用

太阳能是我们生活中最易获取到的能源，太阳能的采集技术相比于其它能源采集技术要成熟的多，但太阳能能否取代掉传感器节点中的干电池，这还要取决于太阳能采集装置对太阳能的转化效率。另外一个普遍存在的能源是振动能，环境中的各种因素都会导致振动的产生，使用压电材料可以将环境中的振动能收集起来。太阳能与振动能最大的不同是太阳能并非全天候的，节点的环境能量采集随时间变化而变化，并且影响转化效率的因素更多。国内外对振动能采集装置的开发已经取得了不少的成果。现有的技术已经可以将低振动强度的振动能转化成几百 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ 大小的电能输出^[15]。表1.1展示了环境中不同采集源能量的供能密度。

由于传感器节点能量采集装置的转化率并不是很高，现有的环境采集技术在节点供电上还存在明显不足，但采用环境能量补给的方法给传感器节点提供额外的能量已经证明是一种切实可行的方法。随着能量采集技术、传感器硬件技术以及软件技术的不断发展，能量采集型的传感器网络将会有更大的应用价值和商业价值。

表1.1 多种能量采集源的供能密度比较

潜在采集能源	供能密度 ($\mu W / cm^3$)
环境振动	375
噪声	0.96 (声强 100dB), 0.003 (声强 75dB)
温度梯度	15 ($10^{\circ}C$ 温差范围下), 10 (日常气温差)
压力变化	175
室内太阳能	6 (平常办公环境下)
室外太阳能	150 (阴天环境下), 15000 (太阳直射下)
气流	380 (5m/s)

1.3 异构传感器网络的相关概念

1.3.1 异构传感器网络的基本结构

异构无线传感器网络（Heterogeneous Wireless Sensor Network, HWSN）的体系结构基本与同构无线传感器网络的相同，唯一不同的就是前者包含多种不同类型的传感器节点^[16]。如图 1.2 所示，异构传感器网络中包括了多种不同类型的传感器节点、一个或多个汇聚节点和管理节点。所部署的节点具有数据采集、计算、处理和无线通信的能力，并且不同的节点具有不同的功能。节点间通过对某个区域的共同监测，将采集到的数据通过与其它结点协作，经过多跳或单跳的方式传送给汇聚节点。网络中的汇聚节点具备网关的功能，又有与外界其它设备进行交互的能力，通过它可以将传感器网络与外部网络（如 internet、卫星、通信网络等）进行互联，最终将收集到的信息传给目标用户。

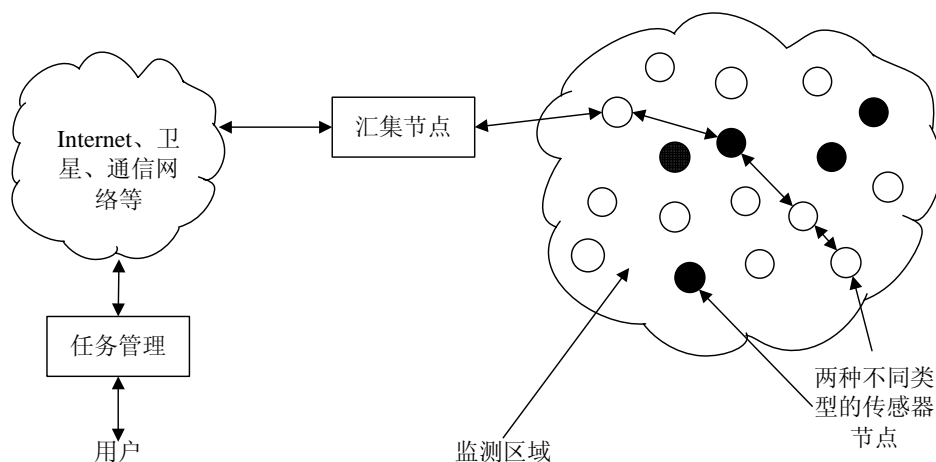


图 1.2 异构传感器网络体系结构

1.3.2 能量采集传感器节点硬件结构

能量采集传感器节点硬件部分通常由五个模块构成,如图 1.3 所示:传感器模块、处理

器模块、能量供应模块、无线通信模块和能量采集模块^[3]。传感器模块包括两部分，数据采集传感器元件和 AC/DC 转换元件，负责对所部署区域内的对象信息的感知和转换；处理器模块保证了节点程序的运行以及对感知信息数据和接收到的数据进行进一步的存储和处理；能量供应模块保障了整个传感器节点正常运行，节点能量可以通过干电池或化学电池提供；无线通信模块主要负责将所采集到的信息和接收到的信息进行调制或解调，整个传感器节点的能量消耗也主要集中在无线通信模块；能量采集模块主要负责将外界的能量通过能量采集装置转化成电能存储到电池或电容当中。

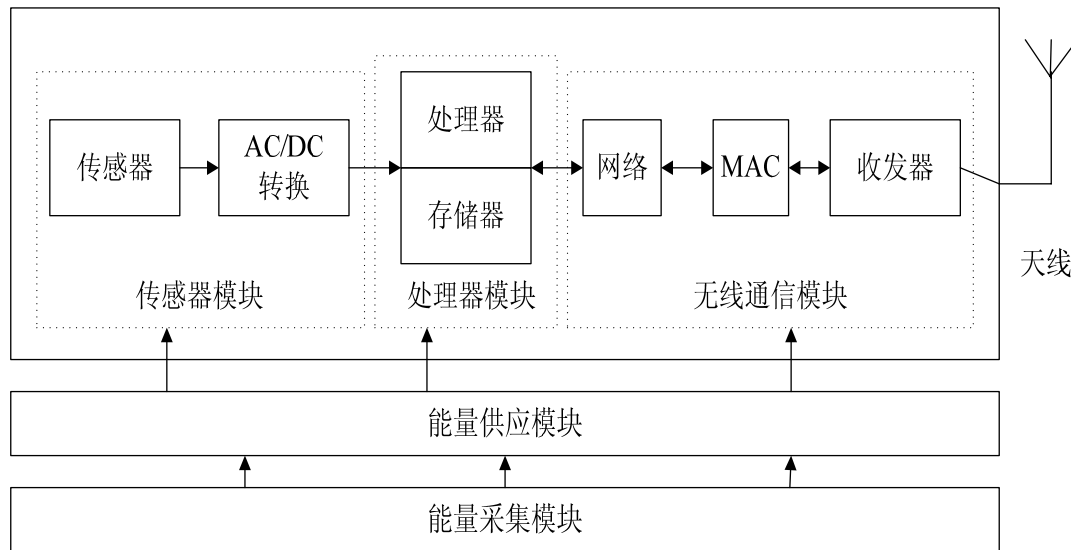


图 1.3 能量采集传感器节点基本结构

1.3.3 无线传感器网络协议栈

多种传感器网络协议栈结构已经被提出^[17,18]。图 1.4 (a) 是早期提出的协议栈结构，总共五层，分别是应用层、传输层、网络层、数据链路层和物理层。从图中可以看出协议中还包括能量管理平台、移动管理平台和任务管理平台，这些管理平台使得传感器节点能够按照能源高效的方式协同工作，在节点移动的传感器网络中转发数据，以及支持多任务的处理。

下面对各层功能进行简要的描述：(1) 物理层：可以为网络提供良好的无线电收/发技术。(2) 数据链路层：实现了节点之间的数据链路的建立、维持和释放。(3) 网络层：负责生成新的路由链路和实现路由转发。(4) 传输层：负责控制数据流和保证通信服务质量。(5) 应用层：包含一些负责监测、处理、交互的应用层软件。(6) 能量管理平台：负责节点能量的使用，协助其它层达到能量消耗最优。(7) 移动管理平台：对网络中的移动节点进行检测和注册，更新节点的路由表。(8) 任务管理平台：对所在监测区域内的传感器节点进行任务调度。

图 1.4 (b) 协议栈在 (a) 协议栈的基础上进一步的改进。在 (a) 的基础上添加了时间同步、定位、Qos、拓扑控制、网络管理等协议。从图中可以看出时间同步和定位协议成倒 L 型，这主要是因为时间同步和定位依赖于传输信道的支持，并且要为网络协议的各层提供相

应的信息。Qos 协议保证了整个网络的数据传输质量，是一种减小受限能源开销的控制机制，能够最大限度优化并保证网络的整体性能。拓扑控制能够通过利用网络层和数据链路层的相关信息来完成拓扑结构的生成，并且为其它网络协议提供了信息支持。

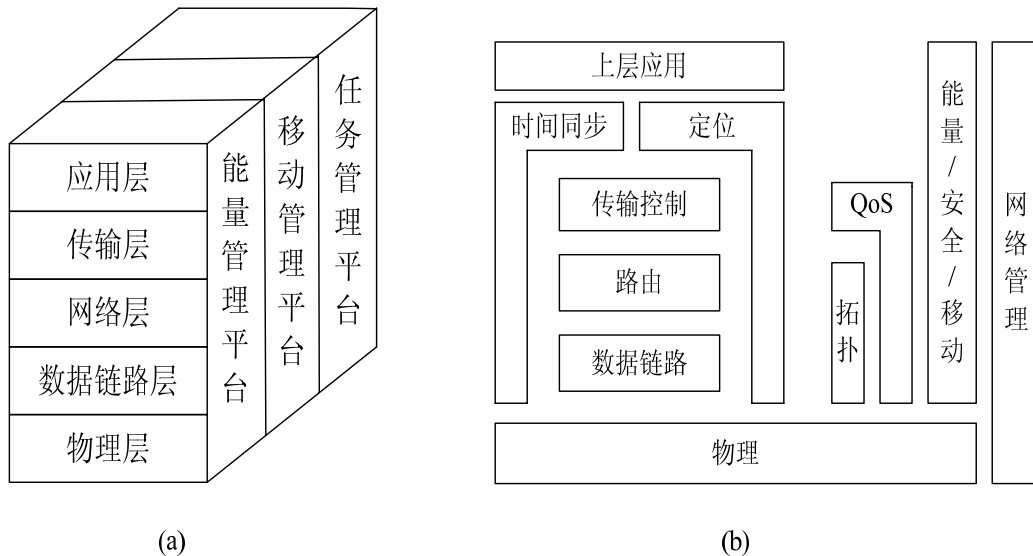


图 1.4 无线传感器网络协议栈

1.3.4 异构传感器网络的性能评价

传感器网络性能的好坏影响着网络是否能提供优质的服务以及影响其应用前景，采用一个什么样的评价机制来评价一个网络的性能是一个值得研究的问题。下面对衡量网络性能的几个指标进行阐述：

(1) 能量有效性

传感器网络的能量有效性指的是网络在能量限制的情况下完成实际任务的能力^[19]。衡量无线传感器网络性能的指标有很多，能量有效性就是其中一个比较重要的衡量指标。传感器网络一般采用干电池或化学电池来给传感器节点供电，但由于节点体积小，不可能携带很充足的能量，因此节点的能量成为了限制网络性能的主要因素之一。如何高效的使用节点能量成为了重要研究的课题。对于配有能量采集模块的传感器节点而言，虽然节点可以通过能量采集装置从外界得到额外的能量，但能量采集装置硬件成本高，现有的采集装置转化率也不是很高，所以能量有效性依旧是值得关注的问题。对于异构传感器网络而言能量有效性也是一个重要的性能评价指标。

(2) 网络的生存周期

对异构传感器网络中网络的生存周期采用了三种不同的定义方式，分别为：

1) 网络稳定工作的周期：指的是传感器网络从正常启动运行到网络中出现第一个节点死亡的这一段时间。在出现第一个死亡节点之前，整个网络的节点全部都处在正常工作模式，整个网络的运行比较稳定，能够正确处理和应答用户请求，这段时间网络的服务质量也比较高，能够满足用户要求。

2) 网络正常运行的生命周期: 指的是传感器网络从正常启动运行到网络中只剩 50% 的存活节点的这个时间。相比于网络稳定工作的周期, 这个时间要长很多。当网络中有节点开始死亡, 整个网络的服务质量也开始下降, 但由于网络中大部分节点还存活, 基本上还是能够满足用户所提出的需求, 整个网络的运行还算正常。当网络中的节点死亡多于一半的时候, 整个网络可能出现瘫痪, 开始无法满足用户的需求。

3) 全部节点的生存周期: 指的是网络从开始运行到最后一个节点全部死亡的这一时间段。当网络中最后一个节点死亡后, 整个网络就再也不会向观察者发送任何采集数据, 这时传感器网络的生命也就终止了。

影响网络生存周期长短有很多因素, 节点所携带的能量是最主要的因素, 除此之外还有路由算法的好坏、MAC 协议是否合理等也影响着网络的生存周期。在对无线传感器网络进行设计时, 我们要充分考虑到对传感器网络的软、硬件进行合理的设计, 根据网络特定的场景以及设计目标进行设计。

(3) 时间延迟

时间延迟指的是从用户发送请求到用户接收到数据所需要的时间。造成传感器网络数据延迟的原因有很多, 比如高效的路由算法, 虽然可以延长整个传感器网络的生存周期, 但在网络中, 节点从采集到数据到经过多跳的方式传输到汇集节点所花的时间相比于节点直接传输给汇集节点花的时间要多。时间延迟还与传感器的应用场景密切相关, 不同场景对时间延迟的要求也不同。

(4) 可扩展性

根据传感器网络应用场景的不同, 对传感器网络的可扩展性要求也不同。比如某个监测区域可能需要成千上万个传感器节点, 所设计的方案如何适应这么庞大的网络并且能够正常、高效的工作, 对传感器网络在节点数量方面的可扩展性有着较高的要求。此外在覆盖方面、节点协作等方面的扩展性在设计传感器网络时也要考虑到^[20]。

(5) 安全性

无线传感器网络的安全威胁, 分为对信息网络的威胁和对特定无线传感器网络的威胁。攻击者可以通过对信息的截获来改变传感器节点的信息, 并对节点进行操作。传感器网络的安全性存在着巨大的挑战, 如何采取有效的安全保障措施显得非常重要。在设计安全策略时要根据不同的应用场景来设计不同的安全策略。

除了以上的性能指标外, 评价一个网络好坏的性能指标还有网络容错性、网络的服务质量、感知精度、网络的健壮性等。

1.4 国内外研究现状

1.4.1 无线传感器网络研究现状

对无线传感器网络的研究可以追随到 20 世纪 70 年代。早期的研究主要应用在军事领域, 1980 年前后, 美国国防高级研究计划署开始对分布式传感器网络(Distributed Sensor Networks,

DNS) 进行研究, 成为正式对现代无线传感器网络研究的起点。计算机与通信技术的快速发展与进步, 极大的推动了无线传感器网络技术的发展。从 21 世纪开始, 无线传感器网络引起了国内外各界的极大关注。欧美国家也相应的启动了多项对无线传感器网络研究的项目。2001 年开始, 美国陆军开始实施“灵巧传感器网络 (Smart Sensor Web, SSW)”项目, 主要目的是获取战场全景图, 美国陆军将大量的传感器部署在战场上, 通过传感器传回来的数据绘制战场全景图, 以增加对战争地区全方面了解, 提高军队的作战能力^[21]。2009 年 7 月, 欧盟第七框架计划将“网络监测和控制系统”列为一个重点项目, 该项目研究开发系统架构、软硬件集成和工程方法, 用于由异构网络化智能对象组成的分布式系统。除此之外将传感器网络研究及应用列为了国家重点项目的还有芬兰、德国、日本和意大利等。

我国各政府部门和各大高校对无线传感器网络研究非常重视。2005 年, 神州六号飞船上配备了各种类型的传感器, 可以对飞船进行实时、多角度监控, 保证了飞船的正常运行。2006 年, 在《国家中长期科学和技术发展规划纲要》里提到了将智能感知技术和自组织网络技术的研究列为重点项目^[22]。中科院上海微系统研究所、计算机所和软件研究所等科研机构, 清华大学、西安交大和北京邮电大学等高校也都较早的开展了对无线传感器网络的研究^[23]。各地方如北京、上海、江苏、杭州等也都开始积极开展利用传感器网络建设智慧城市等项目。总之, 经过努力我国的传感器网络研究也取得了不少的成果, 为传感器网络的广阔应用打下了坚实的基础。

1.4.2 路由协议研究现状

无线传感器网络节点大部份能量消耗主要集中在无线通信模块, 对其降低能耗效果也是比较突出的。无线传感器网络通信能耗与通信距离成非线性比例关系, 传输距离越大能耗也就越大。在网络的拓扑结构与路由协议方面采取有效的措施可以降低无线传感器网络的能耗。无线传感器路由协议可以分为平面路由协议和分层路由协议^[24]。国内外学者对路由协议已经开展了很多研究, 也取得了一些科研成果。

典型的平面路由协议有 Flooding 算法^[25]、定向扩散算法 (Directed Diffusion, DD)^[26]、谣传路由 (Rumor Routing) 算法^[27]、GEAR (Geographical and Energy Aware Routing) 算法^[28]等。在平面路由协议中, 网络中每个节点地位平等, 传感器节点能通过局部信息来生成路由。平面型路由协议具有简单、鲁棒性好等优点, 但在实际实现和维护中, 平面型路由协议开销随着节点数据的增大而增大, 因此该协议只适合用在规模较小的网络。

较早提出的分层路由算法由 Heinzelman 等人于 2000 年提出^[29]的 LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 算法。算法通过采用节点轮流当选簇头的方法平衡网络能耗, 均衡了网络负载, 延长了网络的生存周期。

针对 LEACH 算法在簇的建立过程中具有随机性并且簇的位置分布不均匀, 导致某些区域簇头比较密集等问题。Heinzelman 等人又在 LEACH 算法的基础上对其进行改进, 提出了 LEACH-C (LEACH-Centralized) 算法^[30]。算法在簇头选举过程中, 先让每个节点将自己的

剩余能量和地理位置发送给基站节点，基站根据最优簇头算法选出合理的簇头。采用这种集中式选簇头的方法额外开销比较大，不适合实际应用。

LEACH 算法成为了研究分簇路由算法的基础。在这之后，研究者提出了不同的分簇路由算法。文献[31]提出了一种基于链的能量有效路由协议，通过与相邻节点通信来降低网络能耗。文献[32]提出了一种被动式响应分簇路由协议，通过阈值的判断来决定是否传输数据。文献[33]针对异构传感器网络中能量异构类型的网络进行了研究，协议考虑了三种不同能量大小的模型，分别对不同能量的节点设置不同大小的加权概率，从而延长网络周期。文献[34,35]是针对不同异构情况下设计的分簇路由协议。

国内对传感器网络路由协议的理论研究也取得了不少成果。

卿利等人在 SEP (Stable Election Protocol) 算法^[36]的基础上针对多级能量异构的场景提出了 DEEC (Distributed Energy-Efficient Clustering) 算法，算法在簇头选举阶段同时考虑了网络的异构性和节点的剩余能量^[37]。

张华良等人在设计传感器网络路由协议时，将环境中采集到的能量考虑到了路由协议的设计中，充分合理的利用节点的能量，实现了网络能耗均衡^[38]。

李明等人以最小化传感器网络的能耗为目标，通过将量子计算加入到和声搜索算法中，增强了算法的优化能力，提出了一种新的分簇路由算法^[39]。

李小亚、黄道平等人研究了能量相同、传输数据大小不同的异构网络和能量、传输数据大小同时异构的情况，提出了 RCR 路由算法^[40]。算法在簇头选举过程中把节点的剩余能量、能量消耗速率两项作为参考量来选择最优簇头。

传感器路由协议研究依旧是个热点研究问题。每一种路由协议都是针对不同的场景设计的，不能采用同一种协议应用在全部的场景中。随着传感器节点具有能量采集功能的深入研究，将原先的路由协议搬过来用并不是很好的选择，所以要重新设计新的路由协议。同时由于环境的复杂性，同构传感器网络有时可能无法满足实际应用的需求，采用异构传感器网络可能更有实用价值，所以对研究异构传感器网络路由协议也有着非常现实的意义。

1.5 论文工作和结构安排

本文重点研究异构传感器网络分簇路由算法，基于二级能量异构的传感器网络提出了新的路由协议。论文主要分为五个部分，具体文章结构安排如下：

第一章：绪论。首先介绍了课题研究的背景和意义，再详细介绍了能量采集技术、无线传感器网络相关概念和国内外的研究动态，最后给出了本论文的工作内容和结构安排。

第二章：无线传感器网络分簇路由算法的相关概念。本章首先对分簇路由协议的设计目标、关键技术以及性能评价指标等相关概念进行了简要的介绍，再将已有的分簇路由算法根据传感器网络类型分成两类：同构传感器网络分簇路由算法和异构传感器网络分簇路由算法，并分别对两类分簇路由算法中几种典型的分簇路由协议进行了简要的介绍，最后根据路由协议的特点，对几种典型的路由协议性能进行了分析对比。

第三章：具有能量补给的异构传感器网络分簇路由算法。首先对SEP算法进行了介绍，接着分析了SEP算法的不足，针对SEP算法的不足提出修改意见，最终提出了EH-SEP算法。仿真结果显示，修改后的EH-SEP算法适用于具有能量采集的无线传感器网络，并且相比于LEACH算法、SEP算法，在性能上、网络的生存周期上和网络的吞吐量上都有了较大的提高。

第四章：基于压缩感知的异构传感器网络分簇路由算法。压缩感知可以利用少量信息对原信息进行重构，降低了网络中信息传递量。结合压缩感知和分簇路由技术，本文提出了一种基于压缩感知的异构传感器分簇路算法SEP_CS。算法设计以降低能耗、延长网络稳定工作周期为目标。仿真结果显示，基于压缩感知的分簇路由算法有效的降低了网络的能耗，延长了网络稳定工作的周期，并且数据重构效果也比较理想。

第五章：总结和展望。首先对本论文进行了总结，对相关工作进行了概述。其次根据研究过程中发现的不足，给出了下一步所要研究的工作重点。

第 2 章 无线传感器网络分簇路由协议

2.1 引言

路由机制是传感器网络的关键技术之一^[41]。路由协议主要负责寻找最优路径将源节点采集到的数据在网络中进行转发，最终将数据传送到目的节点。由于网络中的传感器节点部署的量较大，并且受能量、存储能力的限制，所设计的传感器路由协议的目标应该是能量高效、具有计算简单、快速形成可靠路由和具有较好的扩展性。

层次型路由相比于平面路由有更多的优点，如较高的扩展性、路由选择简单、能耗低等。层次型路由协议又可称为分簇路由协议，采用分簇路由协议的传感器网络被分成了若干个簇，每一个簇又包含若干个普通节点。在一个分簇网络中，簇头负责采集数据和转发簇内或其它簇头发送来的数据，簇内节点只负责数据的采集。经典的分簇路由协议有 LEACH 算法，PEGASIS 算法、TEEN 算法、HEED 算法等。图 2.1 为分簇路由协议基本网络模型。

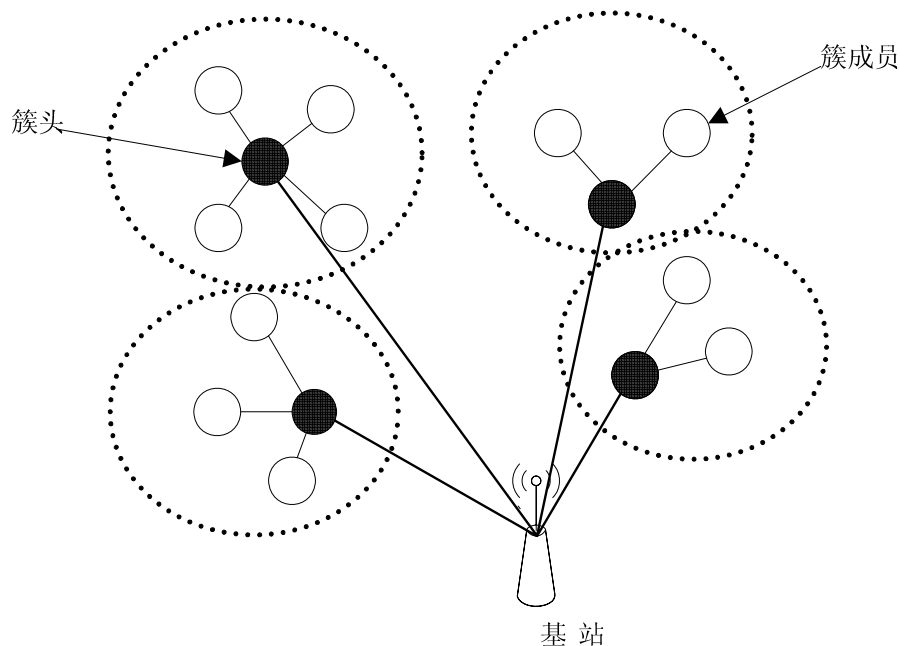


图 2.1 分簇路由协议基本网络模型

2.2 分簇路由算法的相关概念

2.2.1 分簇路由协议的设计目标

传统网络中的节点通常都是有着较强功能的设备，其计算能力、储存能力和通信能力都要比传感器网络节点强很多，所在设计路由协议时的限制也小很多。传感器网络由于受能量、计算、通信等限制，不可能承载大量计算的路由协议，所在设计传感器路由协议时要考虑以下几个方面：

（1）数据产生方式

无线传感器网络中数据产生的方式有三种，有事件驱动型、时间驱动型和查询驱动型。由突发事件引起的簇节点结构的变化属于事件驱动型。时间驱动型的无线传感器网络对事件进行周期性监测，网络初始化后，网络中的簇节点结构就很少改变。只有当网络能耗出现不均衡的时候，才会进行新一轮的分簇。在网络运行阶段，只有当某个事件发生了才会启动分簇路由，其它时间，全网都处于休眠的状态，这样可以减少能耗。查询驱动是指当观察者对某个事件感兴趣的时候，才会引起网络中新一轮的分簇和产生新的路由。

（2）节点部署的方式

在无线传感器网络中，节点的部署方式通常分为两类，即确定性部署和随机部署。在确定性部署的网络中数据沿着预先设计好的方向传输即可。随机部署的网络中则需要网络中的节点自组织地建立起通信网络，根据邻结点或基站提供的信息，将数据以多跳或单跳的方式传输给汇聚节点。

（3）以数据为中心

无线传感器网络是由于能量受限、内存受限、资源受限等限制条件，使得无线传感器网络在提供服务时要有侧重点。无线传感器网络最主要的目的就是获得监测区域内对象的信息，这就要使得无线传感器网络以数据为中心。网络中消息通常是从多个传感器节点通过多跳的方式传输到汇集节点，所以在设计路由的时候就要考虑到以数据为中心。

（4）网络的拓扑变化

比较常见的网络拓扑有三维网络、线性网络和带状网络等。导致网络拓扑的变化的因素很多，比如网络中有新的节点加入、死亡节点产生或有节点移动的时候，这种因素都会引起网络中新一轮的分簇和产生新的路由。

（5）可扩展和鲁棒性

分簇路由协议在设计的过程中还要考虑网络的可扩展性，主要表现在网络中节点的数目、覆盖的面积、网络整体的寿命等。除此之外还要考虑网络的鲁棒性，当网络中节点失效、拓扑变化的时候，路由算法还能够正常的工作。

（6）应用相关

所设计的无线传感器网络是针对特定应用场合的网络，当前并没有统一和标准的协议栈可以应用到所有的场景。针对不同的场景，在设计不同协议的时候都有不同的偏重，同样在设计分簇路由协议的时候也要根据具体的应用场合设计。

2.2.2 分簇路由协议关键技术

分簇路由算法通常分为两个阶段，分别是分簇阶段和数据传输阶段。分簇有两种方法：1) 先运行簇头选举算法，选出网络中符合条件的簇头，再根据所选出的簇头来将网络分成不同大小的簇，如 LEACH 算法、HEED 算法等；2) 先运行网络分簇算法，将整个网络分成均匀或不均匀的簇，再根据簇头选择机制在簇内选出适合的簇头，如 PEGASIS 算法、TEEN 算法

等。在数据传输阶段，簇内节点先将采集到的数据在自己所在的时隙里将数据包传给簇头节点，簇头节点接收到全部簇内节点传输的数据后，采用数据融合技术处理数据，再通过单跳或多跳的方式将数据包发送给汇聚节点。分簇路由协议的设计有三种关键技术，分别是分簇技术、簇首选择技术和数据传输技术^[42]。下面对其进行分别讨论：

1. 分簇算法

(1) 基于密度信息分簇算法

在密集型分布的网络中，采用了根据节点密度成簇的方法。这样生成的簇虽然在网络中呈现的是分布不均匀，但通过这种方式有效的降低了簇内节点的通信距离，同时还避免了网络中孤立节点的出现。文献[43]就是采用了基站集中控制的方法，将整个网络区域内以邻节点最多的成为中心，在这个中心内以一定的半径成簇，网络区域内未成簇的节点按照上面的步骤进行循环，直到至少 80% 的节点成簇后，整个网络成簇完成。

(2) 基于地理信息分簇算法

在传感器网络中，传感器节点可以接收到基站或其它节点发来的信息，节点可以根据这些信息广播的时间、接收功率的大小和所传输的信息来判断自己的位置，再根据所判断出来的位置进行簇的划分。如图 2.2 是一种非均匀分簇模型。文献[44]在设计路由算法时，考虑到汇集节点周围的簇头消耗能量很快，为了均衡网络的能耗，算法基于节点的地理位置信息，将网络分成了不同大小的簇。靠近汇聚节点簇的规模会变的越来越小，降低了汇集节点周围簇头能耗的速率，从而达到平衡网络中簇头能耗。

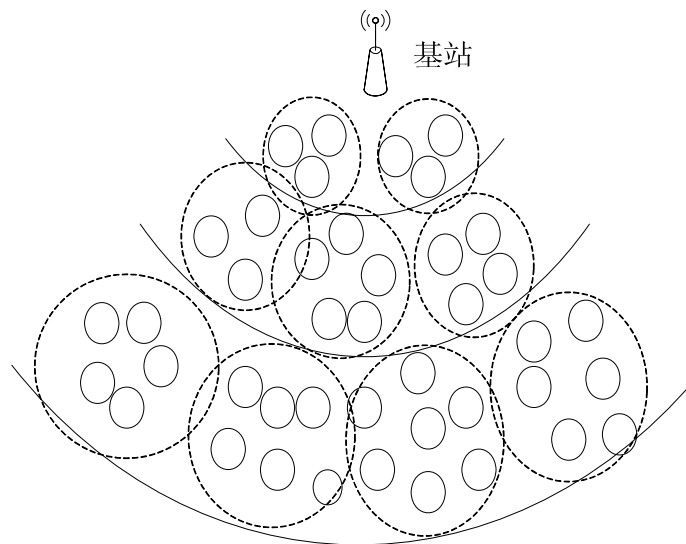


图 2.2 非均匀分簇

(3) 按需分簇算法

在一个分簇网络中，簇头数过多或过少都会影响网络整体的性能，所以在设计簇头个数时可以根据设计的要求来设计簇头的个数，这样可以避免不必要簇头的产生。文献[45]就是针对事件驱动型网络设计在，当所监测的区域有事件发生时就产生簇头，簇的大小还可以根据事件的大小变化而变化。

2. 簇首选择

簇首选举是分簇路由算法中最主要的思想，相比于平面路由，分簇路由通过选举簇头来降低节点间通信距离，减小了网络的通信开销和节点能量的消耗。簇首选举主要有三种选举策略，基于基站选举、基于投票选举和基于竞争选举。下面对其分别进行简要的介绍。

（1）基于基站选举

网络中的节点将自己的剩余能量和位置信息发送给基站，基站再综合考虑节点在拓扑中的位置、节点的剩余能量以及节点与相邻节点的传输距离等各种因素来选取簇首。

（2）基于投票选举

基于投票选举的方法是簇首是由相邻节点通过投票的方式选出来的。节点根据相邻节点的距离以及相邻节点剩余的能量作为评价机制，向符合要求的邻节点投上一票，得票最多的节点被选为簇头。文献[46]就是采用投票选举的方式，在投票的过程中不但考虑了节点剩余的能量而且还考虑了邻居节点的数目，节点的剩余能量越高被选为簇头的概率就越大。同时，在投票选举的过程中考虑到了边缘节点的情况，由于边缘节点的邻节点相对较少，即使节点的剩余能量很高，边缘节点得票的概率也不是很大，这样就可以降低边缘节点成为簇首的可能性。

（3）基于竞争选举

基于竞争选举的意思是在网络中节点相互竞争。每个节点都根据自己的剩余能量和到相邻节点的距离计算自己的评价值，将计算出来的评价值发给相邻节点，跟相邻节点比谁的值更高，比值高的则成为簇首的概率大。

3. 数据传输

分簇路由算法中，数据传输有两种实现方式：簇内通信和簇间通信。下面对其进行简要介绍。

（1）簇内通信方式

1) 直接通信方式。簇内节点将采集到的数据直接发送给簇首。

2) 簇内多跳方式。当网络中簇的规模比较大的时候或者网络动态变化的时候，为了降低簇内的平均能耗，可以采用簇内多跳的方式。

（2）簇间通信方式

簇间路由按路径数可分为单路径传输和多路径传输方式。按实现的目标可以分为：跳数最小路由、开销最小路由和介于两者之间的路由。

1) 多跳单路径通信方式

多跳单路径的通信方式主要有三种设计方式：分别是路由最小的通信路径，这种方式有效的降低了数据传输的时延；以最小开销为目标的通信路径，让每一轮传输数据的消耗最小；在两者之间取平衡，针对所设计的应用场景来权衡。

2) 多跳多路径传输方式

采用多条多路径的传输方式，可以有效的避免因为单路径失效而导致的链路不通，增大

数据传输延迟。多路径传输的能量消耗更加的均衡，降低了数据的传输时延，同时还保证了能够找到最优的传输路径。在大规模网络中采用多跳多路径传输方式可以让算法的收敛速率更快、数据传输更加可靠以及更低的丢包率。

2.2.3 分簇路由协议的性能评价指标

随着无线传感器网络关键技术的深入研究，分簇路由协议也在前人的基础上进行了许多改进，提出了一些新的、更高效的分簇路由算法。每种分簇算法都是针对特定的场景所设计的，衡量一个分簇算法的好坏也有一些性能指标，如网络中簇头的个数是否合理、生成的分簇结构是否均匀等。为了更好的评价分簇算法的性能，参考如下的性能指标：

1) 簇的重叠度：簇的重叠度指的是网络中被簇覆盖的节点数之和与网络中所有节点的数量之比^[47]。网络中簇头不单要负责簇内节点数据的转发任务，还要维护簇间路由的转发任务，要使得簇头能够具备处理这种负载的能力，就要求负载尽可能的均衡。

2) 簇头的个数：在分簇结构的网络当中，簇头的个数是首先要考虑的问题，当网络中簇头的个数太多或太少的时候，对网络的整体性能都有较大的影响。为了让网络的性能最优，要设计合理的簇头数量，同时也可以减少不必要的开销。

3) 重构的频率：簇头重新选择组织需要比较大的计算量和通信开销，在单位时间内簇头更新的频率越快，网络中能耗消耗的也就越大，会直接影响整个网络的性能。所以在设计分簇路由协议时，一般稳定数据传输阶段要长于簇头的建立阶段，以保证网络的性能较好。

4) 网络负责平衡因子 (LBF)：LBF 的定义为的簇内成员节点（不包括簇头结点）数目平方的倒数^[48]，计算式子如式 (2.1) 所示：

$$LBF = \frac{n_c}{\sum_{i=1}^{n_c} (x_i - \mu)} \quad (2.1)$$

式 (2.1) 中 x_i 是簇头 i 的簇内节点数， n_c 是网络内簇头的数量， $\mu = (N - n_c) / n_c$ 代表网络内每个簇头的平均的簇内节点个数。从式 (2.1) 中可以看出随着 LBF 的比值越来越大，网络中的负载均衡度也越来越好^[49]。

5) 网络中节点当簇头的公平指数 HFI：公平指数 HFI 指的是节点担任簇头前后时间上的偏差^[50]，由式 (2.2) 给出：

$$HFI = \{|t_i - E(t_i)|\} \quad (2.2)$$

式 (2.2) 中 t_i 指的是节点成为簇头的时间， $E(t_i)$ 指的是节点成为簇头的平均时间，HFI 是衡量节点 i 在网络中担任簇头的公平指数。HFI 的值越小说明簇头节点的公平性越好，当满足条件 $t_i = E(t_i)$ ，此时 HFI 的值为 0，那么说明网络中的能耗均衡地分担到各个节点上，此时的网络整体性能比较好，网络的生存周期也比较长。

分簇路由算法的性能指标只是针对大部分算法的一个评价指标，很多时候分簇路由算法是根据特定的应用场景设计的，所以在评价一个路由算法好坏的时候要结合应用场景来对其

进行合理的评价。

2.3 同构传感器网络分簇算法介绍

同构传感器网络指的是网络中节点类型都相同，如初始能量、通信能力或节点计算能力相同等。LEACH路由协议就是针对能量同构传感器网络设计的一种路由算法。LEACH算法是较早提出的分簇路由算法，它是无线传感器网络中经典的分簇算法之一。很多典型算法都是基于它而改进的，如LEACH-C算法、PEGASIS算法、HEED算法等。为了更好的理解分簇路由算法的思想，下面先对LEACH算法进行分析。

2.3.1 LEACH 算法

LEACH 算法是一种较经典的分簇路由算法。在 LEACH 算法中引入了轮（round）的概念，通过周期性选举让网络中的节点轮流担任簇头，平衡网络能耗。在 LEACH 算法中每一轮分为两个阶段：第一阶段为簇的建立阶段，簇的建立分两步完成：先进行簇头选举，再形成完整的簇；第二阶段为稳定数据传输阶段，通常稳定数据传输的时间要大于簇建立的时间。图 2.3 为 LEACH 算法的执行过程。LEACH 算法采用周期性执行方式，每一轮执行过程中都将整个网络分成若干个簇，簇内节点将采集到的数据传输给簇头，簇头经过数据融合技术再将数据传输给汇集节点。周期性的簇头选举使得每个节点都有担当簇头的机会，并且机会均等。通过轮流担任簇头，避免了某些节点能量消耗过快，达到均衡消耗网络能量的目的，延长了网络的生存时间。

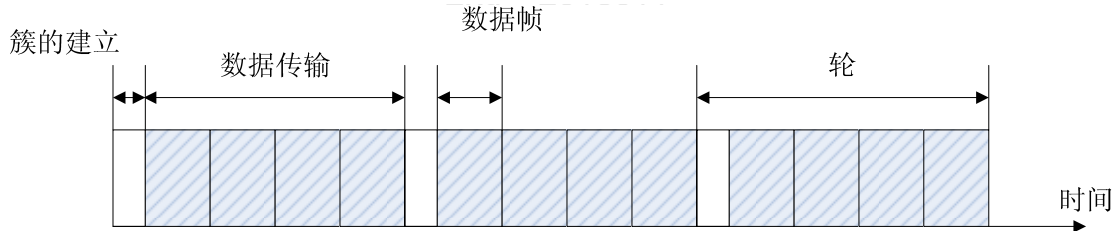


图 2.3 LEACH 算法执行过程

2.3.1.1 簇的建立阶段

(1) 簇头选举

在簇头选举阶段采用的是簇头选举机制来选出适合的簇头。网络中的节点 i 随机生成一个值为 0-1 的随机数，将产生的随机数与计算出的阈值 $T(i)$ 进行比较， $T(i)$ 定义如式 (2.3) 所示。如果节点 i 产生的随机数小于阈值，那么该节点成为本轮的簇头，接着向全网发布一条自己成为簇头的消息。当选过簇头的节点下一轮将不再当选，如果某轮网络中的全部节点都当选过，那么下一轮每个节点又都有成为簇头的机会。当网络中只有一个节点的时候，这个节点一定被选为簇头节点。

$$T(i) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times [r \bmod (1/P)]}, & i \in G \\ 0, & i \notin G \end{cases} \quad (2.3)$$

式 (2.3) 中 P 为总的簇头数占总的节点数的百分比, $r \bmod (1/P)$ 代表这一轮循环中当选过簇头的节点个数, \bmod 为取模符号, r 为当前的轮数, G 为当前循环中未当选过簇头节点的集合

从公式中可以看出, 网络中通过轮流的担任簇头平衡了网络的能耗。每经过 $1/P$ 轮, 所有节点都有一次成为簇头的机会。在随后的一轮, 全部节点都成为了符合簇头选举的条件。

(2) 簇的形成

当簇头确定自己是本轮产生的簇头后, 立即向全网广播一条公告信息 (Advertisement Message, ADV) 告诉其它节点自己成为了簇头。ADV 是一条短信消息, 内容包含发送节点的 ID 和一个分组头。非簇头节点根据簇头广播的信息的强度来判定自己与簇头的距离, 从中选出一个离自己最近的簇头作为自己本轮的簇首。每个节点确定了自己的簇首之后, 向簇首发送一条请求加入的信息 (Joint-REQ)。请求信息也是一个短信消息, 内容包含了入簇节点的 ID 和其归簇簇首的 ID。因为在 LEACH 协议中, 簇头就是一个簇内的控制中心, 协调簇内的数据的传输。簇首根据接收到入簇成员的数目, 建立起 TDMA 传输时间的安排, 再将安排的传输时间发给每一个簇内成员, 这样可以保证簇内成员在传输数据的时候不会发生碰撞。如果簇内节点在自己的时间片内没有发送数据, 那么该节点可以转为休眠状态, 从而达到降低节点能耗。所有的节点接收到簇头发送的数据传输安排后, 这时就完成了簇的建立。具体的簇的建立流程如图 2.4 所示。

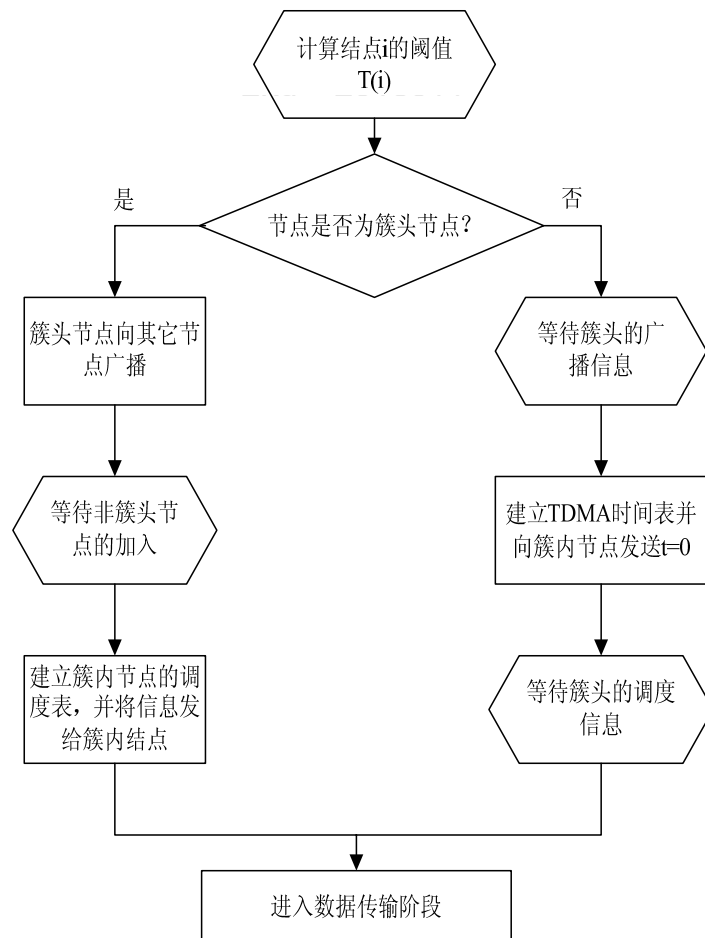


图 2.4 簇的建立阶段

2.3.1.2 数据传输阶段

在完成簇的建立后,簇头采用了 TDMA 的思想,给每个簇内成员安排了不同的传输时隙,簇内成员在安排到自己的发送时隙里将采集到的数据发送给簇头。在一个时隙内每个簇成员最多只能发送一组数据,非时隙的成员转化为休眠模式。簇头在接收数据后,对接收到的数据进行数据融合处理,再将融合后的数据通过单跳的方式发送给汇聚节点。等这一轮数据传输结束后,网络将进行下一轮的簇的建立,再进行新一轮的数据传输。LEACH 协议数据传输流程图如图 2.5 所示。

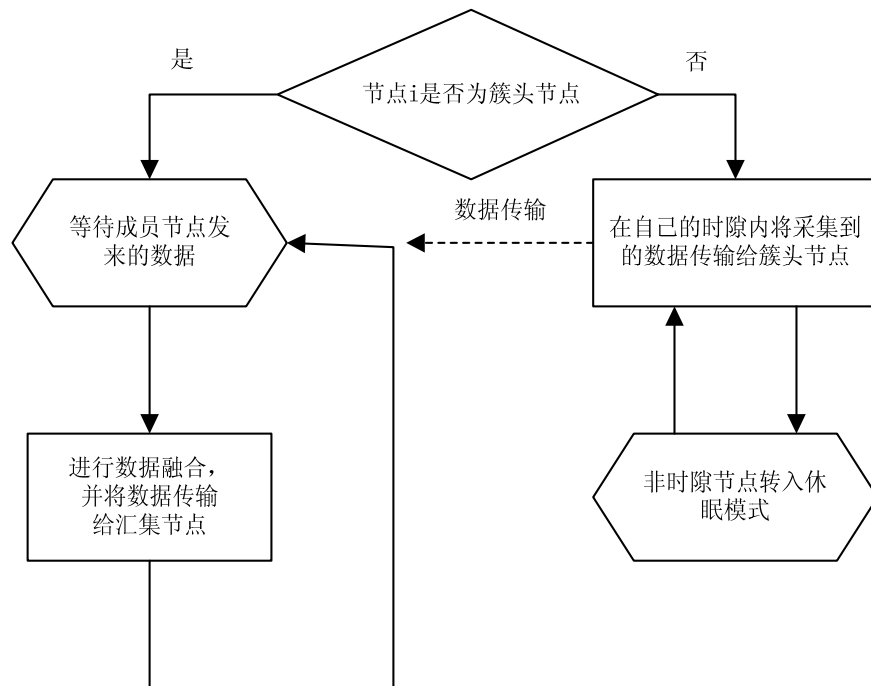


图 2.5 数据传输阶段

2.3.1.3 LEACH 算法的优缺点

相比于平面路由协议, LEACH 算法采了分簇的思路,在降低功耗上有了很大的提升。与其它路由相比, LEACH 算法有很多优点:

1) LEACH 算法采用了分簇的思想,将大部分数据的传输在簇内实现,使得节点与簇头实现了近距离的通信,降低了节点传输数据的能耗。

2) 簇头采用了数据融合的技术,使得整个网络的数据通信量有所降低,从而达到降低网络节点的能耗的效果。

3) 数据传输阶段,网络采用了 TDMA 时间片轮流的数据传输方式,避免了节点在数据传输过程中发生碰撞。并且让非时隙节点在数据传输阶段转为休眠内模式,节省了节点能量。

4) LEAHC 算法采用的是分布式算法,节点通信是通过簇头来控制的,并不需要全网的信息,实现起来相对简单,网络开销也比较小,整个网络也拥有更好的扩展性。网络内添加新的节点或有节点死亡,对算法协议影响不大。

5) 采用周期性担任簇头的方式, 实现了整个网络能量的均衡消耗, 使得网络的生存周期得以延长。

LEACH 协议相比于平面路由协议在网络的性能上提高了不少, 但也存在着一些不足:

1) LEACH 算法选出来的簇头分布不均匀, 可能出现某些区域簇头比较密集, 某些区域簇头比较稀疏, 使得某些节点在选择簇头阶段加入了距离比较远的簇, 有可能增加了不必要的通信能耗。

2) LEACH 算法假定的是节点是同构的, 而对于复杂的现实环境, 可能需要不同种类型的节点相互协作工作, 无线传感器网络采用 LEACH 算法并不是非常适合。

3) 簇内通信是通过单跳的方式进行通信的, 如果整个网络特别的大, 节点与节点之间的距离也比较远, 那么 LEACH 算法并不适合, 所以 LEACH 算法适合规模比较小的网络。

4) 簇头与汇聚节点也是通过单跳的方式进行数据通信, 这使得离汇聚节点比较远的簇头, 能量消耗会比较大, 死亡的速度也比较快, 对整个网络的稳定数据通信有较大的影响。

2.3.2 LEACH 改进算法

2.3.2.1 LEACH-C 算法

LEACH-C 是在 LEACH 算法上进行改进的一种算法^[30]。由于 LEACH 算法在簇头建立的阶段可能出现簇头分布不均匀, 并且在簇头选举的过程中并没有考虑节点的剩余能量的问题, 只是周期性的选举, 可能在簇头选举时选出能量比较低的节点, 从而导致网络过早死亡。基于这两个点的不足, LEACH-C 通过中心控制算法综合考虑节点的剩余能量和节点的当前的位置来选择出最优的簇头, 并且尽可能的使得簇头在空间中能够均匀分布。

在 LEACH-C 协议簇头的建立阶段, 每个节点都要将自己的能量信息和位置信息直接发送给基站节点。基站首先计算整个网络的平均能量, 再取消低于平均能量的节点被选为簇头的资格。同时采用了退火算法和簇平衡原理来决定谁成为簇头。通过基站来规划簇头可以完全考虑每个传感器的能量, 降低了节点过早死亡的可能性, 并且考虑到了簇头的地理位置使得簇头的分布不会那么的集中。但是整个网络在分簇的过程中过分的依赖于基站, 增加了成簇的开销, 并且对于大规模的传感器网络每次分簇都要对所有节点的信息进行处理并不是很实际。LEACH-C 在数据传输阶段与 LEACH 算法是相同的。

2.3.2.2 PEGASIS 算法

PEGASIS 算法是一种传感器网络能量有效的聚集路由协议, 它是一种近于最优基于链的路由协议^[31]。与 LEACH 协议不同的是 PEGASIS 协议中采用的是节点近距离通信方式, 并且在每一轮簇头选举中只选出一个与基站进行通信的首领节点, 从而降低了每一轮网络运行的总体能耗。

在 PEGASIS 协议中假设所有的节点都是静止的, 并且每一个节点都包含整个网络的拓扑结构信息。在簇头选举过程中采用的是与 LEACH 协议相似的动态选举方法, 采用贪婪算法建立一条包含网络中所有节点的链路, 让网络中的每个节点跟它距离近的节点进行通信。在

数据传输阶段，每个节点从链的两头开始传输数据，每轮都进行一次簇头的更换。数据采集节点将自己采集到的数据发送给离自己最近的相邻节点，相邻节点对数据进行数据融合处理后，将转发给邻结点，最后几条链路的数据在簇头节点汇合。簇头节点再与自身的数据进行融合，最终发送给基站。具体链路如图 2.6 所示（图 C_1 为簇头节点），在图中可以看出，节点 S_1 、 S_4 分别将采集到的数据传输到邻节点 S_2 、 S_3 ，节点 S_2 、 S_3 通过数据融合后再将数据发送给簇头节点 C_1 ，簇头节点 C_1 最终将数据传输给基站。

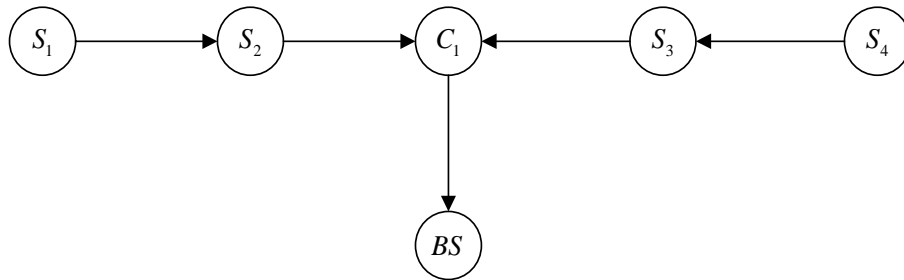


图 2.6 数据传输路径

PEGASIS 协议算法采用的是与邻节点的通信的方式，相比与 LEACH 减小了通信距离。仿真结果表明，PEGASIS 的生存时长是 LEACH 的 2 倍，但该算法的不足就是网络中的每个节点都要知道其它节点的信息，对全局信息要求比较高，增加了额外的资源消耗，该算法并不适用于全局信息难以获得的场景。

2.3.2.3 TEEN 算法

TEEN 协议算法是在 LEACH 算法基础上发展来的，它们采用了不同的数据响应方式^[32]。TEEN 在网络结构上采用了与 LEACH 类似的网络结构，但在响应方式上 LEACH 协议属于主动型路由协议，而 TEEN 协议则是被动型路由协议。

在 TEEN 协议中，它规定了两个阈值：（a）硬阈值：当网络中的节点采集到的数据大于硬阈值的时候，节点才会向簇头发送数据；（b）软阈值：在网络中，节点将再次收集到的数据跟上次所发送的数据进行比较，如果数据的变化值大于软阈值的时候，才会发送新的数据给簇头，不然不发送数据。

TEEN 协议的执行过程如下：当网络中的节点首次采集到数据时，将采集到的数据与硬阈值进行对比，如果大于硬阈值，则将数据发送到基站，同时会保存一份数据用作下一轮数据的参考量。当节点重新采集数据后，如果采集到的数据与上一轮的作参考的数据相比变化量大于软阈值并且数据高于硬阈值，那么传感器节点才会发送采集到的数据，否则不发送。硬阈值的大小是根据用户需求所设计的，这样对设计的网络更有针对性，避免了不必要资源的浪费。软阈值使得变化小的数据不发送，这种方法降低了不必要的能耗，降低了冗余数据量，但对数据的精确性有一定影响。软阈值设计的越小，用户接收到的数据就越精确，同时带来的能耗也会越大，所以在采用 TEEN 协议时，要根据具体的应用场景进行设计。

与 LEACH 算法相比，传感器网络在生存周期上有了提高，但也存在着一些不足：

(1) TEEN 采用的是与 LEACH 协议一样的数据传输机制。在数据传输时，如果节点采集到的数据达不到两个阈值，那么采集到的数据将不会被发送，这样就会浪费簇头给它分配的数据传输时隙，增大了数据传输时延。

(2) TEEN 协议没有可以判断节点处于活动还是死亡的机制，只是按照协议设定的阈值来判定节点要不要传输数据，这样可能会造成网络不能及时的发现网络中死亡的节点，从而造成重要数据的丢失。

2.4 异构传感器网络分簇算法介绍

根据传感器节点传输能力的大小、采集数据的类型、初始能量的不同、计算能力的不同等特点，可以将传感器分成不同的种类。同构传感器网络分簇路由算法设计是由相同类型的节点构成的，而在实际现实当中，由于环境的复杂性，要求不同类型的传感器结构能够协作通信才能收集到最真实的环境情况，所以对于异构网络的研究显得非常重要，因此研究异构传感器网络也显得非常有意义。下面针对已有的几种异构分簇路由算法进行简要的介绍。

2.4.1 DEEC 算法

卿利等人在 SEP 算法的基础上提出了 DEEC (Distributed Energy Efficient Clustering) 算法，将两级能量异构网络模型扩展到了普遍性的多级能量异构网络模型^[37]。DEEC 的基本思想：假设在一个正方形的区域内均匀的散布 N 个传感器节点，网络中的节点总有数据发送到基站。在簇的建立阶段，算法在簇头选举过程中充分考虑了节点刚开始的能量和节点本轮剩余能量占网络平均节点能量的百分比。这样增大了能量高的节点成为簇头的概率，从而可以使得网络均衡的消耗能量，延长网络的生存周期，特别是网络稳定期，除此这外 DEEC 算法更符合某些实际场合的应用。

DEEC 算法在每轮中每个节点的簇头加权选择概率如式 (2.4) 所示：

$$P_i = P_{opt} \frac{E_i(r)}{\bar{E}(r)} \quad (2.4)$$

式 (2.4) 中 P_i 为节点 i 的簇头加权选择概率， P_{opt} 为网络中最优簇头概率，也就是网络性能最好时簇头数占总节点数的比例， $E_i(r)$ 为节点 i 在第 r 轮时的剩余能量， $\bar{E}(r)$ 为网络运行到第 r 轮时整个网络的平均剩余能量。

2.4.3 RCR 算法

RCR (Reliable Clustering Routing) 可靠路由协议是针对多级能量异构无线传感器网络提出的一种分簇路由协议^[40]。在 RCR 算法选举簇头的过程中，考虑了选举簇头的剩余能量。在网络中每个节点采用构建邻节点剩余能量的机制来优化数据传输路由，从而达到均衡无线传感器网络的能耗，延长网络的生存周期。协议中还采用了多簇头的方法，让网络中的每个簇都包含多个簇头节点，让多个簇头节点共同承担网络中数据转发的任务。当簇中只有一个簇头时因节点失效而导致的节点能量损失，采用簇中多簇头的方法有效的避免了无数据传输的

发生，并且改善了网络能量的使用效率。从文献给出的实验数据可以看出，与 LEAHC 算法和 HEED 算法相比，RCR 协议网络生存寿命更长，能量的使用效率也更高，数据传输性也更好，在总的性能上也更优于 LEACH 协议和 HEED 协议。

2.4.2 PSCD 算法

PSCD (the Potential of Serving as a Cluster-head Device) 算法是一种固定簇头分簇路由分簇算法，在网络中将具有比较多初始能量和数据传输能力的节点自动设置为簇头，其它节点根据分簇机制加入到不同的簇中。在 PSCD 算法中定义了全功能设备 (FFDs) 和精简设备 (RFDs) 两种不同类型的网络。算法中由 FFDs 来担任簇头节点，为了提高网络的生命周期、网络吞吐量和均衡网络的能量消耗，在算法中考虑了 FFDs 的剩余能量和能量的消耗速率，从而达到设计的要求。但这种簇头选择机制并没有考虑到实际应用中的节点配置问题，从而导致算法不太适用于实际应用。

2.5 各种算法性能比较

上面只提到了几种比较典型的无线传感器网络分簇路由算法，为了更好的对其了解，下面对上述路由协议以及一些未提到的路由协议的特点进行对比。表 2.1 为无线传感器网络各种分簇路由协议性能对比。

表 2.1 各种路由协议性能对比

分簇路由算法	网络模型	能量有效策略	健壮性	可扩展性	节能性
LEACH	相同初始能量同构网络模型	周期性簇头选举	一般	好	一般
LEACH-C	相同初始能量同构网络模型	基于位置信息和剩余能量	一般	一般	较好
PEGASIS	相同初始能量同构网络模型	与相邻节点通信	较差	无	较好
TEEN	相同初始能量同构网络模型	软、硬阈值对比	一般	好	较好
SEP	两级能量异构网络模型	考虑节点的初始能量	好	好	一般
DEEC	多级能量异构网络模型	考虑初始能量和剩余能量	好	好	较好
RCR	多级能量异构网络模型	引入剩余能量预测和多簇头	强	好	好
PSCD	两级计算能力异构网络模型	剩余能量和能量消耗速率	一般	一般	较好
CC	两种异构节点网络模型	引入睡眠机制和多跳机制	好	较好	好

2.6 本章小结

本章首先对分簇路由协议的设计目标、关键技术以及性能评价指标等相关概念进行了简要的介绍，再将已有的分簇路由算法根据传感器网络内节点的类型分成两类：同构传感器网络分簇路由算法和异构传感器网络分簇路由算法。分别对两类分簇路由算法中几种典型的分簇路由协议进行了简要的介绍。最后根据路由协议的特点，对几种典型的路由协议进行了分析对比。

第3章 具有能量补给的异构传感器网络分簇路由算法

路由协议是无线传感器网络中有效利用节点能量、寻找节点间最优路径的一种关键技术。SEP 算法作为异构传感器网络中一种有效的路由协议，相比于同构网络中 LEACH 算法极大的延长了网络的生命周期以及推迟了第一个节点死亡的时间。本章针对 SEP 算法中一些不足之处，对算法进行了一些修改，提出了一种具有能量补给的异构传感器网络分簇路由算法 EH-SEP。该算法在簇头选举阶段不但考虑了节点的剩余能量，还考虑了补给的能量。在数据传输阶段算法采用了簇间多跳的传输方式。从仿真的结果显示，相对于 SEP 算法、LEACH 算法，EH-SEP 算法有效利用了节点采集的能量，延长了网络的生存周期。

3.1 引言

无线传感器网络可以采集网络所覆盖区域内的所监测对象的信息，将感知到的数据经过处理，通过节点间协作将数据发送给观察者^[2]。无线传感器网络通常工作在比较恶劣的环境下，由于其携带电池能量有限，更换代价高，因此无法满足网络长时间工作的要求，电池能量的大小成为限制 WSN 性能和生命周期的关键因素之一。随着能量采集技术的发展，具有能量补给功能的传感器节点成为了研究热点^[51]。能量采集无线传感器节点可以利用环境能量收集技术来采集节点周围的能量，如太阳能、风能、振动能等，将这些能量转化成电能存储在电池或电容中，以供传感器节点使用^[10]。

分簇路由协议是降低无线传感器网络能耗的关键技术之一，按拓扑结构可分为分簇路由协议和平面路由协议，分簇路由协议相比于平面路由协议有更好的节能性和扩展性^[24]。现有的分簇路由协议可以根据网络类型分为两类：（1）网构传感器网络分簇路由协议，如 LEACH 算法^[29]、LEACH_C 算法^[30]、PEGASIS 算法^[31]等。（2）异构传感器网络分簇路由协议，如 HEED 算法^[52]、DEEC 算法^[37]等。这些路由算法虽然较好地满足了 WSN 的设计要求，但只是针对电池供电情况下的传感器网络所设计，并没有考虑到节点的能量补给问题。本文针对能量异构网络中 SEP（Stable Election Protocol）算法^[36]中一些不足之处进行了一些修改。在设计路由协议的过程中考虑了节点能量采集的情况，提出了一种具有能量补给的稳定路由选择协议(Energy-harvesting stable election protocol, EH-SEP)算法。与 SEP 算法不同的是 EH-SEP 算法在簇头选举阶段将节点的采集能量也考虑到了协议当中，在数据传输阶段，采用了簇间多跳的传输方式，有效的平衡了网络能量的消耗。

3.2 SEP 算法

SEP 算法是较早提出的基于能量异构网络的分簇路由算法^[53]。在网络中存在两种不同初始能量类型的传感器节点，高级节点和普通节点，高级节点的初始能量要高于普通节点的初始能量。SEP 算法主要思想是将两种能量不同的节点分别设置不同的簇头选举门限，增大高

级节点成为簇头的概率，从而延长网络稳定工作的周期^[54]。下面对 SEP 算法进行简要的介绍。

假设网络中总节点数为 N ，其中高级节点占总结点的比例为 m ，普通节点的初始能量为 E_s ，高级节点初始能量为普通节点的 $(1+\alpha)$ 倍，那么异构网络的总初始能量为：

$$E = N(1-m)E_s + NmE_s(\alpha+1) = NE_s(1+\alpha m) \quad (3.1)$$

从式 (3.1) 中可以看出，异构网络的总能量是同构网络总能量的 $(1+\alpha m)$ 倍。

在 SEP 算法中，将高级节点和普通节点加权选举的概率分别设为 P_a 和 P_n ，具体定义如下：

$$P_a = \frac{(1+\alpha)}{1+\alpha m} P \quad (3.2)$$

$$P_n = \frac{1}{1+\alpha m} P \quad (3.3)$$

$$P_a = (1+\alpha)P_n \quad (3.4)$$

式 (3.2)，(3.3)，(3.4) 中 P 为网络中总的簇头节点个数占总结点数的百分比、 α 、 m 的定义同上。

P_a 和 P_n 的关系满足 $m*P_a + (1-m)*P_n = P$ ，这样使得每轮选出的平均簇头数基本不变。可以得到高级节点和普通节点的阈值分别为 $T_a(i)$ 和 $T_n(i)$ ：

$$T_a(i) = \begin{cases} \frac{P_a}{1 - P_a \times [r \bmod (1/P_a)]} & , i \in G_a \\ 0 & , i \notin G_a \end{cases} \quad (3.5)$$

$$T_n(i) = \begin{cases} \frac{P_n}{1 - P_n \times [r \bmod (1/P_n)]} & , i \in G_n \\ 0 & , i \notin G_n \end{cases} \quad (3.6)$$

式 (3.5)、(3.6) 中 P_a 和 P_n 分别为高级节点和普通节点的加权选举概率， r 为当前轮数， G_a 和 G_n 分别为当前循环在最后的 $1/P_a$ 、 $1/P_n$ 回合中还没成为簇首节点的高级节点、普通节点的集合。

采用上述阈值加权后，在保证所选出来的平均簇头数不变的情况下，高级节点被选为簇头的机会增大，普通节点被选为簇头的机率减小。从式 (3.4) 可以看出高级节点成为簇头的概率是普通节点的 $(1+\alpha)$ 倍，这意味着，每个周期高级节点成为簇头的次数是普通节点的 $(1+\alpha)$ 倍。与此同时，高级节点承载了网络中更多的负载，从而避免了低能量的节点过早死亡的现象，同时推迟了整个网络第 1 个节点死亡的时间。

SEP 算法相比于 LEACH 算法，对传感器网络的性能有了很大提高，尤其是该算法适合具有节点异质性的网络。但 SEP 算法也有一些不足之处：

1) 同 LEACH 算法一样，簇首选举过程中并没有考虑节点的剩余能量，只是通过轮循的方式进行簇头的选举。随着网络运行时间的推移，有的节点能耗较多，有的节点能耗较少。

在高级节点簇头选举过程中，能量高的节点和能量低的节点成为簇头的概率相同，普通节点在簇头选举过程中也存在同样问题，这导致了负载不均衡。

2) SEP 算法中，簇头和基站是通过单跳的方式直接通信的，距离远的簇头与基站通信消耗的能量较大，加速了节点死亡的速率。

3) SEP 算法是针对干电池或化学电池供电的传感器网络设计的，在设计的过程中并没有考虑节点具有能量采集功能的情况。为此要让 SEP 算法适用于能量采集无线传感器网络，要对算法进行一些修改。

3.3 EH-SEP 算法

针对 SEP 算法的一些不足之处，下面对 SEP 算法其进行一些修改，提出了 EH-SEP 算法。与 SEP 算法相同的是 EH-SEP 算法采用的也是轮循环进行执行方式，每轮包括簇头的形成和数据的传输。在簇头的形成阶段，EH-SEP 在簇头选举过程中考虑了能量补给的因素，在数据传输阶段采用了多跳的传输模式。

3.3.1 系统模型

(1) 网络模型

假设基本的网络模型：将 N 个数据采集传感器节点随机部署在一个边长为 M 的正方形区域内，并且假设传感器网络具备如下特性：

- 1) 所部署的网络为静态网络，每个节点有唯一的标识 ID，并且部署之后就不再移动。
- 2) 基站位于正方区域的正中心，并且只有一个，能量无限大。
- 3) 节点具有能量异构特性、能量采集功能、数据融合功能。
- 4) 通信链路对称，可以根据对方发射的功率来计算出发射者与自己的距离。
- 5) 节点可以根据距离自由调整发射功率，并且在没有数据传输的时候转入休眠状态，以节省能量。

(2) 能量采集模型

具有能量采集的传感器节点，能将周围环境中的能量转化成电能存储在电容或电池中，以供节点使用。假设能量采集装置能将采集到的能量百分百的转化成电能供节点使用，令传感器节点能量模型如下：

$$E_r(i, r) = \min(E_r(i, r-1) + E_h(i, r-1), E_s) - eE_e(i, r) \quad (3.7)$$

式 (3.7) 中 $E_r(i, r)$ 为第 r 轮节点 i 的能量， $E_h(i, r-1)$ 为第 $r-1$ 轮补充给节点 i 的能量， $eE_e(i, r)$ 代表第 r 轮节点处理数据所消耗的能量，当事件 e 发生的时候， e 取值为 1，否则取 0。

(3) 能耗模型

本文采用了 Heinzelman^[30]提出的无线通信模型，如图 3.1 所示，左边的是发射器，右边的是接收器。假设通信链路是对称的，即传感器节点 A 发射 k bit 大小的数据给传感器节点 B 所消耗的能量与传感器节点 B 传输相同大小数据包到传感器节点 A 所消耗的能耗是相同的。

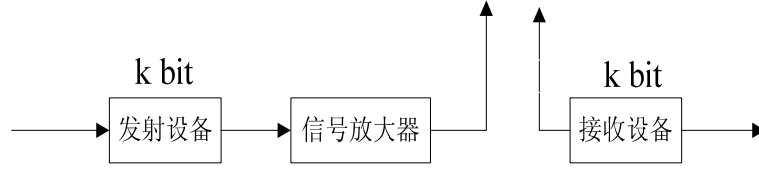


图 3.1 无线通信信道模型

该模型采用了两种通信模型：即自由空间（free space）通信模型和多径衰落（multi-path fading）通信模型。当两个传感器节点间传输距离小于某个阈值 d_0 时，采用自由空间通信模型，功率的衰减与距离 d 的平方成正比；否则采用多径衰落通信模型，功率的衰减与距离 d 的四次方成正比。节点传输数据大小为 k bit，经过传输距离为 d 的能耗为 $E_T(k, d)$ ，具体计算公式如下：

$$E_T(k, d) = \begin{cases} E_{elec} \times k + E_{fs} \times k \times d^2, & d < d_0 \\ E_{elec} \times k + E_{mp} \times k \times d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (3.8)$$

式 (3.8) 中 E_{elec} 为发送或接受所消耗的能量， E_{fs} 和 E_{mp} 分别为自由空间和多径衰落条件下的传输功放， $d_0 = \sqrt{E_{fs} / E_{mp}}$ 为传输距离阈值。

节点在接收端接收大小为 k bit 的数据所消耗的能量为：

$$E_R(k) = kE_{elec} \quad (3.9)$$

簇头融合 n 个长度为 k 的数据包所消耗的能量为：

$$E(n, k) = n \cdot k \cdot E_{DA} \quad (3.10)$$

式 (3.10) 中 n 为融合的数据包个数， k 为每个数据包的大小， E_{DA} 为数据融合所消耗的能量。

3.3.2 簇头建立

影响簇头选举的因素主要有两个，一个是阈值 $T(i)$ ，另一个是随机数 $rand$ ，提高阈值可以增大节点成为簇头的概率。为保证高级节点和普通节点在簇头选举过程中，能量高的节点成为簇头的概率大于能量低的节点成为簇头的概率，对高级节点和普通节点的阈值进行修正，具体修正如下：

$$T_a(i) = \begin{cases} \frac{P_a}{1 - P_a \times [r \bmod (1/P_a)]} \times \frac{E_r(i, r) + E_h(i, r-1)}{E_{sa}}, & i \in G_a \\ 0, & i \notin G_a \end{cases} \quad (3.11)$$

$$T_n(i) = \begin{cases} \frac{P_n}{1 - P_n \times [r \bmod (1/P_n)]} \times \frac{E_r(i, r) + E_h(i, r-1)}{E_{sn}}, & i \in G_n \\ 0, & i \notin G_n \end{cases} \quad (3.12)$$

式 (3.11)、(3.12) 中 $E_r(i, r)$ 为节点 i 当前轮剩余能量， $E_h(i, r-1)$ 为第 $r-1$ 轮节点 i 采集到的能量， E_{sa} 和 E_{sn} 分别为高级节点和普通节点的初始能量，其它几个参数定义同上。

在式 (3.11)、(3.12) 中对阈值修正时，为避免较低能量的节点成为簇头，并且考虑到现

有传感器节点具有能量采集功能,根据传感器节点自身能量剩余情况和能量从外界补给情况,对阈值 $T(i)$ 进行修正,分别添加了能量估计比值。在原来只考虑节点的总数和簇头占总节点个数的比例基础上对簇头阈值进行修正,将节点剩余能量、节点采集能量和节点的初始能量考虑了进去。这样在簇头的选举过程中,有效地提高了能量高的节点成为簇头的概率,降低了能量低的节点成为簇头的概率,避免了能量过低的节点成为簇头后因大量处理数据而过早死亡的情况。修改后的簇头选举机制可以有效延迟了第 1 个节点死亡的时间,并且提高了整个网络的生存时间。

3.3.3 簇间路由

在数据传输阶段采用了多跳通信方式将数据传到基站,避免了生成的簇头直接与基站进行远距离通信,从而加快簇头能量的消耗。为选择适合的下一跳节点,下面先对簇头转发的能耗进行简要的分析,分析采用自由空间传输方式。

假设簇头 C_i 通过簇头 C_j 转发 k bit 数据到基站,那么整个过程所需的能耗为:

$$\begin{aligned} E &= E_T(k, d(i, j)) + E_R(k) + E_T(k, d(j, BS)) \\ &= kE_{elec} + kE_{fs}d^2(i, j) + kE_{elec} + kE_{fs}d^2(j, BS) \\ &= 3kE_{elec} + kE_{fs}(d^2(i, j) + d^2(j, BS)) \end{aligned} \quad (3.13)$$

式 (3.13) 中 E_T 和 E_R 分为节点发射数据消耗和接收数据消耗的能量, d 为节点间的传输距离, E_{elec} 为发送或接受所消耗的能量, E_{fs} 为自由空间条件下的传输功放, i, j 为节点 ID, k 为传输数据包的大小。

由式 (3.13) 可以看出转发所需的能耗 E 主要是由 $d^2(i, j) + d^2(j, BS)$ 决定的,那么在簇头 C_i 选择下一跳路由时可以综合考虑节点剩余能量与距离两个参数来选出适合的下一跳节点。

在无线传感器网络中,已当选的簇头节点可以通过接收其它簇头结点发来的信息构建自己的下一跳路由表,接收信息包括发送簇头的 ID、剩余能量,节点间的距离可以通过接收功率测得。簇头下一跳路由选择执行如下:

(1) 当簇头 C_i 距离基站比其它簇头距离基站近的时候,簇头 C_i 采用直接与基站通信方式,这样可以减小通信距离,避免了更远距离的传输。

(2) 当不满足条件 (1) 时,根据公式 (3.14) 将满足条件的簇头构成一个候选节点集,从中选出一个取值最大的簇头作为簇头 C_i 的下一跳。根据候选节点的剩余能量和传输数据的距离来决定簇头的下一跳。

路由表候选节点集合如式 (3.14) 所示:

$$P(j) = \frac{E_r(r, j)}{d^2(i, j) + d^2(j, BS)} \quad (3.14)$$

式 (3.14) 中 i, j 为节点 ID 号, d 为节点与节点之间或节点与基站的距离, BS 为基站,

$P(j)$ 为 C_i 的下一跳簇首的集合, $E_r(j, r) / (d^2(i, j) + d^2(i, BS))$ 为候选节点 j 第 r 轮的剩余能量与距离的比值, 节点能量越高, 距离越小的簇头成为下一跳的可能性就越大。

簇间路由协议算法流程图如图 3.2 所示:

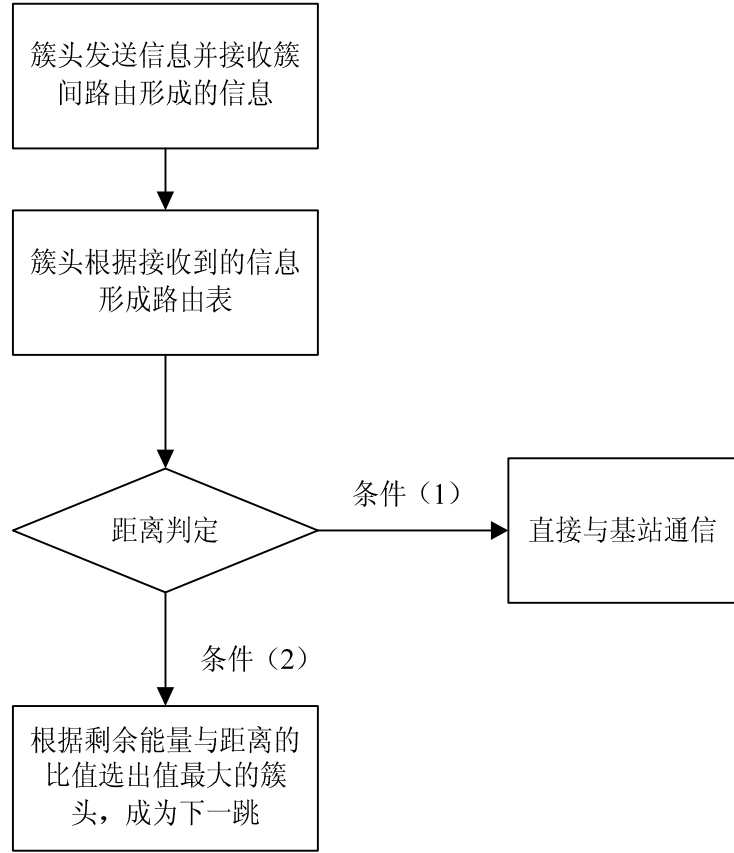


图 3.2 簇间多跳流程图

采用上述方式来选择下一跳, 在选择的过程中综合了下一跳的剩余能量和距离的两个因素, 可以选出适合的下一跳节点, 确保了以较低的能耗来传输所采集到的数据, 有效的平衡网络能量的使用, 提高了网络的性能。

3.4 仿真实验与性能分析

3.4.1 仿真环境设置

本实验主要对 LEACH、SEP 和 EH-SEP 算法, 以及不同能量补给下异构传感器网络的性能进行了仿真。实验中采用三个指标来衡量算法及网络的性能: (1) 网络出现第 1 个死亡节点的时间。(2) 网络整体残留能量。(3) 整个网络的吞吐量。网络仿真具体参数如表 3.1 所示。为达到网络性能最优, 根据文献[36]中, 可以计算出最优簇头数为:

$$k_{opt} = \sqrt{\frac{n}{2\pi}} \frac{M}{d_{toBS}} \quad (3.15)$$

式 (3.15) 中 k_{opt} 代表系统性能最优时的簇头数, n 为网络中的节点数, M 为正方形区域的边长, d_{toBS} 为簇头到基站的平均距离。

将参数代入式 (3.15) 中, 可以计算出最优的簇头数为 10.4, 取值为 10, 那么此时最优的簇头所占比 $P_{opt} = k_{opt} / N$ 为 0.1。

表 3.1 仿真参数设置

参数名称	参数值	参数名称	参数值
网络区域	100m X 100m	m	0.1
基站位置	(50, 50)	α	1
节点数	100	E_{fs}	10pJ/(bit/m ²)
普通节点初始能量 E_s	0.5 J	E_{mp}	0.0013 pJ/(bit/m ⁴)
数据包大小	4000bit	E_{elec}	50 nJ/bit
发送临界值 d_0	87.7	E_{DA}	5 nJ/bit/singal

3.4.2 仿真结果与分析

在 100m×100m 的区域范围内随机部署 100 个具有能量采集的节点, 基站位置坐标为 (50, 50)。图 3.3 为 EH-SEP 算法网络初始节点状态图, “x” 为基站, “o” 为普通节点, “+” 为高级节点。如图 3.4 为传感器网络运行到第 20 轮时的簇头分布图, 从图中可以看出分簇算法把整个网络分成了不同大小的簇, 每簇中只有一个簇头以及不同数量的非簇头成员。

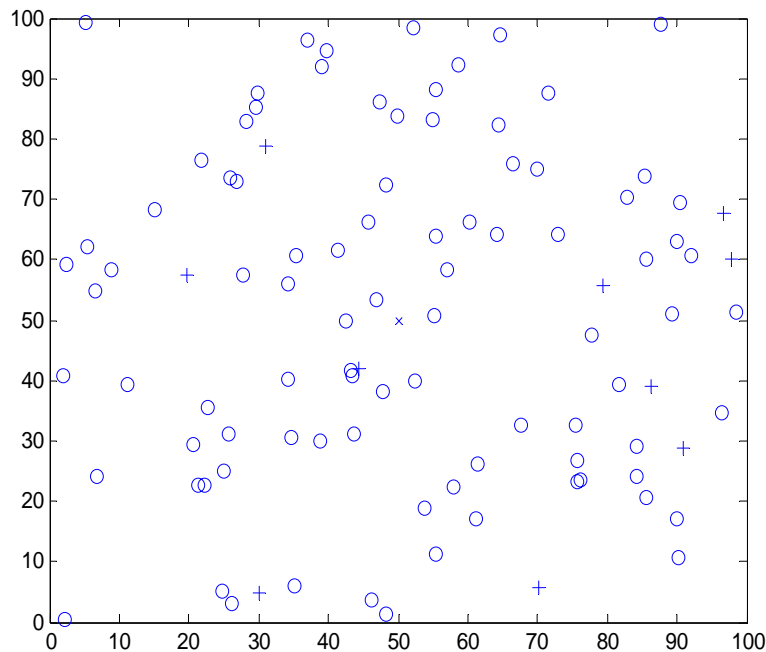


图 3.3 网络初始节点状态图

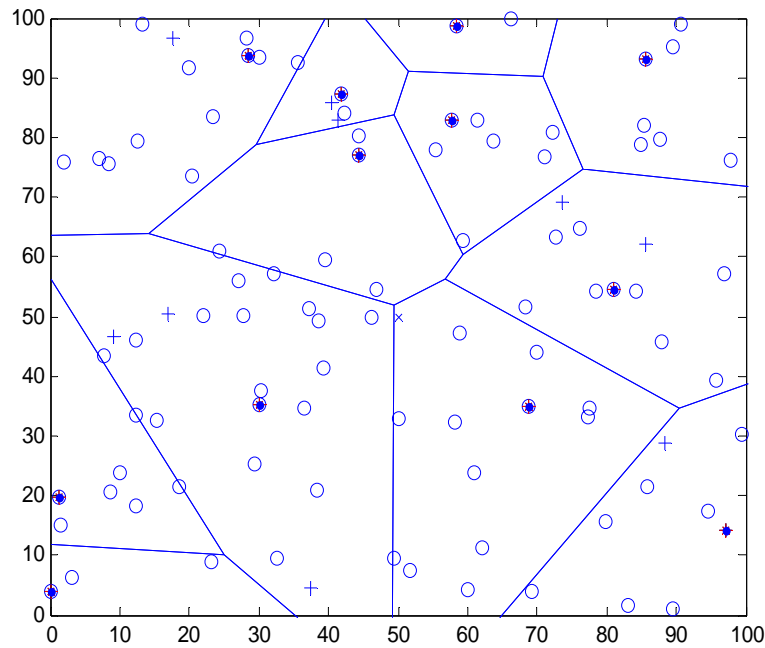


图 3.4 第 20 轮簇头分布图

实验 1：出现第 1 个死亡节点的时间

表 3.2 记录了每种算法仿真 5 次后出现第 1 个死亡节点的时间轮数。通过对比可以看出 LEACH 算法、SEP 算法、EH-SEP 算法出现第 1 个死亡节点的平均轮数分别为 824 轮、1001 轮、1389 轮，验证了所提出的 EH-SEP 算法很好的延长了网络稳定工作时间，推迟了网络第 1 个死亡节点的时间，性能有了较大的提高。

表 3.2 出现第 1 个死亡节点的轮数

仿真次数/次	LEACH	SEP	EH-SEP
1	851	991	1363
2	831	1071	1397
3	779	961	1341
4	869	1013	1419
5	790	969	1412
平均轮数	824	1001	1389

图 3.5 是不同分簇算法下，存活节点数量随时间变化的情况。从图中可以看出 EH-SEP 算法协议有效地延长了第 1 个死亡节点的时间，同时 EH-SEP 算法的最后一个节点死亡时间要远长于 LEACH、SEP 算法。并且随着补给能量的提高，到后期整个网络的存活节点数也随之提高。如果节点的补给能量极高，整个网络的节点将会一直存活下去，也就是整个网络将永远的工作下去。从图中可以看出算法是比较可靠的，并且极大的延长了网络稳定时期正常工作的时间，提高了网络性能。

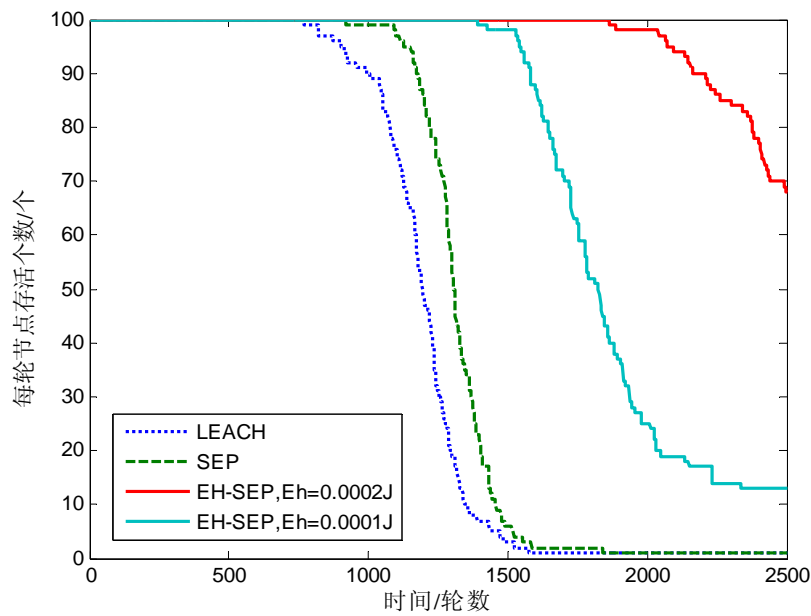


图 3.5 每轮的节点存活数

实验 2: 网络整体残留能量

图 3.6 为不同分簇算法下, 网络整体残留能量情况。从图中可以看出, 每轮过后, EH-SEP 算法的网络整体残余能量都比 LEACH 算法和 SEP 算法高, 这是因为 EH-SEP 算法考虑了节点能量采集的情况, 补给能量跟路由算法很好的结合在了一起, 从而整体网络能耗相对均衡。图 3.6 还给出了不同能量补给情况下的网络整体残留能量, 从图中可以看出, 每轮补给的能量越大, 网络整体残留能量就越高, 这说明节点在网络运行的整个过程通过补给到能量到的能量基本上可以满足网络整体的运行, 每轮采集到的能量足够大, 网络可以一直运行下去。

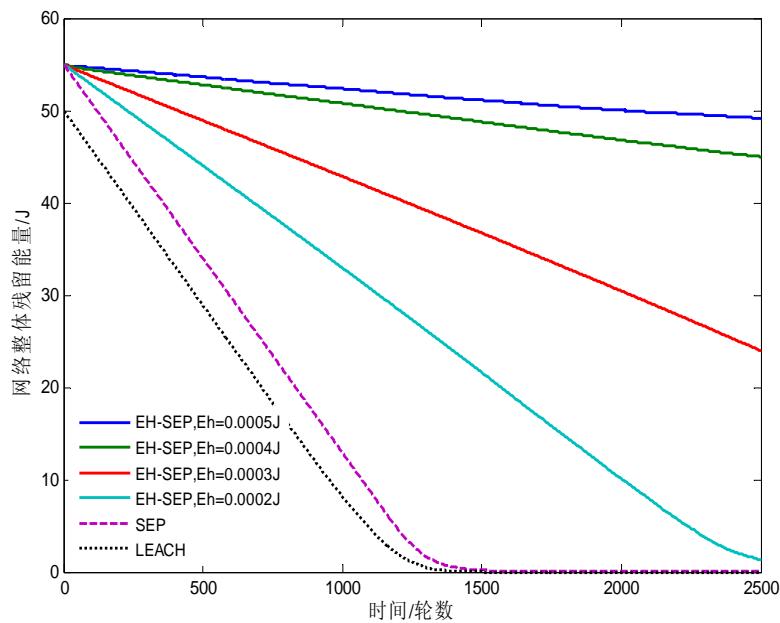


图 3.6 网络整体残留能量

实验 3：不同能量补给下的网络吞吐量变化情况

图 3.7 描述了 EH-SEP 算法下，不同补给能量大小下的整个网络吞吐量变化情况。从图中可以看出，整个网络的吞吐量随着节点能量补给的提高也一起提高，但网络数据处理能力有限，最终整个网络将以最大的数据传输量向基站传输数据。从侧面也可以反映出，只要补给的能量足够大，最终整个网络的节点全部存活，并且整个网络将永远的运行下去。

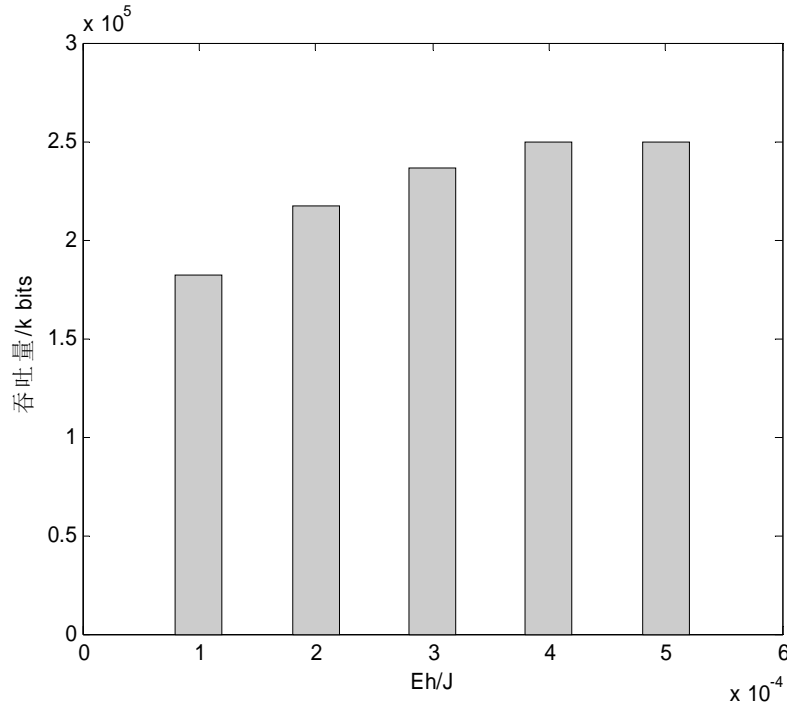


图 3.7 不同能量补给下的网络吞吐量变化情况

3.5 本章小结

由于传统无线传感器网络分簇路由协议不适用于能量采集型的无线传感器网络，本章在异构传感器网络 SEP 路由协议的基础上对簇头选举中的阈值进行了修正，在簇头选举阶段不但考虑链路节点剩余能量，还考虑了节点的采集能量。在数据传输阶段，采用了多跳的传输模式，避免了节点与基站长距离的传输。从仿真结果看，EH-SEP 协议不但适合能量采集传感器无线网络，还有效延长了网络稳定阶段的工作时间。

第4章 基于压缩感知的异构传感器网络分簇路由算法

提高网络性能的方法很多，如设计适合的路由协议、设计合理占空比的 MAC 层算法等。上一章就提出的 EH-SEP 算法就是通过设计分簇路由协议以及采用簇间多跳的方式来延长网络的生存周期以及提高整个网络的稳定工作时长。本章将从数据压缩入手，采用压缩感知的方法来降低数据传输的量，结合 SEP 分簇路由协议来达到延长网络生存周期和延长网络稳定工作时间的目标。采用压缩感知方法的传感器网络主要应用在那些对数据精确不是很高、要求传感器网络能够尽可能长时间工作的应用场景。

4.1 引言

无线传感器网络的主要任务是将大量具有数据采集功能的传感器节点随机部署在一个监控区域内，对目标区域进行实时的数据采集^[2,3]。传感器网络通过无线通信的方式，采用多跳或单跳的进行数据传输，将监测到的数据传送到目标用户。传统的无线传感器网络中的数据压缩方法主要有三大类：（1）基于传感器节点之间数据相关性的压缩算法^[55]。（2）基于节点数据传输特性和封包结构的压缩方法^[56]。（3）基于预编码的数据压缩算法，即在传输数据之前先对采集到数据进行编码，再传给下面的节点。这三类压缩方法都有各自的优缺点，在不同的环境下可以采用不同的压缩方法，但唯一的不足就是数据在压缩过程中对数据原始信号的需求量非常的大，在数据压缩完之后还要丢弃一部分数据分量，从而造成了大量资源的浪费。

压缩感知理论（Compressive Sensing, CS）是现代信息科学领域中新的研究方向^[57]，它可以利用数据的可压缩的特性，通过降低采样率来对数据进行压缩采样，并且利用少量的采集数据就能很好的对原数据进行重构。压缩感知理论不再需要进行大量、高速的数据采集，降低了系统处理数据的复杂度，非常适合能量有限、处理数据有限和内存有限的无线传感器网络。在文献[58]无线传感器网络多目标定位中采用了压缩感知理论，设计了一种迭代回溯的压缩感知路由算法。仿真结果表明，利用少量的数据对目标节点进行了准确的定位。文献[59]将双簇头交替路由协议与压缩感知理论相结合，提出了具有压缩感知的无线传感器双簇头路由协议，仿真显示，网络中的簇的大小分布均匀，网络能耗能均匀消耗，网络的生命周期也得到了延长。本章结合 SEP 路由算法，提出了具有压缩感知的异构传感器网络分簇路由算法。

4.2 分簇路由协议

本章采用的分簇路由协议采用的是上一章所提到的 SEP 算法，结合优化后的数据重构算法来设计基于压缩感知的异构传感器分簇路由算法 SEP_CS。

在无线传感器网络中，网络部署采用随机部署的方式，经过分簇后，可能会出现簇内节点分布不均匀，使得某些区域内的传感器节点分布比较密集，因此，节点采集到的数据也存

在着较大的冗余，对这些冗余信息的接收与发送会造成网络中额外能量的消耗。

为了解决这个问题，将网络中一个簇划分成一个个小的区域，如 $M \times N$ 块大小不一的区域，具体的区域大小可以根据簇的大小和其它一些性质来决定。将划分成的每一个小区域称之为网格。如图 4.1 所示，在图中将一个簇分成了 A、B、C、D、E、F、G、H 和 I 九个网格，每个网格都相邻。假设网格中的所有节点都可以跟相邻的网格节点通信，并且每个网格中只有一个节点工作，其它节点休眠，通过这样的方法就可以降低簇内采集到数据的冗余量，减少不必要的数据传输。

		E	D	C			
		F	A	B			
		G	H	I			

图 4.1 簇内网格示意图

由节点能耗模型可知，节点的传输能耗跟节点的传输距离成非线性比例，为了使得簇内数据传输消耗的能耗最小，引入节点剩余能量与节点与簇头距离比值 W_i 如式 (4.1) 所示。

$$W_i = \frac{E_r(i, r)}{d(i, C)} \quad (4.1)$$

式 (4.1) 中 $E_r(i, r)$ 为节点 i 在第 r 轮的剩余能量， $d(i, C)$ 为节点 i 与自己所在簇的簇头节点间的距离。

将每一个网格中的节点比值 W_i 构成一个集合，从中选出一个较大的来担任数据采集与传输的任务，这样可以有效的降低网络内节点的能耗，其它不担任工作的节点采取休眠的措施。

4.3 数据压缩与重构

压缩感知基本过程主要包括两个阶段：数据压缩测量阶段和数据重构阶段^[60]。在数据压缩测量阶段主要将采集到数据 X 与一个测量矩阵 Φ 相乘得到一个低维度的采样结果 Y 。在数据重构阶段根据测量值 Y 和测量矩阵 Φ 来重构采集到的数据 X 。

4.3.1 数据压缩算法

当传感器网络部署完后，首先采用分簇路由算法对网络监测区域进行分簇，接着再将每个簇根据簇的大小及网络特性划分成若干个不同的网格，每个网络里只有一个节点将采集到的数据发送给簇头。簇头获得簇内的信号之后，将信号投影到观测矩阵上得到 M 个观测值 Y_M ，簇头计算出 Y_M 值后，以多跳的方式传送给基站。具体的数据采集过程如下：

步骤 1: 簇内节点 i 将采集到的数据信号 X_i 直接发送给簇头。

步骤 2: 簇头收集到 N 数据后组成数据向量 $X = (X_1, X_2, \dots, X_N)^T$ ，由于具有空间相关性，感知数据 X 在小波基 ψ 上会呈现出良好的稀疏性，即： $X = \psi\alpha$ 。其中， ψ_i ($i=1, 2, \dots, N$)， X 和 α 是同一个信号的不同表示， X 是在时域的表示， α 是在 ψ 域内的表示。如果 α 只有 K ($K \ll N$) 个非零系数，我们就称它在 ψ 域内是稀疏的。进行稀疏性表示之后，信号投影到 ψ 域能够得到 K 个非零系数，但是这 K 个系数的位置仍然是不可知的。

步骤 3: 簇头将稀疏后的信号投影到变换基 ψ 不相关的 $M \times N$ 矩阵 Φ 上来测量稀疏信号，使得测量结果能保存 K 个大系数的数据信息。对稀疏表示的信号 X 进行测量 $Y = \Phi\alpha$ ，能够得到信号 $Y_M = (Y_1, Y_2, \dots, Y_M)$ ，使得 Y_M 包含足够的重构信息，即可以通过信号 Y_M 可以高概率确定 K 个大系数的数据，实现信号 X 的重构。

步骤 4: 簇头将测量值 Y_M 以单跳的方式传给基站。

步骤 5: 基站从接收到的 M 个测量值中重构出信号 X 。

4.3.2 数据重构算法

压缩感知的信息重构有很多的解法，比较经典的如 BP 算法^[61]、OPM 算法^[62]和 OPM 算法的改进算法^[63,64]等。下面介绍一下 OMP 算法的步骤：

步骤 1: 初始化余量 $r_0 = y$ ，迭代次数 $n = 1$ ，索引值集合 $\Lambda = \emptyset$ ， $J = \emptyset$ 。

步骤 2: 计算相关系数 $u \cdot u = \{u_j | u_j = \langle r, \varphi_j \rangle, j = 1, 2, \dots, N\}$ 并将 u 中最大值对应的索引值存入 J 中。

步骤 3: 更新支撑集合 Φ_Λ ， $\Lambda = \Lambda \cup J$ 。

步骤 4: 信号逼近 $\hat{x} = \arg \min \|y - \Phi_\Lambda x\|_2$ 。

步骤 5: 余量更新 $r_{new} = y - \Phi_\Lambda \hat{x}$ 。

步骤 6: 如果 $\|r_{new} - r\| \geq \varepsilon$ ，则令 $r = r_{new}$ ， $n = n + 1$ ，转向步骤 2，否则停止迭代。

OMP 算法是一种经典求解压缩感知的算法，虽然 OMP 算法的求解精度非常高，但是 OMP 算法在完备库中寻找最相关的匹配向量的过程是一个计算量非常大过程，计算复杂度高，下面采用粒子群算法对其进行优化，优化后的算法步骤如下：

步骤 1: 给每个粒子在完备库 Ω 中生成一个随机位置，每个位置对应 Ω 中的一个原子列。

步骤 2: 计算 $u = \{u_j | u_j = \langle r, \varphi_j \rangle, j = 1, 2, \dots, N\}$ ，将其作为适应度函数，并比较得到 $xbest_i$ 和 $gbest_i$ ，并记录 $fbest$ 和 $fgbest$ 。

步骤 3: 计算数据，更新数据，粒子的数据要限定在解空间里面。

步骤 4: 判断是否到达最大搜索次数，到了执行下一步，否则返回步骤 2。

步骤 5: 对搜索出来的适应值进行匹配计算，将对应的分量最大的原子序号存入 Λ 中，并将该原子存入 Φ_Λ 中。清空 $xbest_i$ 、 $gbest_i$ 、 $fbest$ 和 $fgbest$ 的数据。

步骤 6: 信号逼近 $\hat{x} = \arg \min \|y - \Phi_\Lambda x\|_2$ ，余量更新，判断余量是否达到门限值，如果是，执行下一步，如果不是，执行步骤 1。

4.4 仿真实验与分析

4.4.1 数据压缩仿真

假设在传感器网络中传感器节点在采集到数据后将数据直接发送给簇头，簇头节点运行压缩感知算法，再将计算后的值发送给基站。为了更好的理解压缩感知算法，定义一个压缩比为 $E = M / N$ ，其中 M 为观测个数， N 为感知数据的个数。在仿真中，假设有 24 个传感器节点具有湿度数据采集功能，在某个时间内采集到了 24 个相对湿度数据。传感器节点将采集的数据发送到簇头，簇头将计算后的值发送给基站。基站运行信号重构算法将节点采集到的数据进行还原。图 4.2 和 4.3 分别为压缩比为 75% 和 50% 的原始数据与重构数据的对比图。

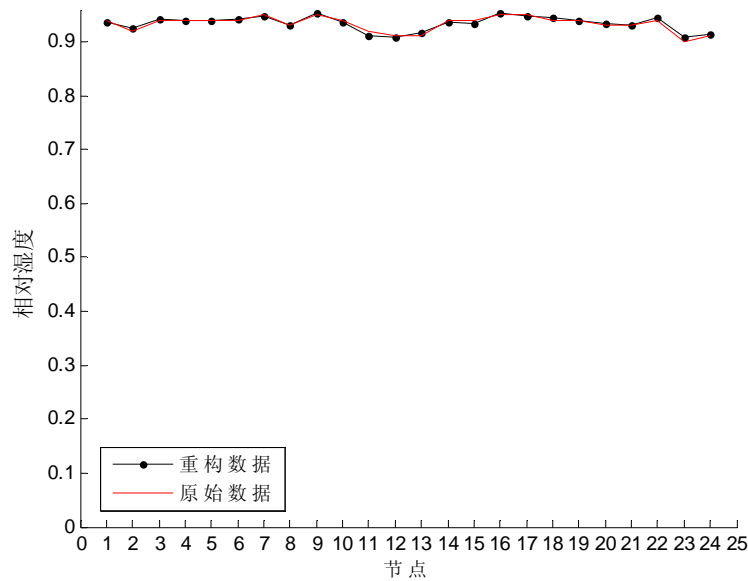


图 4.2 压缩比为 75% 的数据对比图

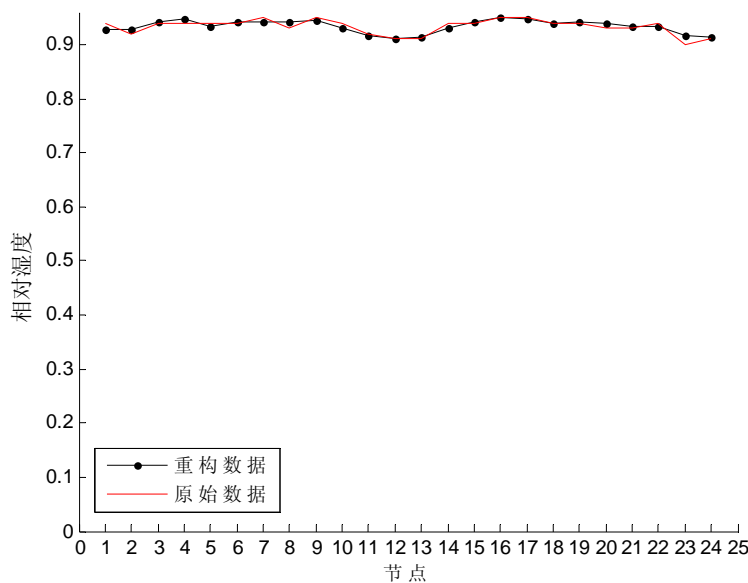


图 4.3 压缩比为 50% 的数据对比图

从图 4.2 和 4.3 可以看出,在不同压缩比的情况下,采用压缩感知的方法都可以较好的恢复出原始数据,压缩比大的重构效果比较好,这是因为压缩比较大的包含了更多的原始信息,可以更好的对原始数据进行重构。虽然压缩比为 50%的效果差了点,但还是较好的恢复出了原始数据。为了更好的说明重构的性能,下面给出了压缩比在 75%与 50%的归一化重构误差。如图 4.4 所示。从图中可以看出,24 个数据的归一化重构误差都比较小,较好的恢复出了原始数据。

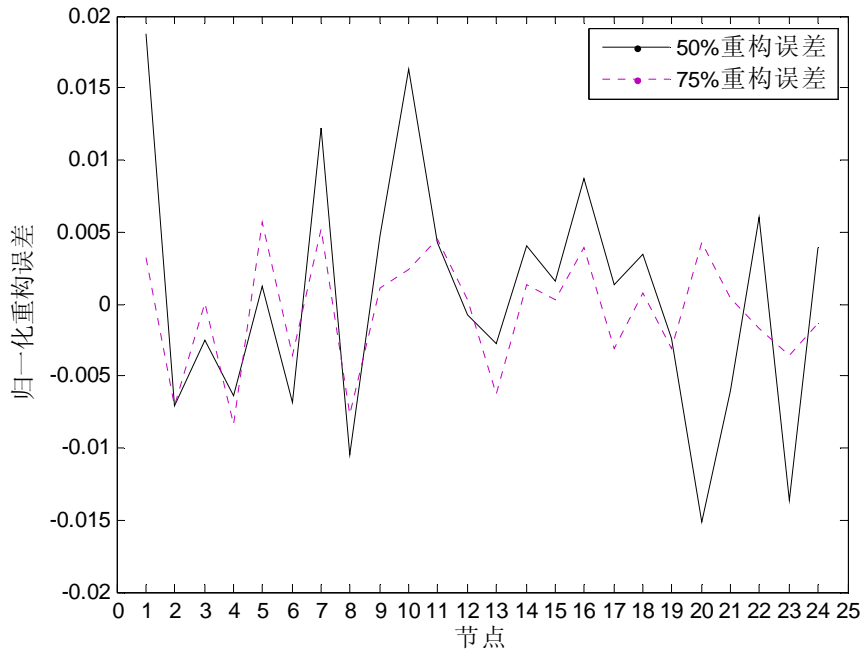


图 4.4 归一化重构误差

4.4.2 异构网络性能仿真

本节采用与第三章相同的系统模型,将 CS 算法和 SEP 算法相结合来观察具有压缩感知的分簇路由算法对网络性能的影响。仿真压缩比分别为 75%和 50%时异构网络性能,性能评价指标主要是:1) 算法对网络存活节点的影响;2) 算法对网络能耗的影响。其它仿真参数设计如表 4.1,

表 4.1 仿真参数设置

参数名称	参数值	参数名称	参数值
网络区域	100m X 100m	α	1
基站位置	(50, 50)	m	0.1
节点数	100	E_{fs}	10 pJ/(bit/m ²)
普通节点初始能量 E_s	0.5 J	E_{mp}	0.0013 pJ/(bit/m ⁴)
数据包大小	4000bit	E_{elec}	50 nJ/bit
发送临界值 d_0	87.7	E_{DA}	5 nJ/bit/singal

实验 1：不同压缩比下对网络工作时长的影响

图 4.5 为不同压缩比下网络中每轮节点存活的个数，从图中可以看出采用压缩感知技术网络，使网络稳定期的工作时间以及网络的最大工作周期都得到了延长。压缩比越大，网络的工作时间也就越长，这是因为具有压缩感知技术的网络在保证数据传输质量的同时，降低了数据传输量，减小了网络的整体开销，从而降低了网络的能耗，延长了网络了工作周期。

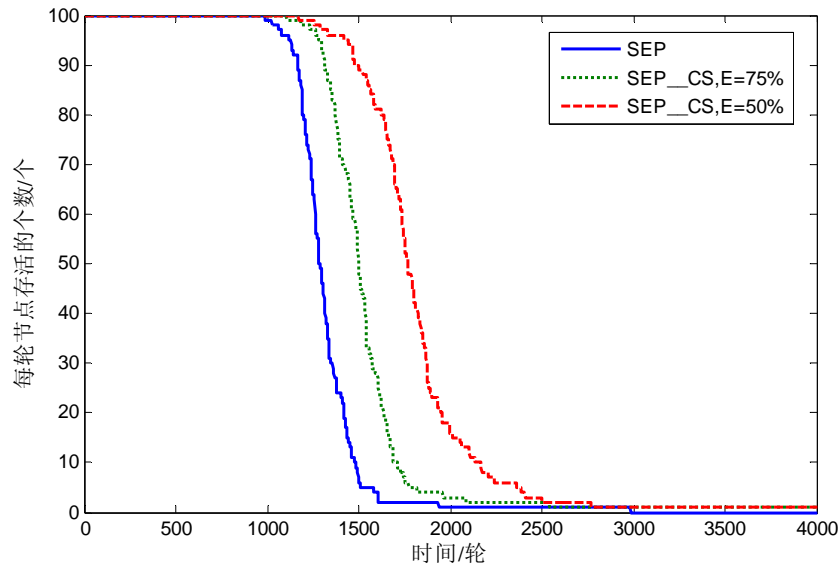


图 4.5 不同压缩比下的每轮节点存活个数

实验 2：不同压缩比下对网络能耗的影响

图 4.6 是从网络的整体能耗观察压缩感知技术对网络的影响。从图中可以看出压缩感知技术降低了网络每轮的能耗，提高了网络的整体水平。网络能耗随压缩比的增大而减小，并且从图中可以看出能耗消耗速率是一条斜直线，网络整体能量消耗较均衡。

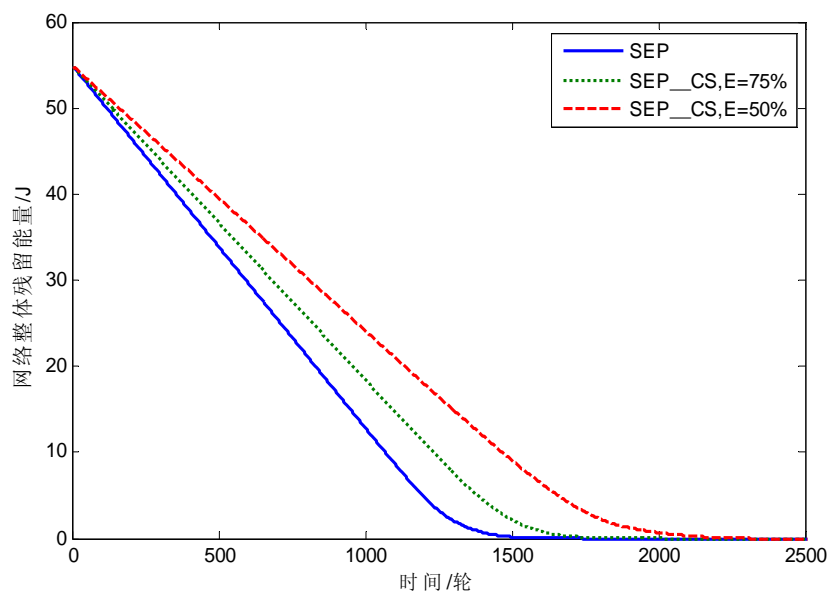


图 4.6 每轮网络的整体残留能量

4.5 本章小结

本章主要研究了无线传感器网络中基于压缩感知的数据压缩方法，在设计信号重构算法时先对重构算法进行了优化；在网络节点向簇头传输数据时，引入了能量与距离比，让能量高的节点与距离簇头比较近的节点进行数据的采集；最后将所设计的压缩感知算法与 SEP 分簇路由协议相结合。从仿真结果看，所设计的基于压缩感知的分簇路由协议让传感器网络更节省能量，稳定传输数据时间更长，整个网络的生命周期更长。

第5章 总结与展望

5.1 论文总结

无线传感器网络已经在各领域开展了应用，对它的研究也在进一步的深入。对无线传感器网络的研究可以从很多方面着手，如信息处理方面、路由协议方面、网络优化方面等。本文主要研究无线传感器网络的分簇路由协议，早期的路由协议主要基于同构传感器网络设计的，而在现实当中由于环境的复杂性，单型号的传感器节点可能无法满足用户需求，所以设计满足不同种型号传感器网络路由协议在某些情况下更有实际价值。

本文从能量异构无线传感器网络入手，重点研究了异构无线传感器分簇路由算法。具体研究工作如下：

第一章分析了课题研究的背景与意义，从无线传感器网络的网络结构、节点结构、协议栈结构方面对无线传感器网络的相关概念进行了介绍，综合阐述了无线传感器网络国内外的研究动态。

第二章从分簇路由算法的设计目标、关键技术和性能指标入手，对无线传感器网络的分簇路由协议的相关概念进行了概述。着重介绍了几种典型的同构传感器网络分簇路由算法和异构传感器网络分簇路由算法，并对各种算法的性能进行了比较。

第三章首先对 SEP 算法进行了介绍，接着分析了 SEP 算法的不足，针对 SEP 算法的不足之处进行修改，提出了一种具有能量补给的异构无线传感器分簇路由算法 EH-SEP。EH-SEP 算法在簇的建立阶段考虑了节点的剩余能量和节点的补给能量；在数据传输阶段采用了簇间通信的方式。实验阶段以网络的第一个死亡节点的轮数、网络整体的残留能量以及不同能量补给下的网络吞吐量作为网络性能的衡量指标。仿真结果表明，修改后的 EH-SEP 算法适用于具有能量采集的无线传感器网络，并且相比于 LEACH 算法、SEP 算法，在性能上、网络的生存周期和网络的吞吐量上都有了较大的提高。

第四章将压缩感知技术与 SEP 分簇路由算法相结合，提出了基于压缩感知的分簇路由算法 SEP_CS。算法设计以降低能耗、延长网络稳定工作周期为目标。压缩感知可以用少量的数据量对数据进行恢复，通过降低了数据传输量来达到降低能耗的目的。SEP_CS 算法在满足数据能够重构的情况下，将节点采集到的数据通过观测矩阵将高维度的数据降低到低维度的数据，通过减少数据传输量来减少节点的能耗。在仿真阶段采用了两种不同的压缩比来观察压缩感知算法对网络中每轮存活的结点以及每轮网络整体的剩余能耗的影响。从仿真来看，基于压缩感知的分簇路由算法有效的降低了网络的能耗，延长了网络稳定工作的周期，并且数据重构效果也比较理想。

5.2 下一步研究方向

对无线传感器网络分簇路由协议的研究已经成为了研究无线传感器网络重要研究课题之一。本文主要针对异构传感器网络的分簇路由进行研究，由于时间、能力有限，做所的研究工作并不是十分完善，还有许多改进的地方，现将下一步的研究工作归纳如下：

1) 本文提出的 EH-SEP 算法只是在簇头的选举做了些工作，在选举过程并没有考虑簇头在网络中分布情况，可能出现某些区域簇头比较密集，下一步可以对其进行相应的完善。

2) 在具有压缩感知的分簇路由算法中，压缩感知部分采用的是每个簇的压缩比是一样情况，其实要想得到更好的重构数据，可以对每个簇采用自适应的压缩比的方式，这样可以在基站节点得到更好的重构数据，可以在降低网络能耗的同时得到较好的 QoS。

3) 本文在设计算法时只是基于理论层面的分析与设计，下一步可以将设计的算法应用到实际的传感器网络中，可以从实际的数据反馈对算法进行进一步的优化，还可以对其它未涉及到的参数进行评估。

4) 本文基于的是静止网络的研究，并没有考虑网络中移动节点对路由协议的影响，下一步可以设计针对网络中存在移动节点的路由协议，这样更贴近实际。

致 谢

日月如梭，光阴似箭，不知不觉研究生生活即将结束。在杭电已经呆了七年，发现自己并没有对杭电产生厌倦，反而越来越喜欢这里，喜欢这里的一草一木，喜欢这里的生活。此时一想到再过一段时间就要离开，心里不免有些伤感。

杭电七年，让我学会了很多，懂得了很多。在这里我不但学到了有用的知识，还交了一帮特别好的朋友。非常感谢杭电给我提供了这么好的环境，感谢杭电带给我的一切。

毕业来临，发现要感谢的人很多。

首先我要感谢我的导师肖明波教授。他对学问严谨的态度，以及对问题深刻见解，让我深深的佩服，从中我真正的体会到了与真正做学问者的巨大的差距。肖老师的一言一行深深的影响着我，很多好的方面我都在向肖老师学习，其中，少说多做成了我以后工作的法则。非常感谢肖老师对我的科研进行的深入指导，每次遇到的科研问题，肖老师都能用他广博的知识为我指明方向，让我对知识的掌握变的更深入，更宽广。在此，向肖老师表示自己最真挚的感谢。

其次感谢我的父母。感谢他们在我后续默默的支持着我，感谢他们在学习道路上付出的一切。父母常年在外，聚少离多，与父母的感情并没有因为距离的遥远而拉远，反而更近。每次与父母通话，父母经常叮嘱自己要好好学习、好好照顾好自己。语言虽然简单、朴实，但我能体会到父母对我的爱。谢谢他们，谢谢他们对我的付出，对我所做的一切。

我还要感谢我周围的兄弟姐妹们，晏威、傅春春、郑鑫炜、柳建为、王旭贞、陈向君、高贵康、徐爱华、闫丽霞。遇到你们是我这辈子最大的幸运，感谢你们在我研究生阶段一路的陪伴，有了你们的陪伴我的研究生生活变的丰富多彩，谢谢你们。

最后，对本文完成过程中借鉴引用的相关著作的作者，以及在百忙之中抽出时间审阅本论文的各位专家学者，致以深深的谢意。

时光一去不复返，但记忆将永远的停留在脑海中。研究生生活的经历将成为的人生一段美好的回忆。

生活还在继续，明天继续扬帆起航。

参考文献

- [1] 王营冠,王智.无线传感器网络[M].北京:电子工业出版社,2012:2-3.
- [2] 刘玮,王红梅,肖青,杨剑.物联网概念辨析[J].电信技术,2010,1:5-10.
- [3] 孙利民,李建中,陈渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2006:2-3.
- [4] N. Knaian. A wireless sensor network for smart roadbeds and intelligent transportation systems[M]. Boston: Massachusctts Institute of Technology, 2000.
- [5] W. Z. Song, R. J. Huang, M. S. Xu, et al. Design and deployment of sensor network for real-time high-fidelity volcano monitoring [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2010, 21(11): 1658-1674.
- [6] X. Wang, J. J. Ma, S. Wang, et al. Distributed energy optimization for target tracking in wireless sensor networks[J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2009, 9(1):73-86.
- [7] Mehdi, S.A., Berns, K.A survey of human location estimation in a home environment[C].Robot and Human Interactive Communication, 2014 RO-MAN: The 23rd IEEE International Symposium on , 2014: 135,140.
- [8] 马祖长, 孙怡宁, 梅涛. 无线传感器网络综述[J]. 通信学报, 2004, 25(4): 114-124.
- [9] 王珏明,顾超,钱莉.无线传感网之能量篇[J].计算机应用与软件,2007,24(1):85-86.
- [10] 杜冬梅,何青,张志.无线传感器网络能量收集技术分析[J].微电子技术,2007,44(7):430-433.
- [11] 张玉娟.具有能量补给的无线传感器网络分簇路由算法研究[D].湖南:中南大学,2011.
- [12] 陈丽娟,许晓慧,吴在军,江兵.无线传感器网络能量自供给方法[J].振动、测试与诊断, 2012,32(6): 994-998.
- [13] 唐刚,刘景全,马华安,柳和生. 微型压电振动能量采集器的研究进展[J].机械设计与研究, 2010, 26(4):61-70.
- [14] AGHUNATHAN V, KANSAL A, HSU J, et al. Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems[C]. IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks. IEEE Press Pisoata Way, NJ, USA, 2005.
- [15] Roundy S., Leland E.S., Baker J., et al. Improving Power Output for Vibration-Based Energy Scavengers [J]. Pervasive Computing, IEEE, 2005,4(1):28-36.
- [16] 马春光.异构传感器网络密钥管理[M].北京,国防工业出版社,2012:3-7.
- [17] 于海滨, 曾鹏, 王忠锋等.分布式无线传感器网络通信协议研究[J].通信学报, 2004,25(10):102-108.
- [18] 邓刚,何遵文.Ad hoc网络技术与应用[J].南阳师范学院学报,2005,4(3):78-82
- [19] Jae-Hwan Chang, Tassiulas, L.. Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks[J]. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2000, 1:22-31.
- [20] 盛文娟.无线传感器网络监控系统路由研究与设计[D]. 湖北: 武汉理工大学, 2008.
- [21] Paul J. Smart Sensor Web: tactical battlefield visualization using sensor fusion [J]. Aerospace and Electronic

Systems Magazine, IEEE,2006, 21(1):13-20.

- [22] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要[R]. 北京:国务院, 2006.
- [23] 郝雪. 无线传感器网络若干关键技术研究[D].湖北: 武汉理工大学,2010.
- [24] EDGAR H C. Wrieless Sensor Networks: Architectures and Protocols [M]. Boca Raton: Auerbach Publications, 2004.
- [25] Hedetniemi S,Liestman A. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks. Networks, 1988,18(4): 319-349.
- [26] Intanagonwiwat, C., Govindan, R., Estrin, D., et al. Directed diffusion for wireless sensor networking[J]. Networking, IEEE/ACM Transactions on , 2003,11(1):2-16.
- [27] Boulis A,Ganeriwal S,Srivastava M B. Aggregation in sensor networks: an energy-accuracy trade-off[C]. Sensor Network Protocols and Applications, 2003. Proceedings of the First IEEE. 2003 IEEE International Workshop on, 2003:128-138.
- [28] Yu Y, Govindan R, Estrin D. Geographical and energy aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. UCLA Computer Science Department Technical Report, 2001.
- [29] Heinzelman, W.B., Chandrakasan, A.P., Balakrishnan, H..Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks[C].Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences:IEEE Computer Society,2000:3005-3014.
- [30] Heinzelman, W.B., Chandrakasan, A.P., Balakrishnan, H.. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on , 2002,1(4):660-670.
- [31] Lindsey, S., Raghavendra, C.S.. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems[J]. Aerospace Conference Proceedings, 2002,3: 1125-1130
- [32] Arati Manjeshwar, Agrawal, D.P..TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[J]. Parallel and Distributed Processing Symposium., Proceedings 15th International , 2000: 2009-2015.
- [33] Dilip Kumar,Trilok C. ASERI, R.B. Patel, EEHC:Energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks[J].Computer Communications. 2009,32(4):662-667.
- [34] Zhou, Y., Hart, M., Vadgama, S., Rouz, A..A Hierarchical Clustering Method in Wireless Ad Hoc Sensor Networks[C]. Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on , 2007: 3503-3509.
- [35] Soro, S., Heinzelman, W.B..Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering[C]. Parallel and Distributed Processing Symposium, 2005. Proceedings. 19th IEEE International , 2005:8.
- [36] SMARAGDAKIS G, MATTA I, BESTAVROS A.SEP: A Stable Election Protocol for Clustered heterogeneous wireless sensor networks[C]. In: Proc. of the int'l workshop on sanpa 2004,2004:165-1909.
- [37] 卿利,朱清新,王明文,异构传感器网络的分布式能量有效成簇算法[J].软件学报,2006,17(13):481-489.
- [38] 张华良,王军,于海斌等.一个能量收集无线传感器网络路由协议[J].小型微型计算机系统,2011,32(7): 1276-1280.

- [39] 李明,刘国权,曹晓莉.基于量子和声搜索的异构传感器网络分簇算法[J].仪器仪表学报, 2014,35(4):872-879.
- [40] 李小亚,黄道平等.一种异构传感器网络的能量有效路由协议. 计算机科学, 2008, 35(5): 60-63.
- [41] 覃伯平,周贤伟,杨军. 基于无线传感器网络路由协议的评估指标研究[J].计算机应用研究,2007,4,304-306.
- [42] Ali, M.S.,Dey, T.,Biswas, R..ALEACH: Advanced LEACH routing protocol for wireless microsensor networks[C]. Electrical and Computer Engineering, 2008. ICECE 2008. International Conference on ,2008: 909-914.
- [43] P.Tillapart,S.Thamrnarojsakul,T.Thumthawatwom,et al.An Approach to Hybrid Clustering and Routing in Wireless Sensor Networks[C].In:Proc of the IEEE Aerospace Conference,2005:1-8.
- [44] 刘国梅,金秋春,史军勇. 一种适合长距离带状无线传感器网络的路由协议[J].科学技术与工程, 2013,6:1661-1665.
- [45] 郝晓辰,房艳.一种无线传感器网络的簇数目优化方法[J].传感技术学报, 2008,21(8): 1432-1436.
- [46] Lotf, J.J., Bonab, M.N., Khorsandi, S..A Novel cluster-based routing protocol with extending lifetime for wireless sensor networks[C]. Wireless and Optical Communications Networks, 2008. WOCN '08. 5th IFIP International Conference on , 2008:1-5.
- [47] 吴振华.基于能量和密度的分簇路由协议[J].南昌航空大学学报自然科学版,2010,24(2):15-425.
- [48] 张汉. 无线传感网中基于负载均衡的EAMCT-G优化算法研究[D].河南:郑州大学,2012.
- [49] 夏季文.无线传感器网络分簇路由算法改进[D].山西: 太原理工大学, 2012.
- [50] 王斯瑶.基于权值的无线传感器网络分簇路由改进算法研究[D]. 四川:电子科技大学, 2009.
- [51] Hongbin Chen.The role of recharging in energy efficiency for wireless sensor networks[C]. Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2010 International Conference on , 2010:1-4.
- [52] YOUNIS O, FAHMY S. A Hybrid, Energy-efficient Distributed Clustering Approach for Ad-hoc Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 660-669.
- [53] 周海波.基于簇的异构传感器网络能量有效路由算法研究[D].四川:成都电子科技大学,2010.
- [54] 陈爱斌,张陆勇,夏新兰等.无线传感器网络能量异构分簇路由算法的研究[J].信息系统与网络,2012,42(1):7-10.
- [55] S.D.Servetto.Sensinglena-massively distributed compression of sensor images [C] .Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'03), 2003:613-616.
- [56] Arici, T., Gedik, B., Altunbasak, Y., Liu, L..PINCO: a pipelined in-network compression scheme for data collection in wireless sensor networks[C]. Computer Communications and Networks, 2003. ICCCN 2003. Proceedings. The 12th International Conference on, 2003:539-544.
- [57] Emmanuel Candes. Compressive sampling[A]. International Congress of Mathematics [C]. Madrid, Spain, 2006, 3:1433-1452.
- [58] 何风行,余志军,刘海涛.基于压缩感知的无线传感器网络多目标定位算法[J].电子与信息

报,2012,34(3):716-721.

[59] 赵小川,周正,秦智超.基于双簇头交替和压缩感知的WSN路由协议[J].软件学报,2012,23(1):17-24.

[60] 蒋文贤. 压缩感知的能量异构WSN分簇路由协议[J]. 传感技术学报,2013,26(6):894-900.

[61] Scoot shaobing chen, David L. Donoho, Michael A. Saunders. Atomic decomposition by basis pursuit[J].society for industrial and applied mathematics,1988,20(1):33-61.

[62] Tropp, J.A., Gilbert, A.C..Signal Recovery From Random Measurements Via Orthogonal Matching Pursuit[J]. Information Theory, IEEE Transactions on , 2007,53(12):4655-4666.

[63] Needell, D.,Vershynin, R.. Signal Recovery From Incomplete and Inaccurate Measurements Via Regularized Orthogonal Matching Pursuit[J].Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of , 2010,4(2):310-316.

[64] Donoho, D.L., Tsaig, Y., Drori, I., Starck, J.-L..Sparse Solution of Underdetermined Systems of Linear Equations by Stagewise Orthogonal Matching Pursuit[J]. Information Theory, IEEE Transactions on , 2012,58(2):1094-1121.

附 录

作者在读期间发表的学术论文及参加的科研项目

发表的学术论文：

- [1] Xiangnan Xu, Mingbo Xiao, Wei Yan. Clustering routing algorithm for heterogeneous WSN with energy harvesting.2014 International Conference on Energy Science and Applied Technology (ESAT 2014), DaQing, China.
- [2] 晏威,肖明波,徐向南.Ad Hoc 网络中联合速率与功率控制的跨层设计[J].信息安全, (录用)

参加的科研项目：

- [1] 无线传感器网络研究, 杭州电子科技大学启动基金项目(No.KYS085612006), 2013.12-2014.11.