

中图分类号：TP311
学科分类号：083500

论文编号：1028716 16-S064

硕士学位论文

无线传感器网络多路径 路由协议研究

研究生姓名	朱文志
学科、专业	软件工程
研究方向	网络与信息安全
指导教师	许峰 副教授

南京航空航天大学

研究生院 计算机科学与技术学院

二〇一六年三月

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

The Graduate School

College of Computer Science and Technology

Research on the multi-path routing protocol of Wireless Sensor Network

A Thesis in

Computer Science and Technology

by

Zhu Wenzhi

Advised by

Associate Prof. Xu Feng

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

March, 2016

承诺书

本人声明所呈交的硕士学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京航空航天大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。

本人授权南京航空航天大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本承诺书）

作者签名： 朱文志
日 期： 2016.3.28

摘 要

无线传感器网络路由协议作为传感器网络中重要的一环有着重要的研究意义，本文主要对多路径路由协议进行了研究与分析。相对于单路径路由协议，多路径路由协议在 QoS 质量和安全性上具有许多优势。本文先从能耗的角度研究了多路径路由协议，然后分别研究了多路径路由协议下的 QoS 问题和安全问题。本文的主要工作如下：

(1) 分析了多路径路由协议的能耗问题，主要针对无线传感器网络中存在的能量消耗不均衡问题进行了研究，然后提出了基于能量消耗均衡的 NUDBEMR 协议，该协议通过不均匀分区以及多路径的构建来均衡网络的能量消耗，并通过实验对 NUDBEMR 协议进行了仿真与分析。实验表明所提协议和现有路由协议相比具有良好的性能。

(2) 分析了多路径路由协议下的 QoS 问题，然后从 QoS 需求角度出发提出了 REQMR 多路径路由协议，该协议通过建立节点的可靠性评价函数，通过权重系数平衡节点的能耗和 QoS 质量要求，在建立可靠性评价函数过程中使用模糊决策的方法来确定权重。本文所提协议既可以满足应用的 QoS 需求，同时能耗较低，最后通过实验仿真对 REQMR 协议进行了性能分析与评估。

(3) 分析了多路径路由协议下的安全问题，然后提出了一个安全的多路径路由协议 TSMR 协议，多路径路由协议自身能够较好的抵抗一些攻击，该协议通过建立可信评价机制来检测网络中是否存在恶意节点，最后通过仿真实验对协议的能耗和安全性能进行了分析与评价。

关键词：无线传感器网络，路由协议，多路径，QoS，安全

ABSTRACT

Wireless sensor network routing protocol as an important part of the sensor network has great significance. This thesis mainly studies and analyzes the multi-path routing protocol. Compared with single path routing protocol, multi-path routing protocol has many advantages in the quality of QoS and security. In this thesis, we analyze the multipath routing protocols from the perspective of energy consumption, and then we study the QoS and security issues of multipath routing protocols. The main work of this thesis is as follows:

(1) First, this thesis analyses the energy consumption in multi-path routing protocol, mainly focusing on unbalance energy consumption for wireless sensor networks, and then puts forward the NUDBEMR protocol in which energy consumption is balance. The protocol uses uneven partition method and multi-path construction to balance the network energy consumption. Experiments show that the proposed protocol has a good performance compared with the existing routing protocols.

(2) Second, this thesis analyses the QoS problem in multi-path routing protocol, and then puts forward a multipath routing protocol REQMR that based on QoS demand. In the protocol we establish a node reliability evaluation function to construct the routing, and the fuzzy decision method is used to determine the weight of the reliability evaluation function. Through the weight coefficient to balance the node energy consumption and QoS, so the protocol can meet the QoS requirement and energy consumption of the application. Finally through the simulation experiment we analyse the REQMR protocol REQMR.

(3) Third, this thesis analyses security problem in multi-path routing protocol, and then puts forward a secure multipath routing protocol TSMR. The proposed multi-path routing protocol can better resist some attacks, the protocol through the trust evaluation mechanism to detect the malicious nodes on the network. Finally, through the simulation experiment we analyse the protocol energy consumption and security performance.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Routing protocols, Multipath, QoS, Security

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 无线传感器网络特性.....	2
1.2.1 无线传感器网络的特点.....	2
1.2.2 无线传感器网络的设计目标.....	3
1.3 国内外发展历程与研究现状.....	4
1.4 本文的主要研究工作及组织结构.....	5
第二章 无线传感器网络路由协议分析.....	7
2.1 无线传感器网络路由协议设计挑战.....	7
2.2 无线传感器网络多路径路由协议.....	8
2.3 无线传感器网络路由协议 QoS 问题.....	14
2.4 无线传感器网络路由协议的安全问题.....	14
2.5 本章小结	16
第三章 基于能量消耗均衡的非均匀分区的多路径路由协议.....	17
3.1 问题提出	17
3.2 问题分析	17
3.3 研究基础	18
3.3.1 多路径路由定义.....	18
3.4 协议设计	19
3.4.1 网络模型.....	19
3.4.2 能耗模型.....	20
3.4.3 算法流程.....	20
3.4.4 仿真与实验.....	24
3.5 本章小结	28
第四章 无线传感器网络基于可靠评价的 QoS 多路径路由协议.....	29
4.1 问题提出	29
4.2 问题分析	29
4.3 协议设计	30

4.3.1 网络模型与能耗模型.....	31
4.3.2 算法流程.....	32
4.3.3 实验与分析.....	38
4.4 本章小结	42
第五章 无线传感器网络安全多路径路由协议.....	43
5.1 问题提出	43
5.2 问题分析	43
5.3 协议设计	45
5.3.1 网络模型与能耗模型.....	46
5.3.2 算法流程.....	46
5.3.3 实验与分析.....	50
5.4 本章小结	53
第六章 总结与展望	54
6.1 工作总结	54
6.2 未来工作展望	54
参考文献	56
致谢	60
在学期间的研究成果及发表的学术论文.....	61

图表清单

图 2.1 GAF 状态转移图.....	9
图 3.1 分层示意图	22
图 3.2 各种协议生成的簇首数目分布统计	25
图 3.3 存活节点数量	26
图 3.4 剩余总能量	27
图 4.1 层次结构图	35
图 4.2 存活节点数量	40
图 4.3 网络剩余总能量.....	40
图 4.4 数据包投递率	41
图 4.5 端到端时延	42
图 5.1 入侵检测框架	45
图 5.2 安全检测机制流程图.....	48
图 5.3 存活节点数量	51
图 5.4 网络剩余总能量.....	51
图 5.5 协议的网络投递率.....	52
图 5.6 协议的丢包率	52
图 5.7 识别率和误判率与恶意节点数量关系图.....	53
表 3.1 实验参数列表	24
表 3.2 存活节点数	27
表 3.3 每轮网络的剩余能量.....	28
表 4.1 量化取值表	35
表 4.2 不一致性指标	37
表 4.3 实验参数列表	39
表 5.1 实验参数列表	50

注释表

N	传感器节点	$(sink.x,sink.y)$	基站位置
M_s	正方形网络区域边长	$Popt$	最优簇头数目比率
d	发送与接收节点之间的距离	$CFun$	簇头选择评价函数
d_o	节点距离的阈值	$E_{cur}(i)$	节点当前能量
Num	传感器节点个数	D_x	基站到传感区域最短距离
E_{elec}	发射、接受电路能耗	dr	节点所处圆形区域半径
E_o	节点的初始能量	$Rvalue$	可靠性评价函数
ε_{fs}	自由空间下的信号放大能耗	$Tvalue$	可信值评价函数
ε_{mp}	多路径衰减下的信号放大能耗	E_{Tx}	传感器节点发送能耗
E_{DA}	数据融合能量消耗	E_{Rx}	传感器节点接收能耗
ar	数据融合比率	r	网络当前轮数
k	簇头数目	T_{round}	网络周期
p	簇头数目比率	G	未当选簇头的节点集合

缩略词

缩略词	英文全称
WSN	Wireless Sensor Network
BS	Base Station
N	sensor Node
GPS	Global Positioning System
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
TDMA	Time Division Multiple Access
DA	Data Aggregation
CPL	Control Packet Length
DPL	Data Packet Length
QOS	Quality of Service
EEUC	Energy Efficient Uneven Clustering algorithm
ECHERP	Energy efficient routing in wireless sensor networks through balanced clustering
NUDBEMR	Non-uniform distribution Multi-path Routing Based on Balanced Energy Consumption
REQMR	Qos Multi-path Routing Based on Reliable Evaluation
TSMR	Secure Multi-path Routing Based on Trusted Value

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

随着各种技术的进步,无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)的相关技术及应用得到了国内外学者的广泛研究。WSN 是一门学科交叉度高,知识集成度高的技术。WSN 技术所应用到的技术有传感器技术、微电子机械系统(Micro Electro Mechanism System: MEMS)以及现代网络和无线通信技术^[1],这些技术共同推动了 WSN 技术的发展。无线传感器网络可以感知客观世界的物理信息并传输到网络中,为人们直接获取客观世界的真实有效的信息提供了便捷的手段,丰富了人们获取信息的手段。WSN 技术最早被用于军事中,并获得显著的效果^[1]。随着 WSN 技术的日渐成熟,在传统的工业及农业中也开始应用 WSN 技术,在现代化的智能城市与家居等应用中 WSN 技术更是得到了充分的应用。

2002 年美国 Intel 公司发布了一个新的计算发展规划,该规划是基于微型传感器网络技术^[2]。在该规划中指出 Intel 将着力于研究 WSN 技术在医学、环境以及海洋和太空探索等领域的应用。使用无线传感器网络可以方便的监测环境及野生动植物并且不会干扰到其正常生活,伯克利实验室的研究人员计划在一个岛屿上进行相关的实验,部署的传感器具有感知温度、湿度以及气压的功能。在 2003 年,WSN 技术被美国《技术评论》杂志评述为未来十大新兴技术之首,美国《今日防务》杂志更认为 WSN 的应用和发展将造成未来军事技术和未来战争的划时代的改变^[2]。

(1) 军事领域的应用。由于无线传感器网络具有容易部署并且节点密度大以及位置随机的特点,使其应用成本低并且不易被发现,因此在侦察战场中具有其他手段所不具备的优势。早在越战时期 WSN 就获得了成功的应用,美军通过部署的传感器来跟踪越南的运输车队,取得了良好的效果。美国国防部已投资大学进行智能尘埃传感器技术的研发。

(2) 工农业领域的应用。工农业是无线传感器网络使用的另一个重要领域。通过无线传感器网络,能够实时的获取的土壤温湿度变化以及空气中酸碱度和二氧化碳浓度的变化,对于动植物的生长状况,是否发生病虫害也能及时的发现,使人们能够及时发现农业生产中存在的问题。WSN 技术的使用推动了农业生产从以人为中心逐渐过渡到以信息和软件为中心的生产模式。在国内外已经有相关的 WSN 技术产品得到示范性应用。在矿井以及核电厂等危险的工业作业环境中,利用 WSN 可以对工作现场工人的身体状况以及工作环境的变化进行监控,防止险情发生,可以更好的保障工人的生命安全。

(3) 医疗领域的应用。WSN 技术在医疗方面也展现了其独特的优势,通过佩戴感知设备可以

随时的获取病人的生理数据，当病人发生异常情况时可以及时的通知医护人员进行抢救。利用无线传感器网络还可以监控患者的行动，能更好的保证患者的安全。罗彻斯特大学科学家的一项研究利用微尘传感器构建了一个居住环境，能够监测居住者的体征以及活动状况。

（4）环境监测和预报方面的应用。在环境监测中利用无线传感器网络可以获取空气情况，监测土壤的变化，动物的迁徙以及地表的情况，还可用于降雨监测、河流的水位变化等。科研人员通过无线传感器网络获取的数据可以据此对环境的变化做出一定的预测，例如当预测到将暴发山洪时可以让人们提前做出相应的预防措施。

（5）智能城市与家居领域的应用。在城市交通中利用 WSN 技术可以监测道路状况以及污染指数，从而进行合理的调度达到环境保护的目的。早在 1995 年，美国交通部就提出了一项智能交通计划，在该计划中将利用 WSN 来进行交通管理，可以对汽车的行驶速度、车距等进行智能的控制，还可以向驾驶员推送道路信息避免道路拥堵^[3]。在智能家居应用中可以通过在家具以及家电中嵌入传感器并组成网络，用户可以通过远程设备对家庭进行监控，还可以通过远程设备对家电进行遥控以完成一些工作，例如下班之前远程操纵设备进行煮饭等活动。通过 WSN 可以构建一个智能的家庭环境，提供给人们一个舒适便捷的智能家居环境。

作为一项新兴的技术，WSN 技术拥有广阔的应用前景。因此 WSN 技术得到了国内外众多学者及科研机构的广泛研究。随着通信技术、嵌入式技术以及传感器技术的发展，未来的传感器将更加智能化、更加微型化。

1.2 无线传感器网络特性

1.2.1 无线传感器网络的特点

WSN 和传统的无线网络相比有一些相同的特征，但是也有许多的不同点。例如两者都具有自组织的特点，但是传统的无线网络 Mobile Ad hoc Network (MANET) 没有能量的限制。WSN 技术的一些特点如下：

（1）传感器节点具有集成化特点。传感器节点具有功耗低、体积小、价格便宜的特点，实现了较高的集成化。其中微机电系统技术的发展为传感器实现集成化提供了技术支持，使得传感器节点具有体积小等特点。

（2）传感器节点部署密集。因为传感器节点具有成本低的优点，所以可以通过增加监测区域的节点密度来提高获取信息的精确性。因此在监测区域中节点的部署通常非常密集，其密集程度是 MANET 的几个数量级。

（3）由电池供电且资源有限。在无线传感器网络中节点使用的是不可充电的电池且使用环境通常比较恶劣，因此难以对传感器节点进行电池的更换或者对电池进行充电，所以传感器节点的能

量是非常有限的。因为传感器节点体积小，集成度高，所以传感器节点的计算能力和存储量也是有限的，一般情况下节点的计算和存储能力是很小的。

(4) 传感器节点自动工作。在无线传感器网络中节点的部署通常是随机的。并且除了基站外，各个节点地位相等，传感器节点通过相互之间的通信，更改相应的配置，从而形成一个通信网络。

(5) 不可靠性和数据冗余。在无线传感器网络中由于节点的分布是随机性的，并且通常节点的密集度比较高，因此同一观测对象可能位于多个传感器节点的感知范围，该对象的数据同时被不同的节点捕获并发送到网络中。因此在网络中的数据通常是冗余的或者数据间具有相关性。

(6) 多对一的数据流向和频繁的拓扑变化。在大多数传感器网络应用，通过节点传感器感应到的数据从多个源传感器节点流向特定的会聚节点，从而表现出多对一的流量模式。无线传感器网络存在网络拓扑变化频繁这一特点，由于节点故障、损坏、能量耗尽、或信道衰落等因素，导致网络拓扑结构经常变化。

1.2.2 无线传感器网络的设计目标

在 WSN 的应用中，不同的应用具有不同的需求。但是无线传感器网络的主要设计目标大体是相同的，本文将其分为 3 个大目标，其一是对于传感器节点的要求，其二是对于传感器网络的组网要求，最后是对服务质量的要求。

(1) 传感器节点目标。对于无线传感器网络的节点而言，设计目标是其拥有较小的尺寸，较低的成本和低的功耗。由于很多的无线传感器网络应用于恶劣的环境中，传感器节点的部署困难，并且节点不可回收或者回收困难，较小的尺寸可以方便传感器节点的部署，同时可以降低节点的生产成本。传感器节点使用不可充电电池进行供电，能量及其有限因此需要减少节点的能量消耗。较小的传感器尺寸有利于降低节点的功耗。

(2) 传感器网络组网的要求。对于无线传感器网络而言，希望其具有可扩展性、自配置、适应性、高的信道利用率等功能。由于无线传感器网络的节点规模不固定，可以为几十个到几千或者几万个，所以要求 WSN 具有可扩展性。在 WSN 中当传感器节点部署完成时，传感器节点应该能够自发组织起来，形成一个通信网络，并在网络拓扑结构变化和节点故障等情况下重新配置网络连接。在无线传感器网络中，节点在能量耗尽失败、节点移动或者有新的节点加入这些情况时网络的拓扑将发生变化。因此设计的 WSN 路由协议要能在拓扑变化时对网络进行重新配置。

(3) 网络质量。良好的可靠性、较高的容错性、安全性和 QoS 要求是对一个网络的基本要求。容错能力可以使网络中出现故障时继续工作，因此希望传感器节点具有容错功能并且具

有自我测试, 自校准, 自修复和自恢复等功能。在 WSN 中采取有效的安全机制可以防止非法的数据访问并且避免一些恶意攻击。在 WSN 中不同的应用对服务质量(Quality of Service, QoS)要求不同以防止交付延迟和数据包丢失, 因此传感器网络应考虑特定应用的 QoS 要求。

1.3 国内外发展历程与研究现状

传感器网络技术从 1986 年问世, 发展到现今已经过了将近三十年时间, 从提出到研究再到大量应用, 期间经历了多个发展时期。第一代传感器网络采用直接点对点传输技术来构成网络, 时间是 20 世纪 70 年代, 可谓传感器网络的雏形; 随着技术的发展, 尤其是硬件上的提升, 第二代传感器网络随之问世, 这个时期的网络通常采用串/并接口将传感器相互连接起来; 到了 20 世纪末 21 世纪初, 由于人工智能的发展, 利用现场总线将具有一定智能的传感器相连而构成网络代表着第三代传感器网络的普及。而到现今传感器网络成为新的时代标志。

无线传感器网络的发展很大程度上来源于国家军事项目的研究, 由于该技术的适用性, 在现代战争中能够发挥至关重要的作用, 国外尤其是欧美国家早在 1993 年就开展了各种研究工作。1999 年随着“物联网”概念的提出, 无线传感器网络的发展又进入了一个更加高速的发展时期, 不仅是军事上, 在各种民用项目中也得到了很大推广应用。

(1) 国外方面。许多西方发达国家对于无线传感器网络的研究一直非常关注, 而如美国更是投入了大量人力和物力, 其在该研究领域也一直处于领先者和开拓者的地位。早在 20 世纪 90 年代, 美国的高校就开始从事无线传感器网络的研究, 另外美国的许多机构和公司也通过与高校合作加入到这个领域的研究中, 如美国麻省理工学院在 DARPA、APL、HP 等机构和公司的支持下开启了 μ AMPS 研究计划。于此同时, 各种会议开始大量收录无线传感器网络的相关论文。2001 年, 美国计算机协会(ACM)和 IEEE 成立了第一个面向无线传感器网络的会议(IPSAN), 该会议成为了无线传感网络技术的一片新的技术园区, 为其发展做了巨大贡献^[4]。2008 年“物联网”的概念被再次提出并且注入了新的活力, 在苏黎世举行的全球首个国际物联网会议“物联网 2008”上, 各种新理念和新技术被不断提出, 为物联网的再次发展奠定了基础^[5]。这次会议也促成了“智慧的地球”的概念的提出, 引导了美国新政府的投资方向。由于无线传感器网络技术与“物理网”有着先天上的联系, 这引发了无线传感器网络的又一次高速发展。国外其他国家如日本、德国、英国, 意大利等国家也很快将无线传感器网络的研究列为各自国家发展的重要战略目标, 并且迅速展开了大量的研究工作。期间欧盟的第六个框架计划将“信息社会技术”作为优先发展领域之一, 其中无线传感器网络技术被多处点出, 作为重点目标。

(2) 国内方面。国内关于无线传感器网络的研究, 整体来说起步较晚, 直到 2001 年国家才开始关注这方面的信息, 但发展速度却非常迅速。2001 年, 中科院成立了微系统研究与发展

中心，旨在推动国内的传感器网络技术的发展。紧接着次年，中国国家自然科学基金委员会就开始部署一系列的传感器网络的相关课题^[6]。经过 7 年的研究发展截止 2008 年底，中国国家自然科学基金一共参与支持了面上项目 111 项、重点项目 3 项；国家“863”计划资助支持了 30 余项，“973”计划也特别成立了 2 项面向传感器网络的项目^[7]。在“中国未来 20 年技术预见研究”提出的 157 项重要技术课题中与无线传感器网络直接相关的课题就达到了 7 项。在 2008 年中国工业与信息化部启动的国家级重大专项中有一个子专题“短距离无线互联与无线传感器网络研发和产业化”，该项目直接把无线传感器网络的产业化定为了目标。与此同时国家领导人也对该项产业表现了足够的重视程度，2009 年温家宝在无锡发表了重要演说，当月 24 日，中国移动总裁王建宙响应国家政策提出了中国的“物联网”理念^[8]。随着我国对物联网发展的关注，“物联中国”、“感知中国”、“智慧城市”、“智慧交通”等新型概念不断提出，无线传感器网络技术作为其中不可或缺的一项技术在国内得到了更深入的快速发展。

1.4 本文的主要研究工作及组织结构

无线传感器网络由于其网络的特性，在网络的各个层次都可以衍生出大量的研究内容，本文主要研究的是 WSN 的路由协议。本文首先分析 WSN 的相关背景知识，随后介绍了无线传感器网络的特点与研究目标。在路由协议中对现有的路由协议进行了分析与研究，从而总结出路由协议设计面临的主要问题。最后本文分别从多路径路由协议的能耗，多路径路由协议的 QoS 和多路径路由协议的安全方面进行了研究。

第一章 绪论。该部分主要介绍 WSN 的研究背景和意义，并对 WSN 的特点和设计目标进行了分析，随后介绍了国内外发展历程与研究现状，本章从这三个方面对本文的背景知识做了一个介绍，最后对本文各章节的组织结构做了一个详细论述。

第二章 WSN 路由协议分析。本章首先对现有的路由协议进行了分析，并研究了路由协议设计所面临的一些问题，随后分析了 WSN 中的能耗问题、QoS 问题以及安全问题。最后是对本章的总结。

第三章 基于能量消耗均衡的非均匀分区的多路径路由协议。首先，本章分析了无线传感器网络中多路径路由协议存在的能量空洞问题，然后提出了一种非均匀分区的方法，通过非均匀分区以及多路径路由构建可以有效的均衡能量的消耗。接着对所提的 NUDBEMR 协议进行了实验仿真并对协议的能耗性能进行了分析。最后是对本章的总结。

第四章 无线传感器网络基于可靠性评价的 QoS 多路径路由协议。首先，本章分析了无线传感器网络的服务质量要求，随后通过对多路径路由协议的分析发现其在 QoS 方面有独特的优势，以此提出了 REQMR 路由协议，该协议通过一个可靠性评价函数来构建多路径。随后通过

实验仿真对 REQMR 协议进行了性能分析与评估,从协议的能耗、时延和投递率等方面进行综合评价。最后是对本章的总结。

第五章 无线传感器网络安全多路径路由协议。在本章首先分析了 WSN 的安全问题,然后分析了不同攻击方式造成的影响,通过分析发现多路径路由协议在对抗一些攻击上具有天然的优势,再配合节点的可信评价机制可以有效的发现恶意节点,由此提出了 TSMR 路由协议。并通过实验仿真对 TSMR 协议进行了性能分析与评估,实验从能耗、投递率以及识别率和误判率多个方面进行综合评价。最后是对本章的总结。

第六章 总结与展望。主要对本文所作的研究工作进行了总结,分析工作中还存在的不足,然后是对将来能够进行的研究内容进行了展望,期待在解决不足的同时研究工作能够更进一步。

第二章 无线传感器网络路由协议分析

2.1 无线传感器网络路由协议设计挑战

在 WSN 中设计路由协议必须综合考虑网络的资源、网络的特性以及应用的需求。由于传感器节点的能量及计算能力有限，要求了路由协议必须高效节能，同时协议必须考虑节点的处理和存储能力。对于有 QoS 要求的特定场合，设计的路由协议需要能够满足一定的 QoS 要求。对无线传感器网络路由协议设计面临的主要问题可以从物理限制、网络特性和应用需求归纳为以下三个方面：

(1) 能量及硬件资源限制。在 WSN 中的节点使用不可充电电池进行供电，并且其工作环境导致电池不能更换，因此能量资源有限。此外，当传感器节点的剩余能量达到一定阈值时，传感器节点将不能正常工作。因此路由协议设计的目标是降低能耗，提高能量利用率。

由于传感器节点是高度集成化的，其所拥有的存储和计算能力是非常有限的，只能执行有限的计算功能，而基站的计算和存储能力通常是不受限制的，因此在设计无线传感器网络路由协议时需要考虑节点的计算和存储能力，考虑节点和基站之间的平衡，将一些计算交给基站进行。

(2) 网络特性的限制。传感器节点的部署问题，无线传感器网络的节点部署依赖于具体的应用，所以部署可能是随机的，例如在战场上以及环境监测时；或者人工进行部署，例如在智能家居中，部署的具体位置是完全可以确定的。但是在大多数的应用中，传感器节点是随机的部署在一个无法访问的预定区域，如果最终节点的分布是不均匀的，那么进行一个合理的聚类，可以优化网络的连接节省能耗。

网络环境的不可靠性限制。一个无线传感器网络通常工作在动态的和不可靠的环境中。在 WSN 中经常出现节点出现故障从而导致由网络的拓扑结构变化。因此路由协议设计要考虑网络的拓扑结构变化，以保持特定应用的网络覆盖和联通要求。

由于传感器节点可能会产生显著的冗余数据，因此从多个节点发出的相同包可以被聚合，从而使得传送的次数减少。在多个路由协议中数据聚合技术已被用来实现节能和数据传输优化。

(3) 多样化应用的限制。在 WSN 中不同的应用需求不同，有的要求能耗低，有的要求可靠性高，而有的要求时延低。路由协议在提高能量利用效率的时候，可能会降低数据的 QoS 质量，两个需求不能同时满足，因此设计协议时可以根据需要满足其中的部分条件。

2.2 无线传感器网络多路径路由协议

在 WSN 路由协议中, 现有的无线网络的路由协议并不适合于传感器网络。传统的无线网络没有能量的限制并且计算能力比较强大, 相比于 WSN 其约束条件更少, 因此其路由协议只需要考虑网络拓扑的变化, 而在 WSN 的路由协议中则必须考虑 WSN 网络的特性。国内外的研究者针对 WSN 的特点提出了许多适合于 WSN 的路由协议, 这些协议充分考虑了 WSN 能量有限等特点, 因此可以有效的满足不同的应用需求。本文通过对经典的路由协议进行分类以及分析来研究 WSN 的特点以及路由协议设计应注意的问题。

根据不同的分类方法路由协议可以有多种分类结果。因此同一种路由协议可能同时属于多种不同的路由协议。现有的路由协议分类主要有平面型路由协议、层次型路由协议、基于位置的路由协议、基于动态性的路由协议以及基于路径的单路径路由协议和多路径路由协议。本文主要对多路径路由协议进行分析

(1) 平面型路由协议

在该类协议中不对网络中的节点进行人为的划分, 节点承担相同的任务。平面型路由协议具有一些优点, 例如可以用很小的开销来保持节点间的通讯。典型的平面型路由协议有 Flooding^[7]、SPIN^[8]、DD^[9]、SAR^[10]和 Rumor^[11]等路由协议。Flooding^[7]是由 Lim H 等人提出的早期的路由协议, 其优点是不需要路由信息维护的开销, 避免了计算网络拓扑带来的能量消耗, 实现简单, 具有一定的容错性; 缺点是存在信息内爆、重叠和资源使用浪费的问题, 容易造成部分节点提前死亡。

(2) 层次型路由协议

在该类型的协议中, 通过对节点进行分类从而定义出不同的网络结构, 可以减少不必要的能量消耗并且增加网络的稳定性和可扩展性。在这一类型的协议中, 通过聚簇对网络进行划分, 并选择其中剩余能量较高的节点担任簇头节点。簇头负责在簇与簇之间进行数据的传递, 担当中继节点。聚簇可以减少能量消耗, 延长网络生命周期, 平衡网络的能量消耗。在层次型路由协议中, 簇头节点比其他节点能量消耗更快, 从而更早死亡, 造成某个区域的节点无法与整个网络连通, 从而形成能量空洞。典型的层次型路由协议有 LEACH^[12]、PEGASIS^[13]、HEED^[14]、TEEN^[15]等协议。

LEACH^[12]协议是第一个提出对无线传感器网络进行层次聚簇的算法。LEACH 协议通过循环的方式来周期性的选择节点担当簇头。在 LEACH 协议不再对簇进行区别, 即簇是类似的, 节点不与基站直接通信而是交由簇头进行。LEACH 的操作分为两个阶段, 第一个阶段是簇的建立, 该阶段的主要工作是将网络分簇, 簇首的选择以及调度机制的建立; 第二个阶段是稳定传输阶段, 该阶段收集数据, 并将数据传输到目标节点。LEACH 协议不需要知道网络的整个

知识, LEACH 通过减少节点与其簇头之间的通信消耗和尽可能关闭非簇头节点的工作来降低网络的能量消耗。LEACH 采用单跳通信方式, 使其不适用于大规模传感器网络, 此外 LEACH 不能保证簇头分布均匀, 可能造成能量空洞。

(3) 基于位置的路由协议

该类协议的优点是数据的发送是有方向性的, 即数据可以只发送到目标区域而不是整个网络中, 减少了不必要的能量消耗。基于位置的路由协议能够找到一条从源节点到目标节点的最优路径, 避免无用的传播。该类协议的缺点是节点必须知道网络中其他节点的地理位置信息。典型的基于位置的路由协议有 GAF^[16]、GEAR^[17]、TBF^[18]等路由协议。

GAF^[16]是一个地理自适应路由算法。GAF 首先是在无线自组网中被提出的一种能量感知路由协议, 由于该协议可以有效的节约能耗, 因此被应用到无线传感器网络中。GAF 的设计是基于这样一个能量模型: 无线传感器网络中能量的消耗产生于数据包的发送和接收, 以及空闲时间传感器节点监测是否有数据需要发送和接收。在 GAF 协议中通过在保持传感器网络一定的连通水平下关闭一些不必要的节点来降低网络的能量消耗。在 GAF 协议中, 传感器网络区域被划分成方格, 每个传感器节点使用其自身的位置信息让其与一个特定的网格相关联, 这种关联是 GAF 利用来确定数据包转发是否有效的。GAF 协议的特点是可以让传感器节点处于不同的状态从而节省能量的消耗, 如图 2.1 所示:

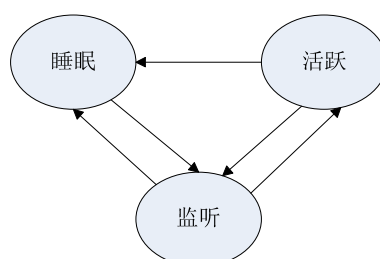


图 2.1 GAF 状态转移图

如图 2.1 所示, 当传感器处于睡眠状态时, 其关闭发射器以节省能量。在监听状态, 传感器通过和其他节点交流信息了解其他传感器的状态。在 GAF 协议中, 每个网格只有一个传感器节点处于活跃状态以最大限度地节省能量的消耗, 活跃节点的选取基于传感器节点的剩余能量。

GEAR^[17] (Geographic and Energy Aware Routing) 是一种能够查询到目标区域路径的节能路由协议。在 GEAR 协议中节点需要感知位置的硬件以使其知道传感器自身的位置。此外, 传感器节点不仅知道自身的剩余能量还知道网络中其余节点的剩余能量及其位置。GEAR 使用地理位置信息来选择一条能量有效的路径到达其目标区域, 然后在目标区域内使用递归地理转发算法传播数据。

(4) 单路径路由协议

根据路由协议的路径数目划分协议可以分为单路径路由协议和多路径路由协议，单路径路由协议是在数据从源节点到目的节点的传输中只存在一条路径。典型的单路径路由协议有 PEGASIS 协议^[13]、TEEN 协议^[15]、HEED 协议^[14]等。

PEGASIS 协议^[13]是 LEACH 协议的扩展协议。PEGASIS 通过将传感器节点组成一条链，使每个节点只能从一个邻居发送和接收信息。数据被收集后从一个节点移动到另一个节点上，最终聚集和发送到基站。PEGASIS 链的构建方式是使用贪婪的方式进行，在 PEGASIS 中通过随机选择的方式来选择簇头节点，在每轮中从链上的节点随机选择一个作为簇头，因此没有分簇造成的开销。PEGASIS 虽然避免了 LEACH 动态分簇带来的开销，但其仍需要动态拓扑，由于传感器节点的调整需要知道其邻居节点的能量状态，以知道如何进行路由，这种拓扑调整将带来额外的开销。

HEED 协议^[14]扩展了 LEACH 协议，它通过利用节点的剩余能量和节点的密度信息作为参数来优化簇的选择从而实现能量消耗的平衡。HEED 使用多跳通信方式，HEED 可以自适应的调整簇内节点的通信功率。HEED 协议追求的是能量消耗的平衡，聚类过程所需要的迭代次数有限，最大限度地减少控制过程所带来的开销以及产生均匀分布的簇头和节点聚集好的簇。HEED 算法周期性的根据节点的剩余能量作为主参数和簇内节点的通信成本作为次参数来选择簇头，其中主参数主要用来概率性地选择一组初始簇头，而次参数用来平衡能耗。HEED 算法所形成的簇头均衡的分布在网络中，因此协议可以有效的降低能量消耗，但是还不能满足无线传感器网络的全部需求。

TEEN 协议^[15]也是一种层次型路由协议，该具有实时感知的能力，属于主动型传感器网络，不同于 LEACH 的响应式。在 TEEN 协议中，节点感知到数据后发送给簇头节点，簇头节点对数据进行一个过滤后发送给下一级的簇头直到基站。在 TEEN 协议中簇头是否对收到的数据进行转发取决于软硬两个阈值，第一次收到数据时对该数据进行转发，此后只有监测到的数据超过硬阈值且其与上次上报数据的差值绝对值大于软阈值时传输数据。TEEN 协议的过滤机制减少了冗余数据的传输，减少了不必要的能量消耗。但是该协议不适用于需要周期性采集数据的应用中，因为用户有可能因为数据未达到阈值而收不到任何数据，限制了该协议的应用场景。

（5）多路径路由协议

与单路径只找一条从源节点到目标节点的最短路径不同，在多路径路由协议找到前 k 条最短的路径并在这些路径中找到一个平衡的负载。现有的多路径路由协议较多，这些多路径路由协议主要有三种不同的工作方式：不相交路径、相交多路径、多对一的路径。

不相交路径：无线传感器不相交路径多路径路由协议是一类多路径路由协议，在这类路由协议中协议找到几条相互之间没有共同传感器节点的备用路径，并且和主路径之间也没有共同

的传感器节点。在这类协议中主路径比备用路径好，具有更短的延迟时间。因为不相交，使得备用路径独立于主路径，因此当主路径上发生故障时不会影响备用路径的使用。汇聚节点可以在网络建立后通过一些样本来确定网络的延迟，从而判断哪个邻居节点可以提供高质量的数据传输。虽然不相交多路径路由协议具有高的容错性，但是由于备用路径一般较长所以损失了一定的能耗性能。

相交多路径：相交多路径路由协议是取消一些限制的部分不相交多路径路由协议，该类路由协议允许主路径和备用路径之间拥有一部分的共同节点。构建相交多路径路由协议，首先建立一条主路径，然后对于主路径上的每个传感器节点计算不包含该节点的从源节点到目标节点的最优路径。最好的备用路径是那些和主路径不相交的路径叫做理想路径，其次是那些接近主路径的备用路径。因此在主路径和备用路径上的能量消耗和情景相关。

多对一多路径发现路由协议：多对一的多路径发现路由协议是基于简单的泛洪源传感器，它由两个阶段组成，即分支泛洪阶段和多路径扩展阶段。两个阶段使用相同的路由消息格式，其中包含了消息类型。这种多路径发现路由协议为每个节点产生不相交的多路径。

多路径路由协议是一类重要的路由协议，一些典型的路由协议既是多路径路由协议，如 Flooding 协议^[7]，DD 协议^[9]等，而一些典型的路由协议则既可用于多路径，也可用于单路径，如 SPIN 协议^[8]，TBF 协议^[18]，SAR 协议^[10]等。

DD 协议^[9]（Directed Diffusion）是一种定向扩散的路由协议。在 DD 协议中节点通过泛洪的方式来通知其他节点自己需要的消息，DD 协议通过在传感器节点中建立从数据源到基站的反向传输路径，从而达到消除冗余数据的目的。通过这种方式可以减少发送的数据，减少能量的开销。该协议的缺点是广播泛洪操作会造成额外的开销。

SPIN^[8]协议设计改进了经典泛洪协议，克服它们可能出现的问题，例如：信息内爆和重叠。SPIN 协议是一个资源自适应算法，SPIN 协议能够计算出不同操作消耗的能量，因此能够更高效的利用资源。SPIN 协议的两个关键机制是协商和资源自适应，SPIN 协议通过协商机制来避免在网络中发送冗余的数据，SPIN 可以说出它想得到的数据，从而避免信息重叠。有两种系列的 SPIN 协议：SPIN-PP 和 SPIN-EC。SPIN-PP 使用了一种协商机制来降低传感器的消耗，SPIN-EC 采用节约能源资源的感知机制。这两种协议都允许传感器之间相互交换信息，从而获得他们所需要的数据。SPIN-PP 是一个三阶段的握手协议，此协议适用于使用点对点传输媒体，其中两个传感器可以完全相互连通而不受其它传感器的干扰。SPIN-BC 是 SPIN-PP 协议的改进，通过使用一对多而不是多个一对一的通信方式。它也是一个三阶段的握手协议适用于广播传输介质，其中在网络中的传感器与通信相互使用单个共享信道。SPIN-EC 不同于 SPIN-PP 在于它考虑到传感器的剩余能量。如果传感器有充沛的能量，SPIN-EC 和 SPIN-PP 等价，并因此具

有相同的三个阶段。然而，当一个传感器具有低的残余能量时，SPIN-EC 参与到数据传播过程中的控制。SPIN 协议系列适用于无损网络。

TBF^[18] (Trajectory-Based Forwarding) 是一种以路径为基础的转发协议。TBF 协议适合于节点密集的网络，并且需要定位装置，如 GPS，以使传感器节点能够定位自己的位置并估计自己和邻居节点的距离。TBF 协议在数据包中指出路径传输的参数，但没有明确指出逐跳上的路径，而是根据贪婪算法确定最靠近传输轨道的下一跳节点。TBF 协议的路径维护不受网络拓扑变化的影响因为路径信息不包含节点的 ID。为了提高网络的可靠性，也可以在 TBF 协议中实现多路径路由。

(4) 基于动态性的路由协议

无线传感器网络的动态性给路由协议的设计带来了新的挑战，由于传感器网络的动态性因此需要设计的路由协议能保证从源节点到目标节点的数据传输。典型的基于动态性的路由协议有 SEAD^[19]、Joint Mobility and Routing^[20]、Data mules^[21]、Dynamic Proxy Tree-Base Data Dissemination schemes^[22]等路由协议。

SEAD^[19] (Scalable Energy-Efficient Asynchronous Dissemination) 协议是一个自组织协议，这个协议考虑了最小化转发延迟和降低能量消耗之间的平衡。SEAD 协议考虑将源传感器节点感知到的协议发送给多个接收节点。SEAD 协议由三个部分组成，传播树组件、数据传播和链路的保持。SEAD 协议中的传感器节点具有感知自己地理位置的能力。

Luo J 等人提出了 Joint Mobility and Routing^[20]协议。在一个静态网络中存在着一个严重的问题，即能量收缩问题，位于传播路径周围的节点由于需要承担中继转发的任务因此会快速地耗尽其能量，从而造成能量空洞，导致部分网络断开。即使汇聚节点位于传感器网络的中心区域仍然存在这个问题，为了解决这个问题，采用可以移动的汇聚节点来收集源传感器感知到的数据。在这种情况下，在汇聚节点周围的传感器随着时间而变化，从而所有的节点都有机会担当发送数据到汇聚节点的中继节点，因此可以平衡网络的能量消耗。

Data mules^[21]协议的提出是为了解决稀疏网络条件下保证高效连接的同时降低网络的能量消耗。该协议是一个基于移动实体的三层体系结构，即移动泛在网络的扩展 (mobile ubiquitous LAN extensions, MULE)。MULE 架构有三个主要的层次，位于底层的用于感知环境的静态传感器节点。位于顶层的负载 WAN 接入的设备和接入点及中央存储库，负责分析感测到的数据，这些接入点能够同步采集到的数据，过滤冗余数据。中间层具有移动实体 (MULE) 负责在传感器区域移动，并在接近源传感器时从其收集源传感器感知到的数据。MULE 架构可以降低能量的使用，同时网络中节点的能量消耗均衡，避免能量空洞的形成。此外，MULE 基本设施成本低，并且因为源传感器和 MULE 直接进行通信，不存在路由开销。MULE 协议的缺点是如果

一个 MULE 失败，那么会降低稀疏网络的性能，降低数据发送的成功率，并增加延迟。由于 MULE 协议具有较高的延迟，因此不适用于时间要求严格的应用。

(6) 基于 QoS 的路由协议

在 WSN 中除了能耗服务质量也是非常重要的，一些应用就有 QoS 要求。由于提高无线传感器网络的 QoS 性能往往是以降低网络的能耗为代价的，因此平衡网络的能耗和 QoS 要求是基于 QoS 的路由协议应考虑的问题。典型的 QoS 类路由协议有：SAR^[10]、SPEED^[23]、Energy-aware routing^[24]等路由协议。

SAR^[10] (Sequential Assignment Routing) 路由协议是第一个引进 QoS 概念的路由协议之一。SAR 是一个表驱动的多路径路由协议以此实现高效的能量利用和容错性能。在 SAR 上的路由策略是由三个因素决定的：能量资源，每条路径上的 QoS 质量，以及每个数据包的优先级。SAR 协议通过考虑每条路径上能量资源，QoS 质量和数据包的优先级以汇聚节点周围的节点构建树从而确定多路径。随后根据这些路径上的能量资源和 QoS 质量选择一条作为传输路径。故障恢复机制是通过强制执行每条路径上上游节点和下游节点的路由表的一致性来完成。SAR 算法的目标是在降低网络能量消耗的同时保证 QoS 质量。如果由于节点的失败导致拓扑的变化那么就会启动路径恢复过程。SAR 与只考虑能量度量的路径能量消耗最小的协议相比，其性能更好。SAR 协议的缺点是不适用于大型的拓扑变化频繁的网络。

SPEED^[23] 协议是无线传感器网络路由协议中的另一个 QoS 路由协议。SPEED 协议提供实时端到端保证。SPEED 协议要求每个节点维护和它有关的邻居节点的信息并且使用地理转发来发现路径。SPEED 协议确保每一个数据包按一定的速度传播，由此每个应用程序在决定发送数据包之前可以通过节点到基站的距离除以数据包的传播速度来估算端到端的延迟。此外在网络拥挤时 SPEED 协议可以提供拥塞避免。SPEED 协议上的路由模块被称为无状态地理不确定转发模块 (Stateless Geographic Non-Deterministic forwarding, SNGF)，并与其它四个模块工作在网络层。SPEED 利用信标交换机制来收集节点的信息及其位置。在每个节点上的延迟时间估计是通过收到邻居节点对所发送数据包的 ACK 响应所经过的时间来计算的。随后 SNGF 模块通过查看延迟时间来选择满足速度要求的节点。如果找不到满足要求的节点，则查看节点的转发比率。SPEED 协议和 DSR、AODV 协议相比具有更短的端到端延迟和更低的失败比率，并且由于 SPEED 协议路由算法简单，控制数据包的开销小，流量消耗均衡，因此能量消耗低，生命周期更长。SPEED 协议的负载均衡是通过 SNGF 模块将分散的数据打包成一个大的数据区实现的。

能量感知 QoS 路由协议 (Energy-Aware QoS Routing Protocol^[24])。在这个能量感知路由协议中，通过成像传感器来实时收集网络的状况。该协议扩展了文献提出的路由协议，从而找到

一条在网络连接中满足一定端到端延迟要求的能量有效的路径。链路质量是由网络中节点的剩余能量、传输能量、误码率和其他通讯参数来衡量的。为了使服务和实时链路状况最优，引入了基于类的排队模型，该模型允许服务分享实时和非实时的流量。该协议通过扩展的 Dijkstra 算法来找到一组能量消耗最少的路径然后从中选出一条满足端到端延迟要求的路径来作为路径。该协议对于能耗性能和 QoS 要求表现良好，但是它不提供针对不同的链接提供不同的带宽。

2.3 无线传感器网络路由协议 QoS 问题

在 WSN 中能耗问题一直是路由协议的研究重点，大部分的路由协议研究也是围绕着提高能量利用效率。而随着 WSN 应用的推广，一些应用对网络的服务质量（QoS）有较高的要求，因此路由协议的设计也开始考虑应用的服务质量要求。

在 WSN 中能量的利用效率一般是路由协议研究的首要目标，但是对于一些特殊的应用需求，对 QoS 具有更高的要求，此时可以以损失一定的能量利用效率为代价来满足应用的 QoS 需求。在环境监测应用中传输的数据属于非实时性的，要求传输可靠即可。在视频监控应用中，要求协议能够实时的传输数据，因此协议应该时延低以保证应用能及时获取数据。在 WSN 中不同的应用对于 QoS 也有不同的需求。在无线传感器网络中，主要的 QoS 指标有丢包率、吞吐量、传输时延等指标。现有的 QoS 路由协议是以损失一定的能耗为代价来满足其中的一个或几个 QoS 指标，以此满足不同应用的需求。

在 WSN 中评价一个 QoS 协议的性能可以从协议的能耗及 QoS 质量两个方面来进行衡量，评价的主要指标如下：

（1）网络的生命周期、存活节点的数量。在这两个指标中主要是看协议的存活节点以及能量随时间的变化情况，从中可以看出能量的使用情况，是衡量能耗的性能的指标。该指标是衡量路由协议性能的重要指标。

（2）网络的丢包率。网络的丢包率是指丢失的数据包占总发送数据包的比率，是衡量网络 QoS 的指标之一，衡量网络质量是否可靠。一个可靠的网络应该具有较低的丢包率。与之相反的是投递率，是成功被接收的数据包占总发送数据包的比率，投递率越高越好。

（3）网络的传输时延。传输时延是指从源节点发送一个数据包到目的节点所需要的时间。对于时间要求比较严格的应用就必须让路由协议时延短，以保证应用能及时获取数据。

2.4 无线传感器网络路由协议的安全问题

在 WSN 中大量的节点随机的分布在监测区域中，攻击者很容易将恶意的节点部署到其中并进行攻击。为了保证传感器网络的安全需要具有相应的检测手段识别恶意节点。在 WSN 路由协议中常见的攻击方式有以下几种。

(1) 虚假路由信息攻击。在虚假路由信息攻击中, 恶意节点通过欺骗、修改和重复路由信息等手段, 以此影响整个网络的路由信息。通过错误的路由信息可以使节点向错误的地方发送数据, 导致节点不能正确的选择正确的最优路径, 从而能耗大量增加影响网络的生命周期。

这种攻击方式可以通过数据包过滤的方式来对抗, 通过对收到的数据包中的源地址进行检测, 如果发现数据包中的源地址存在问题则丢弃数据包并将节点标记为恶意节点。

(2) 选择性转发攻击。这种攻击方式是恶意节点在收到数据包后选择性转发数据包或者不转发数据包, 使得数据丢失, 目的节点不能收到完整的数据。此外这些恶意节点也能够自己伪造数据包, 以此干扰网络的正常通信, 增加网络的能耗。

这种攻击方式是通过对数据包进行不同的处理, 或转发或丢弃从而达到破坏信息传递的目的。对抗这种攻击方式可以采用多路径的机制, 这样即使某条路径上的数据被丢弃了目的节点仍可从其他路径获得数据。这种机制是以降低无线传感器网络的能耗性能为代价的。

(3) Sinkhole 攻击。Sinkhole 攻击是恶意节点通过伪造一个虚假的距离信息, 宣称自己能量充足、路径短、信道可靠等手段然后广播发送消息至其他节点, 让其他节点误以为该恶意节点是最优节点, 从而选择该节点作为中继节点。该攻击方式可以吸引周围大量的数据包, 并且可以和其他攻击方式相结合, 具有较大的破坏性。

应对这种攻击可以通过监测网络中的流量以此发现恶意节点, 或者通过节点身份认证、多路径路由等手段来抵御 Sinkhole 攻击。

(4) Sybil 攻击 (女巫攻击)。在 Sybil 攻击中恶意节点通过伪造的手段, 从而以不同的身份出现在网络的多个地方, 通常是网络的关键位置。使恶意节点有更大的几率被选为中继节点, 通常和其他攻击方式结合。

(5) 蠕虫洞攻击 (Wormhole 攻击)。Wormhole 攻击是通过在网络中部署的两个恶意节点联合来进行攻击的, 其中一个恶意节点临近基站, 另一个则相反是在远离基站的位置。离基站较远的攻击通过广播宣称自己能够和离基站近的恶意节点建立起高效、低时延的链路, 吸引其他节点将数据包发到恶意节点, 从而达到破坏正常通信的目的。Wormhole 攻击还可以和其他攻击方式相结合。

(6) Hello 洪泛攻击。在路由协议中, 经常需要发送 HELLO 报文。恶意节点以大功率泛洪 HELLO 报文从而影响其他节点的判断, 建立起错误的距离信息。在随后的数据发送中节点以正常的功率向恶意节点发送数据, 数据根本无法达到目的地。这将造成大量的能量损耗。

(7) DoS 攻击 (Denial of Service)。DoS 攻击是恶意节点通过不断的发送数据, 从而消耗目的节点的能量, 或者占用信道从而使得其他正常节点的正常通信不能被接受, 以此影响网络的正常工作。

通过以上的分析可以发现无线传感器网络的攻击方式和传统的方式具有一些差异。由于无线传感器网络能量有限的特性，使得攻击者可以有更多的攻击方式。攻击者伪造信息等手段使得无线传感器网络大量消耗能量，降低网络的生命周期，不在局限于数据截获的攻击方式。因此传统的加密手段并不能有效的应对这些攻击，WSN 路由协议需要新的机制来发现恶意节点，并及时将恶意节点排除在网络之外。

2.5 本章小结

本章首先分析了无线传感器网络中路由协议设计所面临的挑战，路由协议的设计主要受到资源限制、环境限制以及应用需求的限制，这些限制是路由协议设计必须考虑的因素。随后对经典的路由协议进行了研究与分析，主要对多路径路由协议进行了分析。最后引入了路由协议的 QoS 问题和安全问题，并对提高 QoS 性能和安全性能进行了简单分析。

第三章 基于能量消耗均衡的非均匀分区的多路径路由协议

3.1 问题提出

在 WSN 中由于无线传感器节点的能量是由电池提供而有限，为此节能成为了无线传感器网络路由协议的研究热点之一^[3, 5]。

为了进行大规模应用和达到节省能耗的目的，许多无线传感器网络路由协议采用基于成簇的层次型结构。通过分簇的方法可以减少不必要的数据传输，避免传输过多的冗余数据造成的能量消耗。分簇路由协议的一个缺点是簇头的能量消耗不均衡，为了平衡簇头的能量消耗可以采用非均匀分簇的方法，通常采用控制簇头的竞争半径来调节簇规模大小，这时候半径的调节方法非常重要，其调节参数要依赖于经验值，实现能量的相对均衡还是困难的。

本文通过对现有的分簇路由协议进行分析，提出了一种基于动态分区的分簇路由协议（简称为 NUDBEMR）。本文的主要思想是通过非均匀分簇使得靠近基站的区较小，对簇的大小与基站的距离关系进行了研究，从而提出一个分层的分簇路由协议。簇头选举时综合考虑节点的剩余能量和节点与基站的距离。采用簇内单跳通信和区间多跳的路由策略。该路由协议能优化网络中节点的能量消耗，使协议能够运行更长的时间。

3.2 问题分析

目前 WSN 分簇路由协议的节能方面的研究工作主要有 3 个研究方向：分簇方法，簇头选取，簇间路由优化。其中分簇的方法会影响整个网路的能量消耗，另外分簇方法还会对于簇头间的路由选取产生影响，所以对网络的整体能效影响较大。

现有分簇方法可以分为：固定分簇和动态分簇。固定分簇的路由协议有 LEACH^[12]、PEGASIS^[13]、HEED^[14]、TEEN^[15]等路由协议，动态分簇方法有 EECS^[25]、UCS^[26]、EEUC^[27]、CEB-UC^[28]、DEBUC^[29]、UCDP^[30]等算法。

固定分簇协议所形成的簇，每个簇的大小固定，对于多跳通信方式容易造成靠近基站的节点承担的通信开销过大，从而提前死亡，造成能量空洞。因此有学者提出了通过构造大小非均匀的簇来平衡节点的能量消耗。

UCS 协议^[26]最早提出了非均匀分簇的思想，以此均衡簇头节点之间的能耗。在分簇多跳路由协议中，簇头节点的能耗包括簇内数据收集和簇间通信两部分的能耗，两者分别与簇内节点数量和转发的数据量相关。UCS 根据簇头需要承担的中继任务负担来调整簇的大小，使得靠近基站的簇头节点不会因负担过重而提前死亡，均衡了簇头节点之间的能耗。在 EECS 协议中，

簇头与基站之间采用单跳通信，构造非均匀的簇采用的方法是普通节点综合考虑自身与簇头的距离以及该簇头节点与基站的距离，通过这种方法可以使离基站近的簇面积较小。

EEUC^[27]进行非均匀分簇的方法是通过控制簇头的竞争半径，使得距离基站距离不同的簇其面积大小不同，离基站越远则面积越大，达到非均匀分簇的目的。CEB-UC^[28]是通过对网络进行分区同时使各个区内簇头数目不相同，靠近基站的分区拥有较多的簇数量从而实现能量消耗均衡。

DEBUC^[29]采用也是采用控制簇头的竞争范围来达到非均匀分簇的目的，使远离基站的簇面积大，靠近基站的簇面积小。该协议同时优化了簇头的选举方法。在UCDP^[30]协议中通过控制分区的大小来进行非均匀分簇，靠近基站的簇分区面积小同时簇内节点数少。

在上述协议中，固定分簇簇的大小不变，簇头节点承担的通信任务较重，容易造成靠近基站的节点提前死亡。而动态分簇中，对于每个簇都需要计算其簇的大小，需要较多的额外计算量。本文通过对簇的大小与基站的距离关系进行研究，提出一个分层的分簇路由协议，该协议即可通过不均匀分簇来平衡网络的能量消耗，又避免了过多的分簇大小计算。

本文主要贡献：

- (1) 通过均衡簇内通信和簇间通信的能耗，合理构造不均匀分簇。具体操作时，现根据距离进行分区，在每个分区中再均匀分簇。使得各个分簇虽然大小不同，但是能量消耗基本平衡。
- (2) 在区内进行簇头的选举时综合考虑了节点的距离与剩余能量，从而选出合适的节点担当簇头节点，通过设计的簇头选举评价函数选出了传输距离较短同时能量充足的节点担当簇头。
- (3) 对簇的大小与基站的距离关系进行了研究，找出簇的大小与基站距离的层次关系，减少了分簇大小的计算。

3.3 研究基础

3.3.1 多路径路由定义

在无线传感器网络中，多路径路由是指通过建立从源节点到目标节点的多条路径继而从中优化选择一条或者多条路径向目标节点发送信息。由于网络中节点之间是可以相互传输信息的并没有方向上的限制，那么无线传感器网络可以用赋权无向图 $G(V, E)$ 来抽象表示， V 为节点的集合， E 为路径节点的集合。因此对应的多路径路由模型可表示为：

对于任意传感器节点 i ，其到基站存在 k 条路径 $P_{i \rightarrow \text{sink}}^1, P_{i \rightarrow \text{sink}}^2, \dots, P_{i \rightarrow \text{sink}}^k$ ，这 k 条路径满足以下如下约束：

$$\begin{cases} \forall x \in [1, 2, \dots, k] (i, \sin k \in P_{i-to-\sin k}^x) & (a) \\ \forall x \in [1, 2, \dots, k], y \in [[1, 2, \dots, k] - [x]] (P_{i-to-\sin k}^x \neq P_{i-to-\sin k}^y) & (b) \\ \forall x \in [1, 2, \dots, k], u \in V, v \in [V - [u]] (P_{u-to-v}^x \subset P_{i-to-\sin k}^x \rightarrow P_{v-to-u}^x \subset P_{i-to-\sin k}^x) & (c) \end{cases} \quad (3-1)$$

其中，(a)表示这 k 条路径都包含源节点 i 和目标节点基站；(b)表示这 k 条路径都是互不重合的（任意两条路径不可能完全相同）；(c)表示这 k 条路径都没有回路。

根据从源节点到目标节点的多路径相交关系，多路径路由又可以分成相交多路径路由和不相交多路径路由。相交多路径路由是指在多条路径中存在节点共用或者链路共用，具体来说就是对于从任意传感器节点 i 到基站的任意两条路径 $P_{i-to-\sin k}^m$ 与 $P_{i-to-\sin k}^n$ 服从以下约束条件：

$$\begin{cases} \forall v \in V (v \in P_{i-to-\sin k}^m \rightarrow (v \notin P_{i-to-\sin k}^n \cup v \in P_{i-to-\sin k}^n)) & (a) \\ \forall e \in E (e \in P_{i-to-\sin k}^m \rightarrow (e \notin P_{i-to-\sin k}^n \cup e \in P_{i-to-\sin k}^n)) & (b) \end{cases} \quad (3-2)$$

不相交多路径路由是指在多条路径中任意两条路径的节点互不相同或者任意两条路径的链路互不相同，具体来说就是对于从任意传感器节点 i 到基站的任意两条路径 $P_{i-to-\sin k}^m$ 与 $P_{i-to-\sin k}^n$ 服从以下约束条件之一：

节点不相交约束：

$$\forall v \in V' (v \in P_{i-to-\sin k}^m \rightarrow v \notin P_{i-to-\sin k}^n), V' = V - \{i, \sin k\} \quad (3-3)$$

链路不相交约束：

$$\forall e \in E (e \in P_{i-to-\sin k}^m \rightarrow e \notin P_{i-to-\sin k}^n) \quad (3-4)$$

3.4 协议设计

3.4.1 网络模型

在本章中对无线传感器网络做出如下假设：

- (1) 假设节点均匀的分布在监测区域中，并且每个节点都具有自己唯一的 ID；
- (2) 节点在部署完成后位置不再发生变动，并且节点能量有限不可进行补充。在监测区域中基站位置是固定的并且具有不受限制的能量，本章假设基站的位置部署在监测区域外面；
- (3) 在传感器网络中的每个节点都具有相同的处理能力，都可被选为簇头节点或者只是作为普通节点；
- (4) 节点的初始能量相同，节点可以获取自身的当前能量，即剩余能量 Er ；
- (5) 节点的通信功率可变，节点就可以根据需提高发射功率增大通信距离，或者降低

功率节省能量；

(6) 节点的链接是对称的。节点根据收到的信号计算出两个节点之间的距离；

(7) 在本文的无线传感器网络模型中前三项属性是一般无线传感器网络的典型设置。第 4 项属性表明节点具有获取相关能量信息的能力。第 5 项属性主要是节省能耗，根据传输距离调节射频收发器的发射功率从而节省不必要的能量消耗。

3.4.2 能耗模型

在本文中使用的 WSN 能耗模型与文献[1]相同。假设节点要传输的数据为 l 比特，发送节点与接收节点之间的距离为 d ，则在发送端消耗的能量由两部分组成分别为发射电路损耗和功率放大损耗，发送端能量消耗计算公式如下：

$$E_T(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec} + l\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (3-5)$$

在上式中参数 E_{elec} (nJ/bit) 为射频能耗系数。由于传输的能耗随着距离的增大而增加，并且当距离达到一个临界值时损耗的能量更大，当传输距离小于临界值 d_0 时，能量的计算采用自由空间模型并且能耗与距离 d 的平方线性相关。在传输距离大于临界值 d_0 时，则采用多路径衰减模型，能耗与距离 d 的四次方线性相关。对应的在不同信道传播模型下具有不同的功率放大电路系数 ϵ_{fs} ($pJ/bit/m^2$) 和 ϵ_{mp} ($pJ/bit/m^4$)。

在接收端节点接收 l 比特的数据消耗的能量计算公式为：

$$E_R(l) = lE_{elec} \quad (3-6)$$

在本文的研究中，无线传感器网络的通信能耗模型参数设置为 $E_{elec} = 50nJ/bit$ ， $\epsilon_{fs} = 10pJ/bit/m^2$ ， $\epsilon_{mp} = 0.0013pJ/bit/m^4$ ， $d_0 = 87m$ 。

3.4.3 算法流程

在无线传感器网络路由协议中，路由过程分为路由发现、路由维护和路由更新三部分。在路由发现部分，本文提出的基于能量消耗非均匀分区算法采用轮循环机制，每轮分为四个阶段。

1) 分层阶段：首先通过节点与基站的距离对网络进行非均匀分层，使得不同的层次面积大小不同，离基站越远则层次的面积越大。通过分层可以大致的对网络进行划分，使靠近基站的层次有较小的面积，减少层次内数据收集的能量消耗。

2) 区内成簇阶段：该阶段在层次内进行非均匀的分簇，该阶段主要进行簇头的选举，簇头选举时通过评价函数进行，该函数同时考虑了节点的剩余能耗和距离因素。通过平衡两个因素使得选择的簇头较优。

3) 簇间路由选择阶段：该阶段主要进行簇间多跳传输的中继节点选择，以及多路径路由多条路径的构建。

4) 传输阶段：该阶段主要进行的数据的传输。节点收集数据后通过构建的多条路径将数据发送到基站。

(1) 分层阶段

在协议中簇头不仅要收集簇内的信息，还要作为多跳通信的中继点，因此靠近基站的节点能量消耗较快。为此通过不均匀分区使得靠近基站的分区较小，从而减小区内通信消耗。本文通过对节点与基站的距离关系进行研究，找到了一个较为合理的分区关系。

如图 3.1 所示，靠近基站的区面积较小，由图中可知在与基站一定距离内的节点其分区大小近似，从而形成多个层次。如图中所示，靠近基站的层次面积较小，远离基站的层次面积较大。本文即根据这种关系对传感器网络进行分区。

原理：靠近基站的簇头不仅要收集簇内的信息还必须负责转发其他簇头的数据，容易提前死亡因此必须减少其能量消耗。为了避免形成空洞，应该使远离基站的节点先死亡，而靠近基站的节点死亡时间较晚。因此在靠近基站的层次的剩余总能量要高于远离基站的层次。

如图 3.1 所示，传感器网络大小为 $s \times s$ ，传感器网络被分成 M 层，从远离基站的地方开始为第 1 层，记为 $M_i (i=1, 2, \dots, n)$ ，每层的距离记为 $d_i (i=1, 2, \dots, n)$ ，同一层内的簇具有相同的簇半径。从第 k 层传递数据到第 $k+1$ 层的通信距离平均值为 $(d_k + d_{k+1})/2$ 。

则有如下约束关系：

$$\begin{cases} S_N = \left\{ i \mid \frac{s}{d_0} < i < 2\frac{s}{d_0} \right\} \\ 0.5d_0 < d_i < d_0 \end{cases} \quad (3-7)$$

其中 S_N 表示的是分层数量。分析，根据无线通信能量消耗模型，当通信距离大于 d_0 时，通信能耗急剧增加，所以最大的分簇大小 d 应小于 d_0 ；若分簇过小，则起不到承担中继的任务，由文献可知通信半径大于 $0.5d_0$ 时较优，因此 $0.5d_0 < d_i < d_0$ 。

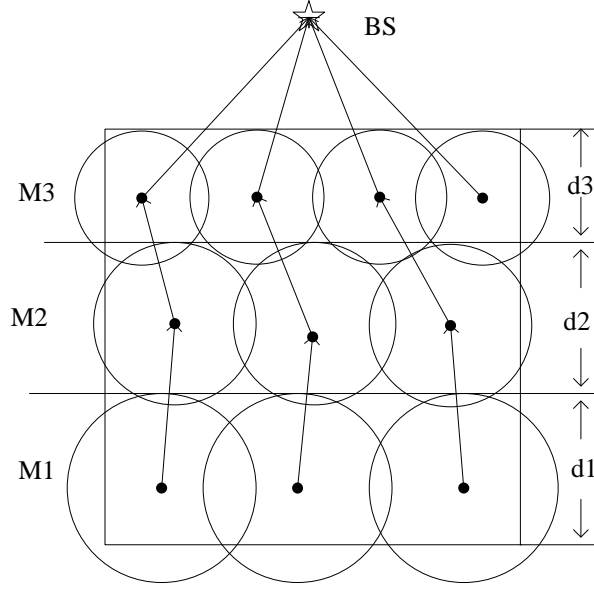


图 3.1 分层示意图

在图 3.1 中，第 k 层的能量消耗有以下几部分，本层内数据收集消耗的能量，第 k 层接收前 $k-1$ 层数据消耗的能量，第 k 层作为中继传递前 $k-1$ 层的数据以及传递本层数据到下一层所消耗的能量。所以第 k 层需要负责接收上 $k-1$ 层的信息以及负责传递到下一层所需要的能量，因此所消耗的能量为：

$$E_k = E_{sk} + \sum_{i=1}^{k-1} E_r(l_i) + \sum_{i=1}^k E_t(l_i, d_k) = E_{sk} + \sum_{i=1}^{k-1} l_i E_{elec} + \sum_{i=1}^k (l_i E_{elec} + l_i \epsilon_{fs} d_k^2) \quad (3-8)$$

其中， l_i 为每层需要传输的数据量， d_i 为每层的距离。因为节点均匀分布，在一定范围内需要传输的数据量与范围存在线性关系，所以 l_i 和 d_i 间存在如下关系： $l_i = \alpha d_i$ ， α 为常数。假设能量消耗均衡，则第 k 层消耗的能量与第 $k-1$ 层消耗的能量相等，则存在 $E_k = E_{k-1}$ ，可得如下关系：

$$\begin{cases} d_{k-1} = d_k + \frac{\epsilon_{fs}}{E_{elec}} d_k^3 \\ d_1 + d_2 + \dots + d_k = s \end{cases} \quad (3-9)$$

假设传感器网络的环境为 $100m \times 100m$ ， $d_0 = 87m$ 根据上面公式可得：

$$\frac{s}{d_0} = \frac{100}{87} \approx 2 < i < 2 \frac{s}{d_0} = 2 \times \frac{100}{87} \approx 4$$

即 $2 < i < 4$ ，传感器网络可被分为 3 层。由此可求得 $d_1 : d_2 : d_3 \approx 2 : 3 : 5$ 。

(2) 区内成簇阶段

1) 簇头选举

为实现网络中节点的负载均衡，要尽可能选择剩余能量高同时节点距离基站的距离小的节点担当簇头。在节点选择前候选簇头通过广播告知其余节点自身能量及距离等信息。簇头选举公式如下：

$$CFun = \frac{E_{cur}(i)/E_0 + D_x / \sqrt{(S(i).x-bs.x)^2 + (S(i).y-bs.y)^2}}{\sqrt{(S(i).x-c.x)^2 + (S(i).y-c.y)^2}} \quad (3-10)$$

其中 $E_{cur}(i)$ 代表节点 i 的当前能量， E_0 代表节点的初始能量， $\sqrt{(S(i).x-c.x)^2 + (S(i).y-c.y)^2}$ 代表节点 i 和节点 i 所在区域的中心的距离， D_x 代表基站与传感器区域的最短距离（即基站到传感器区域边界的垂直距离）， $\sqrt{(S(i).x-bs.x)^2 + (S(i).y-bs.y)^2}$ 代表节点 i 与基站的距离。

簇头选择完成后簇头节点广播自己成为簇头的信息，其他节点则选择和自身之间距离最短的簇头并加入其中，以使节点和簇头之间的通信代价最小。

节点选择簇头节点可以用代价公式来衡量，在本章所提协议中考虑的代价因素是距离因素，节点代价公式如下：

$$cvalue = 1 / d(i, CH_i) \quad (3-11)$$

在上式中 $d(i, CH_i)$ 表示节点 i 和簇头节点之间的距离，节点与基站之间的距离越远则代价函数的值越小，因此节点在选择加入的簇头节点时首先计算与邻居簇头节点的代价函数，然后选取代价函数值大的簇头节点加入，并发送信息通知该节点。

(3) 簇间路由选择阶段

在簇的结构以及簇头选定之后，将为每个簇头选出通往基站的通信路径。对于任意簇头节点 i 到汇聚节点（基站）的一条路径 n 可以表示为 $P_{i-to-sink}^n$ ，在此路径中的节点 m 可以表示为：

$$\{m \mid m \in V', m \in P_{i-to-sink}^n, V' = V - [i, sink]\} \quad (3-12)$$

这些节点是路径中除源节点与目标节点以外的点，可以称为中继节点。为了选出这些中继节点。本文协议簇采用和簇头选举类似的方法。即综合考虑邻居簇头节点的剩余能量、簇头节点与邻居簇头节点的距离以及邻居簇头节点与基站的距离。因此中继节点的选择函数定义如下：

$$RF = \frac{E_{cur}(j) + 1 / dis_{i-j}}{dis_{j-bs}} \quad (3-13)$$

其中， $E_{cur}(j)$ 表示的是节点 i 的备选中继节点 j 的剩余能量， dis_{i-j} 表示的是簇头节点 i 和备选中继节点 j 之间的距离， dis_{j-bs} 表示的是备选中继节点 j 和基站之间的距离。假设节点 i 的

邻居簇头节点集合为 $\{j | i \text{ can reach } j\}$ ，对集合中的每个节点依次计算 RF 值，取值最大的节点作为中继节点。

采用上述方法，从源节点出发，不断循环找出新的下一跳中继节点，直到选定的中继节点的节点层次为 1 时停止（一层节点之后必然和基站通信，无需再找寻下一跳）。在路径构成时，要求如下 1) 选择的节点层次要小于上一跳的节点层次，这是为了防止中继节点在同层节点之间进行无谓的跳变；2) 当选择中继节点的交集出现空集时，则结束循环，下一跳设置为基站。

据此，在选定好一条路径 $P_{i-to-sink}^{x1}$ 之后，再次整体循环两次，找出以源节点为起始，基站为目标的 $P_{i-to-sink}^{x2}$ 和 $P_{i-to-sink}^{x3}$ ，同时这三条路径之间任意两者满足以下约束：

$$\begin{cases} \forall v \in V' (v \in P_{i-to-sink}^i \rightarrow v \notin P_{i-to-sink}^j) \\ V' = V - \{i, sink\}, i \neq j, i \in [x1, x2, x3], j \in [x1, x2, x3] \end{cases} \quad (3-14)$$

(4) 传输阶段

当簇间的路由被选定后，进行传输通信。首先进行簇内的信息收集，由每个簇内节点收集信息，然后把信息传输给簇头节点。其次簇头节点负责把信息进行一定的整合，然后向基站传输。簇头节点收到节点发送的数据后，通过主路径将数据发送到基站，当主路径发生故障时，则启用备用路径，由备用路径将数据发送给基站。

(5) 路由维护与更新

在源节点完成当前传输任务时，目的节点将得到并更新更路径的相关参数并回复给源节点，源节点更新路径的信息以备下一次传输任务。当路径上的某一节点失效不能完成任务时，重新启用发现过程。

3.4.4 仿真与实验

实验在 MATLAB 环境下完成，实验环境为 2000 个节点分布在 $500m \times 500m$ 的正方形区域内，基站位于区域外，表 3.1 为试验中采用的参数：

表 3.1 实验参数列表

参数名称	值
无线传感器网络节点数目 Num	2000
网络覆盖区域大小 $M_s \times M_s$	$500m \times 500m$
发射电路射频能耗系数 E_{elec}	$50nJ / bit$
节点的初始能量 E_0	$0.5J$
自由空间下的信号放大能耗系数 ε_{fs}	$10pJ / bit / m^2$
多路径衰减下的信号放大能耗系数 ε_{mp}	$0.013pJ / bit / m^4$

数据融合能量消耗 E_{DA}	$50nJ / bit / message$
控制报文长度 CPL	$200bits$
数据报文长度 DPL	$4000bits$
数据融合比率 ar	0.6
传输距离阈值 d_0	$87.7m$
基站的位置 $(bs.x, bs.y)$	$(250, 875)$
最优簇头数目比率 p_{opt}	0.05

(1) 簇头的特征

图 3.2 显示的是不同的分簇路由协议所生成的簇首数目的分布情况，统计的数据是从协议的生命周期中随机抽取 100 轮来进行计算。从图 3.2 中可以看出 EEUC 的簇首数目的变化范围不大，而 ECHERP 协议的簇首数目取值范围则比较大。本文提出的协议 NUDBEMR 的簇首数目波动范围比 EEUC 稍大一些，比 ECHERP 波动范围小。本章所提协议的簇首数目波动情况在可接受范围之内，算法具有良好的可靠性。

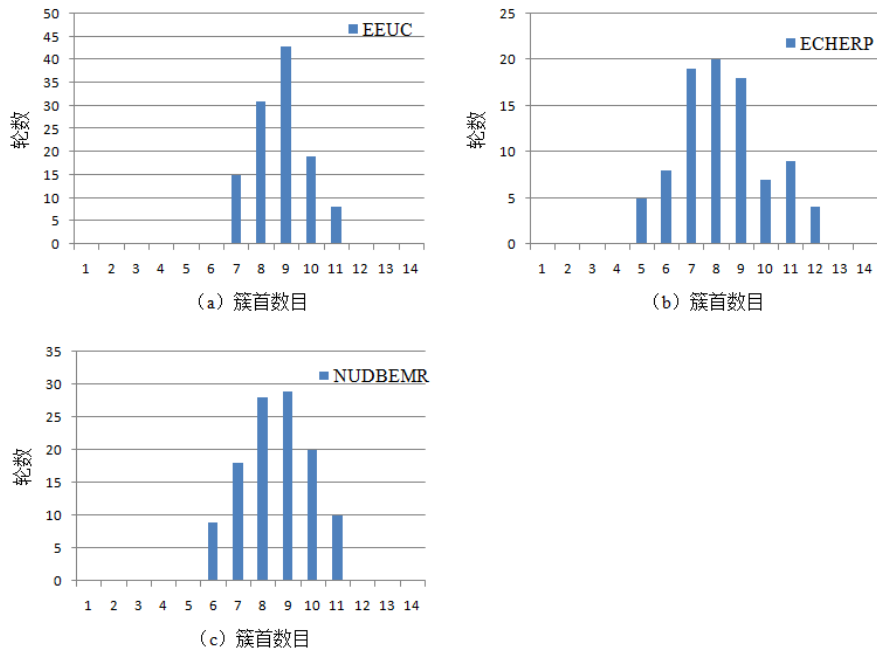


图 3.2 各种协议生成的簇首数目分布统计

(2) 能量效率

本章所提路由协议的主要思想是利用非均匀分簇的思想来解决能量空洞问题。图 3.3 显示的是各种协议的存活节点数量，存活节点越多，运行的轮数越多则表示该协议的生命周期越长，则算法性能越好。从图 3.3 中可以看出，本章所提路由协议与 EEUC 和 ECHERP 相比具有更长

的运行轮数，每轮存活节点数目也比另两个协议好，具有更长的网络生命周期。由于协议采用了非均匀分簇和簇间多跳路由有机结合的方式，使得距离基站较近的簇和距离基站较远的簇之间的数据传输能耗得到有效的平衡，避免了能量空洞现象。同时采用分层的分区方法，减少了分簇大小的计算过程，因此算法相比于另两个算法具有更低的能量消耗。

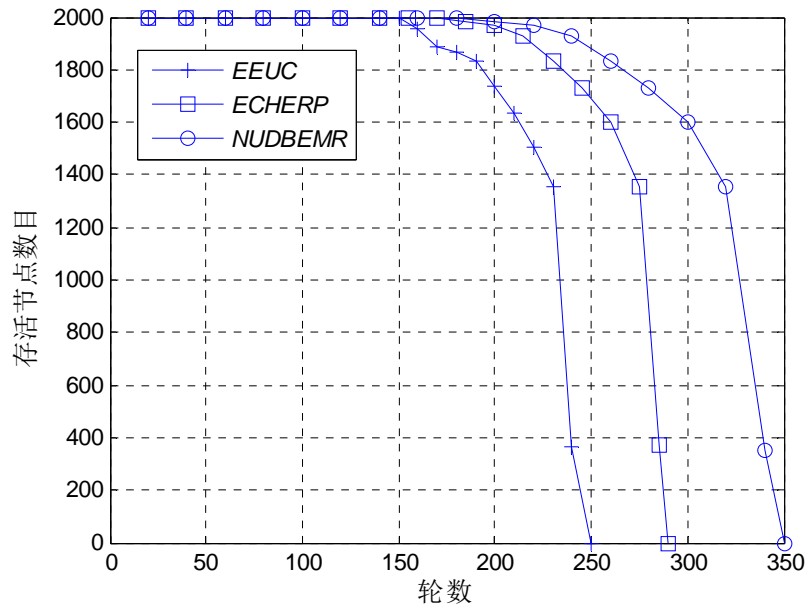


图 3.3 存活节点数量

图 3.4 显示的是不同协议的网络剩余能量随时间变化的情况。从图 3.4 中可以看出，NUDBEMR 协议的能量消耗速度比 ECHERP 协议和 EEUC 协议小，本章所提路由协议剩余网络总能量下降平缓，下降速度小于另两个协议，表明能量消耗较慢和具有较长的生存时间。当 EEUC 算法中网络失效时，网络生存周期约为 200 轮；ECHERP 算法失效时，网络生存周期约为 250 轮；而本文算法网络失效时，网络生存周期约为 320 轮。

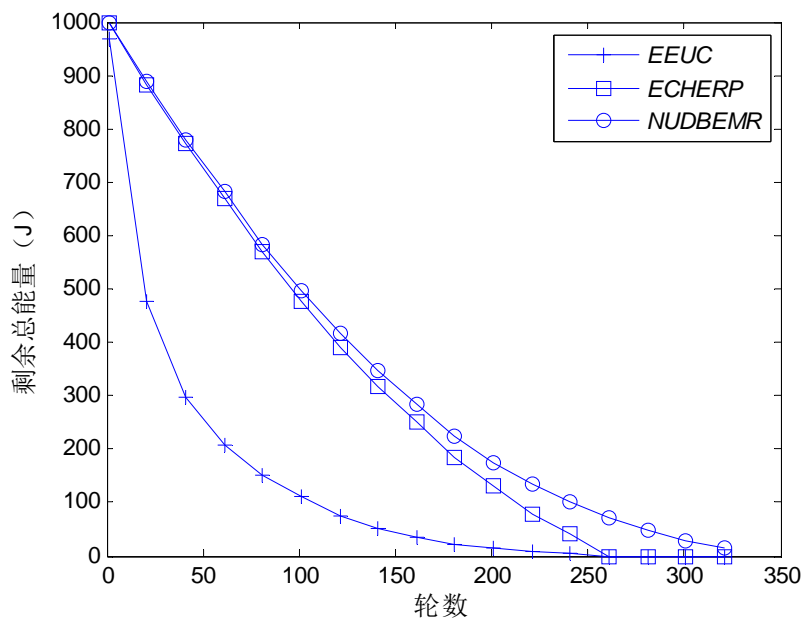


图 3.4 剩余总能量

表 3.2 和表 3.3 分别列出了 EEUC、ECHERP 和本文算法的每轮网络存活节点数和每轮网络的剩余能量，由表中可以看出 NUDBEMR 有更长的网络生命周期。

表 3.2 存活节点数

Round	EEUC	ECHERP	NUDBEMR
50	2000	2000	2000
100	2000	2000	2000
150	1998	1958	1998
200	1736	1946	1966
250	0	1690	1881
300	0	0	1602
340	0	0	352
350	0	0	0

从表 3.2 中可以看出本文所提 NUDBEMR 协议具有更长的生命周期，每轮的存活节点数更多。本文所提的协议比另外两个协议的生命周期多出 50 多轮。

表 3.3 每轮网络的剩余能量

Round	EEUC	ECHERP	NUDBEMR
50	723.0682	731.8889	750.3360
100	476.0188	497.0412	514.3321
150	285.7062	312.7255	329.4180
200	124.1613	168.5565	183.3844
250	23.7161	73.0689	83.5675
300	0	0	34.9072
340	0	0	1.3239
350	0	0	0

从以上结果可以看出，本文提出的协议可以有效的延长网络生命周期，平衡节点的能量消耗。

3.5 本章小结

本文首先研究和分析了现有分簇和分区路由协议的优缺点，在此基础上提出了一个新的非均匀分区多路径路由协议。其核心思想是通过研究分簇大小与基站距离之间的关系，提出分层思想对网络进行合理分区，同时通过多路径的构建，以均衡网络中的能量消耗，避免出现“空洞”现象。本文协议通过对网络进行分层，使靠近基站的层次分簇的面积较小，从而减小簇头节点通信负担，以均衡网络中节点的能量消耗，同时分层的方法可以减少分簇大小的计算。实验结果表明所提路由协议具有良好的性能，可以有效的均衡网络的能量消耗，延长网络的生命周期。

第四章 无线传感器网络基于可靠评价的 QoS 多路径路由协议

4.1 问题提出

在 WSN 中能耗问题一直是路由协议的研究重点，大部分的路由协议研究也是围绕着提高能量利用效率^[32-59]。而随着 WSN 应用的推广，一些应用对网络的服务质量（QoS）有较高的要求，因此路由协议的设计也开始考虑应用的服务质量要求。

在 WSN 中能量的利用效率一般是路由协议研究的首要目标，但是对于一些特殊的应用需求，对 QoS 具有更高的要求，此时可以以损失一定的能量利用效率为代价来满足应用的 QoS 需求。在环境监测应用中传输的数据属于非实时性的，要求传输可靠即可。在视频监测应用中，要求协议能够实时的传输数据，因此协议应该时延低以保证应用能及时获取数据。在 WSN 中不同的应用对于 QoS 也有不同的需求。在无线传感器网络中，主要的 QoS 指标有丢包率、吞吐量、传输时延等指标。现有的 QoS 路由协议是以损失一定的能耗为代价来满足其中的一个或几个 QoS 指标，以此满足不同应用的需求。

4.2 问题分析

在 WSN 中评价一个 QoS 协议的性能可以从协议的能耗及 QoS 质量两个方面来进行衡量，评价的主要指标如下：

（1）网络的生命周期、存活节点的数量。在这两个指标中主要是看协议的存活节点以及能量随时间的变化情况，从中可以看出能量的使用情况，是衡量能耗的性能的指标。该指标是衡量路由协议性能的重要指标。

（2）网络的丢包率。网络的丢包率是指丢失的数据包占总发送数据包的比率，是衡量网络 QoS 的指标之一，衡量网络质量是否可靠。一个可靠的网络应该具有较低的丢包率。与之相反的是投递率，是成功被接收的数据包占总发送数据包的比率，投递率越高越好。

（3）网络的传输时延。传输时延是指从源节点发送一个数据包到目的节点所需要的时间。对于时间要求比较严格的应用就必须让路由协议时延短，以保证应用能及时获取数据。

以上的几个指标是衡量一个路由协议性能的主要指标之一。通过对无线传感器网络进行分析，可以找出影响以上几个指标的主要因素：

（1）节点的剩余能量。当节点的剩余能量较低时选择其作为中继节点将快速的消耗其能量造成其死亡，这容易造成能量空洞现象，使得一部分区域的节点无法与网络进行通信，或者通

信成本急剧增加,进而影响网络的生命周期。因此在选择中继节点时必须考虑节点的剩余能量。

(2) 节点与节点之间的距离以及与基站之间的距离。在 WSN 能耗模型中能量消耗与距离之间存在平方或者四次方的关系,当通信距离越大所需消耗的能量越大,因此通信距离越小越好。一个合理的通信距离是影响能耗的重要因素之一。

(3) 链路的质量。一条通信链路的质量会影响数据传输的成功率。当链路受到较大的干扰时,容易造成数据包的丢失,从而降低网络通信的可靠性。链路的质量可以用链路的信噪比来衡量。在路由协议设计时,考虑链路的信噪比,避开链路质量差链路,可以减少数据的丢包率。

(4) 数据端到端的时延。对于时间要求严格的应用,数据的时延要求越低越好。因此在设计路由协议时,将数据的时延作为一个因素加以考虑,可以避免选取时延大的路径,让设计的路由协议满足时延要求。

(5) 节点的负担,在无线传感器网络多路径路由协议中,担当中继的节点需要负责转发其余节点的数据到汇聚节点,如果多条路径都选取其中一个节点作为中继节点,将造成该节点负担过大。既容易造成数据的拥塞,增加数据的时延,又容易大量消耗节点的能量。设计 WSN 路由协议时要尽可能平衡节点之间的负担。

通过以上分析,可以知道影响路由协议能耗的 QoS 质量的因素,在这些因素中,可能存在一些冲突,比如节点剩余能量高,但是其余节点到该节点距离远;或者节点具有较低的时延,但是该节点已经承担了较多的转发任务。因此在设计路由协议中,应该考虑这些因素的均衡,使网络具有较高的生命周期和 QoS 质量。在本章中,通过对这些因素进行分析考虑提出了一个节点的可靠性评价函数,通过该函数可以用来进行多路径中节点的选择,并以此为基础提出了一个 QoS 路由协议 REQMR。

4.3 协议设计

在 WSN 中采用单路径容易造成网络负载的不均衡,同时当路径中的某个节点出现故障时会导致链路断开影响数据的传送,导致数据的传输时延增大或者数据的丢失。而采用多路径路由协议则可以避免这些问题,保证 QoS 质量。在无线传感器网络多路径路由协议中,有不相交多路径路由协议,相交多路径路由协议。在不相交多路径路由协议中,从源节点到目标节点的多条路径没有相同的节点,具有更高的可靠性。而相交多路径路由协议中允许路径有共同的节点,有助于选出那些剩余能量高、地理位置优越的节点充当中继节点。两种路由协议有各自的优点,本文选择不相交多路径路由协议。

在多路径路由协议中,数据的传输有两种方案,一种是设置主路径和备用路径,数据传输

只从主路径进行传输，只有当主路径失效时才从备用路径中选择其中一条作为新的主路径，即数据每次只从一条路径发送。另一种方案是不区分主路径和备用路径，数据传输时同时从这几天路径传输，在这种方案中从几条路径中传输的数据可以完全相同，每条路径都传输完整的数据；或者每条路径上各自传输一部分的数据，在汇聚节点可以将收到的数据组合成完整的数据。第一种方案的优点是可以节省更多的能耗，同时保证一定的可靠性要求，第二种方案具有更高的可靠性，同时具有较低的时延，但是需要消耗更多的能量。在本文的研究方案中选择采用第一种方案，即区分主路径和备用路径。

在文献^[60]中通过证明指出在无线传感器网络多路径路由协议中，当路径数目超过 3 条时需要更多的开销，因此在 WSN 中最佳的路径数目是在 3 条以内。因此在本文的协议中采用的路径数目是 3 条，从而协议具有更高的可靠性。

文献^[61]通过研究表明在选取多路径之前增加层簇结构可以更好的增加网络的性能，即层簇式多路径路由协议比非层簇式多路径路由协议能更好的提高网络的性能。所以在本文所提路由协议中采用了分簇结构，然后在簇间通信时采用多路径的算法。

在无线传感器网络路由协议中，单跳的路由协议适合于规模较小的网络环境，当网络规模增大时采用多跳的通信方式可以有效的降低网络的能量消耗。在具有 QoS 的多路径路由协议中，如何选取适合的节点担当下一跳节点是路由协议必须解决的问题，通过上节的分析可知影响无线传感器网络能耗和 QoS 质量的因素。在本章中将考虑这些因素对能耗和 QoS 的作用机制，提出一个基于可靠性评价的 QoS 多路径路由协议 (REQMR)。

4.3.1 网络模型与能耗模型

在本章中对无线传感器网络做出如下假设：

- (1) 假设节点均匀的分布在监测区域中，并且每个节点都具有自己唯一的 ID；
- (2) 节点在部署完成后位置不再发生变动，并且节点能量有限不可进行补充。在监测区域中基站位置是固定的并且具有不受限制的能量，本章假设基站的位置部署在监测区域外面；
- (3) 在传感器网络中的每个节点都具有相同的处理能力，都可被选为簇头节点或者只是作为普通节点；
- (4) 节点的初始能量相同，节点可以获取自身的当前能量，即剩余能量 E_r ；
- (5) 节点的通信功率可变，节点就可以根据需提高发射功率增大通信距离，或者降低功率节省能量；
- (6) 节点的链接是对称的。节点根据收到的信号计算出两个节点之间的距离；

在本文的无线传感器网络模型中前三项属性是一般无线传感器网络的典型设置。第 4 项属性表明节点具有获取相关能量信息的能力。第 5 项属性主要是节省能耗，根据传输距离调节射频收发器的发射功率从而节省不必要的能量消耗。

网络的能耗模型采用第三章所述的能量消耗模型。

4.3.2 算法流程

本文所提路由协议采用层簇式多路径路由协议，算法的改进之处主要在于多路径簇间路由的选择上。算法的主要流程如下。

(1) 建立阶段

1) 簇头选举

协议的簇头选举采用和 LEACH 协议一样的策略，即每轮采用随机的方式来选择一组节点担当簇头。簇头的选举采用了概率模型，以此均衡簇头的均匀性。选举机制为：在每次选择簇头之前节点随机产生一个数并将此数与阈值 $T(N)$ 相比，只有小于 $T(N)$ 的节点可以担当簇头节点。阈值 $T(N)$ 的计算公式如下：

$$T(N) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \times [r \bmod (1/p)]}, & N \in G \\ 0, & N \notin G \end{cases} \quad (4-1)$$

$$p = k / N \quad (4-2)$$

在上式中，参数 k 是网络中每轮的簇头数目， N 是网络中传感器节点的总数目，由此计算的参数 p 是节点成为簇头节点的百分数。 r 是当前的轮数， G 是在过去的 $1/p$ 轮没有当选为簇头节点的集合， \bmod 是求模运算。在上式的簇头选择机制中，没有担任过簇头的节点随着轮数的增加，其当选为簇头的概率会增大，从而保证在 $1/p$ 轮内每个节点都能当选一次簇头节点，以此均衡节点的能量消耗。

2) 成簇

在簇头节点选取好之后，每个簇头节点采用相同的功率向整个网络发送广播，网络中的节点可以根据其收到数据的信号强弱来选择加入哪个簇中。由于簇头广播功率相同，因此节点收到信号越强说明节点与簇头的距离越近，节点选择信号强的节点加入该簇中，节点通知相应的簇首节点完成簇的建立。

3) 簇间路由选择

在簇头选取完成以及簇结构建立之后，要为簇头选取到基站的数据传输路径。在本章提出的协议中，将为每个簇头节点选择 3 条到基站的路径，一条作为主路径，另两条作为备用路径。

中继节点的选择受到剩余能量、丢包率等因素的影响。本章协议的主要思想就是通过对节点的剩余能量、距离、丢包率、信噪比、时延等参数进行评估，建立一个合适的函数来评价节点的可靠性，从而选出作为中继的节点。

在传感器路径选择时，为了节省传感器节点的计算开销，同时简化计算，引入了可靠性评价函数来进行路径中节点的选取。假定节点 i 为簇头，节点 i 的邻居簇头节点的集合为 N_i ， i 分别计算 N_i 中每个节点的可靠值(Reliable Value)，记为 $Rvalue$ 。由于 $Rvalue$ 受到簇头节点的剩余能量 (Residual energy)、投递率 (Packet delivery ratio)、距离 (Distance)、时延 (Delay) 等因素的约束，因此可假设 $Rvalue$ 是一个以这些因素有关的线性函数，因此 $Rvalue$ 的值可用如下公式计算：

$$Rvalue = w_1 f_{Er} + w_2 f_{PDR} + w_3 f_{Dis} + w_4 f_{Delay} \quad (4-3)$$

其中 $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$ 。在上式中， $Rvalue$ 的值由多个因素共同作用而生成，由于不同的应用对路由协议的要求不同，因此各个参数对 $Rvalue$ 值的重要性不同，为此赋予每个参数不同的权重，即 w_1, w_2, w_3, w_4 。公式中 f_{Er} 是剩余能量的函数， f_{PDR} 是投递率的函数， f_{Dis} 是节点与节点、节点与基站的距离函数， f_{Delay} 是关于时延的函数。下面对具体的函数进行分析。

首先分析节点剩余能量对可靠值的影响，在无线传感器网络中，由于作为中继的簇头节点要负责数据的转发，因此需要消耗较大的能量，为此应选择剩余能量较大的簇头节点作为中继节点，以避免部分簇头节点能量消耗过大，造成能量消耗的不均衡，形成能量空洞。因此 f_{Er} 的值可以用下式计算：

$$f_{Er} = \frac{E_{cur}(j)}{\overline{E_{Nei}}(N_i)} \quad (4-4)$$

在上式中， $E_{cur}(j)$ 表示邻居节点 j 的剩余能量， $\overline{E_{Nei}}(N_i)$ 是邻居节点剩余能量的均值。通过式 4-4 可以让剩余能量高的簇头节点有更多的机会当选下一跳节点。

数据包的投递率。在无线传感器网络中，当数据包丢失时，如果没有数据重传机制，将会造成数据的丢失，即使有数据重传机制，也需要造成额外的开销。投递率越高表示该信道的状况越好，应该增加该节点被选为下一跳节点的机会，投递率对 $Rvalue$ 给予的是正影响。因此 f_{PDR} 的计算公式如下：

$$f_{PDR} = \frac{NRP}{NSP} \quad (4-5)$$

在上式中，NRP (Number of receive packet) 表示的是目的节点收到的数据包数目，NSP (Number of source packet) 表示的是从源节点发出的数据包数目。数据包的投递率是反映网络质量的一个重要参数，因此数据包的投递率越高，则节点的可靠性越高，能够给予 $Rvalue$ 越好

的影响。

接下来的另一个函数是距离函数 f_{Dis} 。在该函数中主要选取了簇头节点 i 和邻居簇头节点 j 的距离以及簇头节点 j 与基站的距离作为参数来衡量 f_{Dis} 的优劣。由于通信能耗是无线传感器网络中损耗能量最多的部分，由上一节的能耗模型中可知节点的能耗与距离成平方的关系，当距离增大时，节点的发送能耗急剧增大，因此传输距离越短越好。考虑节点 j 与基站的距离是为了防止数据往远离基站的方向传播，同时节点 j 距离基站越近则表示数据越接近最终的目标节点，多次累积可以减少数据需要中转的次数。因此 f_{Dis} 的计算公式如下：

$$f_{Dis} = \frac{1}{dis_{i-j} \times dis_{j-bs}} \quad (4-6)$$

$$dis_{i-j} = \sqrt{(i.x - j.x)^2 + (i.y - j.y)^2} \quad (4-7)$$

$$dis_{j-bs} = \sqrt{(bs.x - j.x)^2 + (bs.y - j.y)^2} \quad (4-8)$$

在公式 4-6 中 dis_{i-j} 表示簇头节点 i 和簇头节点 j 的距离， dis_{j-bs} 表示簇头节点 j 和基站之间的距离，该距离用欧氏距离计算，即公式 4-7 和 4-8，其中的 $(i.x, i.y)$ 表示节点的坐标。

最后的一个参数是 f_{Delay} ，该参数表示的是从源节点到目的节点的延迟时间。在一个对时间敏感的应用中，要求路由协议必须具有快速地反应能力，因此延迟时间是 QoS 中非常重要的一个指标。延迟时间可以用数据从源节点发送时间到目的节点收到数据的时间间隔来计算。延迟越小则表示 QoS 质量越好，因此计算公式如下：

$$D(k) = RT(j) - ST(i) \quad (4-9)$$

$$f_{Delay} = 1 / \left(\frac{1}{N} \times \sum_{k=1}^N D(k) \right) = N \times \frac{1}{\sum_{k=1}^N D(k)} \quad (4-10)$$

在上式中 $RT(j)$ (Receive time) 表示簇头节点 j 接收到数据包的时间， $ST(i)$ (Send time) 表示数据包从簇头节点 i 发出的时间。为了更好的衡量某条路径的数据延迟，选择计算数据延迟时间的平均值。 $D(k)$ 表示第 k 次通信节点的数据延迟时间。

在以上的几个衡量节点可靠性的参数中，可能存在冲突的情况，如节点剩余能量高，但是延迟时间高，节点延迟时间短，但是距离远。因此要赋予每个参数不同的权重系数。权重可以通过模糊决策的方法获得。在本文中采用层次分析法来确定各个因素的权重。

层次分析法确定 $Rvalue$ 各个因素权重的过程如下。

步骤一：建立层次结构。

在层次分析法中一般将问题分为 3 层，第一层为目标层，第二层为准则层，第三层为方案层。其中准则层是根据目标层和方案层制定的。层次结构图如下：

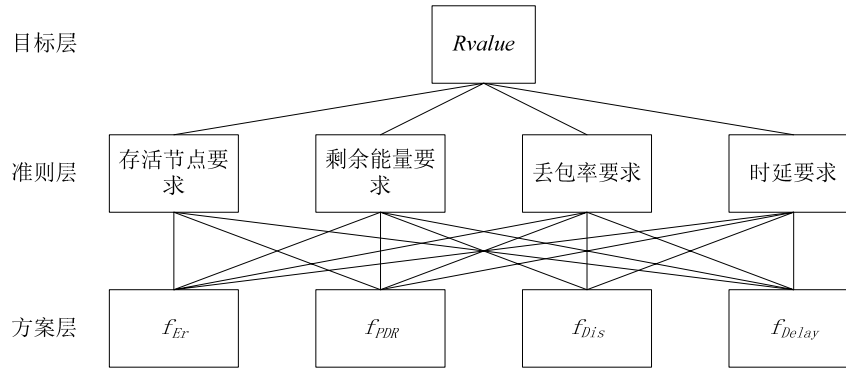


图 4.1 层次结构图

图 4.1 是采用层次分析法对问题所建立起来的层次结构图，目标层对应的是可靠性评价函数 $Rvalue$ 的值，准则层对应的是网络性能的衡量指标，即应用对协议性能的要求，如存活节点数量的要求，端到端延迟时间的要求，方案层则是 $Rvalue$ 的四个约束函数。

步骤二：构造判断矩阵。

在构造判断矩阵中，对于同一层次的各因素关于上一层中某一因素的重要性进行两两比较，从而构造出判断矩阵。把与上层某元素有关系的下一层元素逐一比较进行量化，比较结果排成一行得到判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ，其中 a_{ij} 的取值如下表所示。

表 4.1 量化取值表

N_i / N_j	相同	稍强	强	很强	绝对强	稍弱	弱	很弱	绝对弱
a_{ij}	1	3	5	7	9	1/3	1/5	1/7	1/9

在相同到绝对强每两个等级之间可依次用 2,4,6,8 将其量化，即 a_{ij} 取值范围在 1~9 或者它们的倒数。建立的矩阵为正互反矩阵，并且 a_{ij} 满足如下约束条件。

$$a_{ii} = 1, a_{ij} = 1/a_{ji}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4-11)$$

对于构建判断矩阵本文举例如下，第三层相对于第二层的两两比较判断矩阵分别为 A_1 ， A_2 ， A_3 与 A_4 ，如下所示：

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 2 \\ 1/7 & 1 & 1/4 \\ 1/2 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/7 & 1/6 \\ 7 & 1 & 1/2 \\ 6 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/4 \\ 5 & 1 & 2 \\ 4 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 5 \\ 3 & 1 & 7 \\ 1/5 & 1/7 & 1 \end{bmatrix}$$

第二层相对于第一层的重要性判断矩阵，即比较应用对协议的要求对于可靠性值的重要程度，例如比较存活节点要求和时延要求哪个更重要：

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 & 2 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1/2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

步骤三：计算元素对于上层元素的重要性，即层次单排序

用判断矩阵确定元素的重要性有 3 种方法：和法、最小夹角法以及特征向量法。在本文中采用特征向量法。采用特征向量法计算重要性的步骤如下。

①在构造完判断矩阵 A 后，计算各个判断矩阵 A 的特征值 λ_{\max} 。

②求 A 属于特征值 λ_{\max} 的正特征向量，并将其归一化，所得向量记为权重向量。

对于上述的例子，计算的最大特征值和对应的特征向量为：

$$A_1 : \lambda = 3.002, X = (5.90386, 0.80669, 3.08629)^T$$

$$A_2 : \lambda = 3.080, X = (0.08462, 0.44660, 0.67342)^T$$

$$A_3 : \lambda = 3.094, X = (0.09138, 0.33668, 0.49614)^T$$

$$A_4 : \lambda = 3.065, X = (3.65885, 8.51403, 0.94342)^T$$

$$B : \lambda = 4.0155, X = (9.15749, 3.52989, 3.90998, 1.84096)^T$$

步骤四：一致性检验。

在构造判断矩阵时，在进行元素之间的比较时，可能存在如下情况，如 3 个元素 x_i, x_j, x_k 进行比较，分别得到 a_{ij}, a_{jk}, a_{ik} ，但是 $a_{ij}a_{jk} \neq a_{ik}$ ，因此构造完判断矩阵后需要进行一致性检验。

对于正互反矩阵可以具有如下特征：

①正互反矩阵的最大特征值 λ_{\max} 是单根且是正实数，对应的特征向量是正向量。

② n 阶正互反矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 的最大特征值 $\lambda_{\max} \geq n$ ，则 A 是一致的，即 A 满足

$$a_{ij}a_{jk} = a_{ik}, \quad i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (4-12)$$

当且仅当 $\lambda_{\max} = n$ 。

因此对于正互反矩阵可以定义判断矩阵一致程度的衡量指标，即一致性指标为：

$$C = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4-13)$$

当 $C = 0$ 时，判断矩阵是一致的， C 值越大不一致性越严重，但是通常情况下 C 值无法刚好为 0，因此需要定义一个可接受范围，即随机一致性指标：

$$R = \frac{\bar{\lambda}_{\max} - n}{n - 1} \quad (4-14)$$

其中 $\bar{\lambda}_{\max}$ 为多个 n 阶随机正互反矩阵最大特征值的平均值。并且 R 的值由下表所得：

表 4.2 不一致性指标

n	3	4
R	0.58	0.90

一致性比例定义为：

$$CR = \frac{C}{R} \quad (4-15)$$

当 $CR < 0.1$ 时， A 的不一致性可以接受。对于上述的例子进行一致性计算可得：

$$\begin{aligned} C_{A_1} &= \frac{3.002 - 3}{3 - 1} = 0.001, C_{A_2} = 0.04, C_{A_3} = 0.047, C_{A_4} = 0.0325 \\ CR_{A_1} &= 0.01 / 0.58 = 0.0017, CR_{A_2} = 0.069, CR_{A_3} = 0.081, CR_{A_4} = 0.056 \\ C_{B_1} &= 0.00775, CR_{B_1} = 0.00574 \end{aligned}$$

由计算结果可知不一致性指标均小于 0.1，符合一致性要求。

步骤五： 计算底层元素对目标的权重。

这一过程从目标层到方案层逐层进行。假设准则层中某一元素关于目标层的权重为 b_1, b_2, \dots, b_m 。方案层中某一元素关于准则层的权重为 $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}$ ，则方案层关于目标层的权重为：

$$w_j = \sum_{i=1}^m b_i a_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4-16)$$

对于上述的例子，计算第三层对第二层的权重得：

$$a_1 = \begin{bmatrix} 0.6028 \\ 0.0823 \\ 0.3151 \end{bmatrix}, a_2 = \begin{bmatrix} 0.0702 \\ 0.3706 \\ 0.5589 \end{bmatrix}, a_3 = \begin{bmatrix} 0.0988 \\ 0.3643 \\ 0.5368 \end{bmatrix}, a_4 = \begin{bmatrix} 0.2791 \\ 0.6494 \\ 0.0716 \end{bmatrix}$$

计算第二层对第一层的权重得：

$$b_1 = \begin{bmatrix} 0.4966 \\ 0.1914 \\ 0.2120 \\ 0.0998 \end{bmatrix}$$

因此最后计算的权重为：

$$w = \begin{bmatrix} 0.3617 \\ 0.2538 \\ 0.3844 \\ 0.0001 \end{bmatrix}$$

即各个因素对应的权重为 0.3617, 0.2538, 0.3844, 0.0001。

步骤五：动态调整权重。

通过上述的层次分析方法可以确定各个因素的权重，在实际的运行过程中，数据包实际的端到端时延，丢包率等可能不满足应用的要求，此时应该对各个因素的权重进行调整以使协议满足要求。

①计算实际值与要求值的误差。

$$\delta = \frac{D - \bar{D}}{\bar{D}} \quad (4-17)$$

②根据误差调整权重。

$$w_N = (1 + \delta)w \quad (4-18)$$

③调整权重后重新计算新的时延、投递率等因素，判断是否满足应用要求，如果不满足要求继续调整权重直至满足应用要求。

通过上述的可靠值可以为某个簇头节点选择出最佳的下一跳中继节点，随后为选出的中继节点选择下一跳节点，不断循环直到节点与基站的距离小于能耗模型的距离阈值 d_0 时，此时该簇头节点可以与基站进行直接的通信，结束路径的寻找。此时一条路径寻找完成。

在一条路径寻找完成后，重复上述的过程选出另外两条最佳的路径，三条路径之间不存在相交节点，因此在中继节点的选择过程中已经被选为路径的中继节点应该做标记，下一条路径选取时避开该节点。

(2) 稳定阶段

在该阶段进行的是数据的传输。首先簇内的节点进行数据的收集，之后发送给各自的簇头节点。簇头节点收到节点发送的数据后，通过主路径将数据发送到基站，当主路径发生故障时，则启用备用路径，由备用路径将数据发送给基站。当三条路径都发生故障时，则启用路径更新策略，重新进行路径的选择。

4.3.3 实验与分析

实验在 MATLAB 环境下完成，表 4.3 为仿真实验采用的参数：

表 4.3 实验参数列表

参数名称	值
无线传感器网络节点数目 Num	2500
网络覆盖区域大小 $M_s \times M_s$	$500m \times 500m$
发射电路射频能耗系数 E_{elec}	$50nJ / bit$
节点的初始能量 E_0	$2J$
自由空间下的信号放大能耗系数 ε_{fs}	$10pJ / bit / m^2$
多路径衰减下的信号放大能耗系数 ε_{mp}	$0.013pJ / bit / m^4$
数据融合能量消耗 E_{DA}	$50nJ / bit / message$
控制报文长度 CPL	$200bits$
数据报文长度 DPL	$4000bits$
数据融合比率 ar	0.6
传输距离阈值 d_0	$87.7m$
基站的位置 $(bs.x, bs.y)$	$(250, 875)$
最优簇头数目比率 p_{opt}	0.05

在本章中所提出的 REMRP 路由协议是满足 QoS 要求的路由协议，因此从协议的能量利用效率、数据包的投递率，延迟率等几个方面来衡量协议的性能。本章选取了 SAR 协议和 MMQARP^[62]协议作为本文所提协议的比较对象，其中协议 SAR 是最早引进 QoS 概念的路由协议之一，MMQARP 协议是近期多路径 QoS 路由协议。所选的两个路由协议比较具有代表性。

(1) 能量效率

能耗是衡量协议性能的重要指标。在能量效率的衡量中用节点的存活数量和网络的剩余总能量两个方面来比较协议的性能。协议的存活节点数量如下图所示。

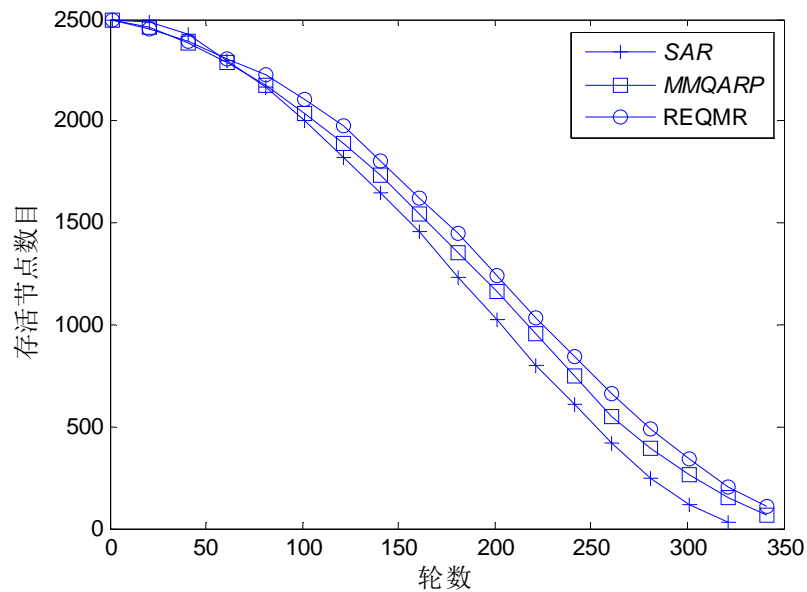


图 4.2 存活节点数量

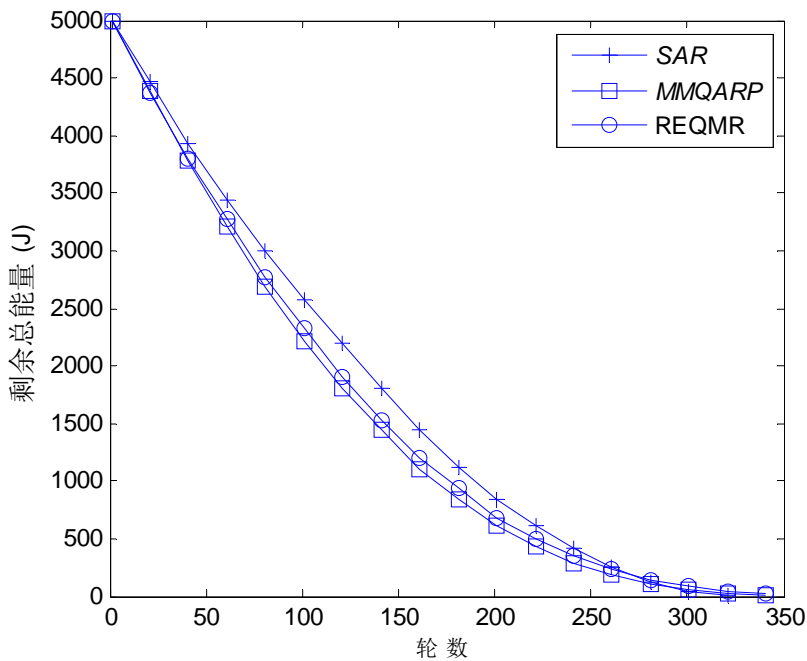


图 4.3 网络剩余总能量

从图 4.2 和 4.3 中可以看出，本章所提 REQMR 协议比 SAR 协议和 MMQARP 协议性能较好，本文所提 REQMR 协议网络的存活时间更长，且每轮的存活节点数更多，SAR 协议的存活节点时间最短。从图 4.3 网络的剩余能量图中可以看出本文所提 REQMR 协议每轮的剩余能量低于 SAR 协议，这是因为 REQMR 协议采用了多路径，需要额外的能量开销，但是均衡了节点

的能量消耗，避免了部分节点提前死亡，因此虽然每轮剩余总能量低于 SAR 协议但是存活节点数高于 SAR 协议，并且网络的生命周期长于 SAR 协议。

（2）数据投递率

在 WSN 中节点的位置是随机的，因此不同的节点可能在同一时刻发起数据传送，当这些数据的目的节点相同时就会造成数据的碰撞从而导致数据的丢失，降低网络的 QoS 质量。当数据发送速度提高时或者节点密度增大会增加数据碰撞的可能，为了检测协议的投递率性能，选择在不同的节点密度下来比较协议的数据包投递率。实验结果如下：

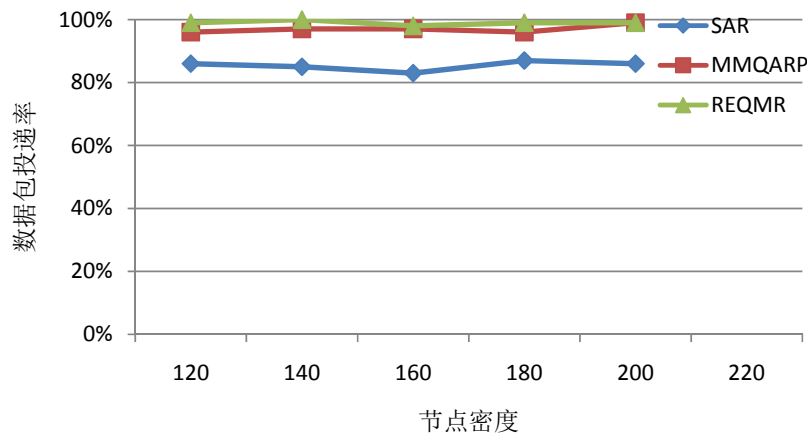


图 4.4 数据包投递率

如图 4.4 所示的是在不同的节点密度下端到端的数据包投递率。如图中所示 SAR 协议的数据包投递率比较低，并且当节点密度发生变化时有一定的波动。MMQARP 具有较高的数据包投递率，并且随着节点密度的变化投递率变化不大，本文所提 REQMR 协议与 MMQARP 协议相比数据包投递率略好，相差不大。本文所提协议数据包投递率变化不大是因为随着节点密度的提高，协议可选的下一跳中继节点也随之增多，因此发生数据碰撞的概率并没有随着节点密度的变化而发生大的变化，所以节点的数据包投递率可以保持较高的成功率。由此可见本文所提的路由协议具有较好的可靠性，能够保证较高的数据投递率，并且可以适应不同的节点密度。

（3）端到端时延

传输时延是衡量 QoS 质量的另一个重要指标。特别是对一些时间敏感的应用，高的传输时延是不可容忍的。影响传输时延的主要有传输路径的长度、传输的等待时间以及数据包的重传，特别是数据包的重传会急剧加大传输的时延。当有较多的数据需要同时传输到同一个节点时，只有一个数据包的数据能被接收，其余的数据包需要等待此次传输完成，造成传输时延增大。因此在不同的节点密度下来比较协议的端到端传输时延。

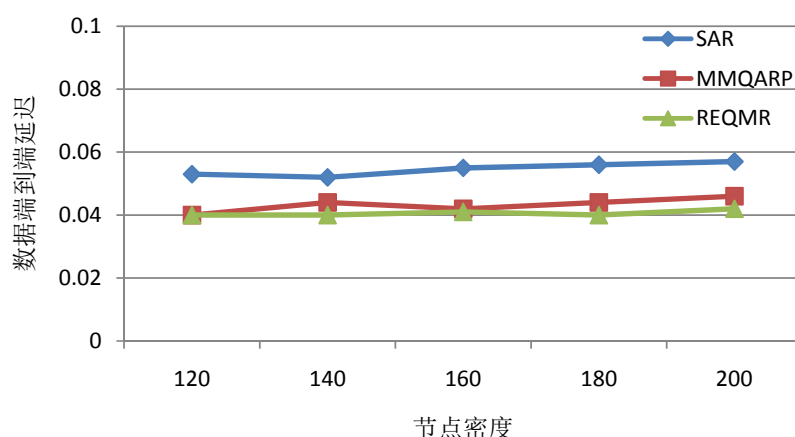


图 4.5 端到端时延

如图 4.5 所示是不同的路由协议在不同节点密度时的端到端时延。由图中可以看到 SAR 协议的端到端时延最高，其次是 MMQARP 协议，本文所提 REQMR 路由协议时延最低。在节点密度发生变化时协议的端到端时延发生上下波动，总体上时延增加，而本文所提的路由协议端到端时延略有增长，变化不明显。原因是虽然节点密度的提高，但是在本文所提的路由协议中可选的下一跳节点也随之增多，节点有更多的传输选择，不必耗费太多的等待时间。由实验结果可知本文所提路由协议在端到端时延上表现良好，可以满足一定的 QoS 要求。

4.4 本章小结

本章对 WSN 的 QoS 进行了分析，确立了无线传感器网络的 QoS 研究目标，即保证能量利用效率的情况下提高数据包的投递率，降低端到端传输时延。随后对影响 QoS 质量的因素进行了分析，确定设计 QoS 路由协议应考虑的因素。随后在此基础上进行路由协议设计，提出了满足 QoS 要求的路由协议 REQMR。协议的思想是通过对节点建立可靠性评价值，平衡各个因素的影响，以此选出最优的节点当担中继节点，在建立可靠性评价值的过程中引入了模糊决策方法，该方法有效的衡量了各因素的重要性。最后通过 MATLAB 进行了实验，并通过和 SAR 协议与 MMQARP 协议进行对比，分析所提协议的性能。实验表明所提协议具有较好的性能。

第五章 无线传感器网络安全多路径路由协议

5.1 问题提出

无线传感器网络的路由协议主要工作是为数据包的传输选择最优路径，以将数据从源节点发送到目的节点。在数据的传输过程中路由信息容易遭到恶意节点的攻击，导致数据丢失或者数据被截获。因此路由协议的安全是无线传感器网络路由协议的重要要求。

在一个安全的无线传感器网络路由协议中，协议不仅要具有较高的能量效率，还要具备抵抗攻击的能力，确保网络中只有合法的节点参与信息的收集。在无线传感器网络中，路由协议容易受到的攻击有虚假路由信息攻击、选择性转发攻击(selective forwarding)、Sinkhole 攻击(黑洞攻击)、女巫攻击(Sybil)、蠕虫洞攻击(Wormhole)、Hello 洪泛攻击(Hello flood)、拒绝服务攻击(DoS 攻击, Denial of Service)等攻击。这些攻击主要有信息破坏和信息截获，造成无线传感器网络能量消耗加剧，影响正常的工作等问题。例如在智能家居的应用中，隐私问题是用户最关注的，如果传感器网络的安全没有足够的保障，将影响用户的使用。

经验表明在考虑无线传感器网络路由协议的安全问题时选择对应的安全机制时，应该在协议的设计根据网络和应用的特点进行设计，在事后增加系统的安全功能不仅效果弱并且成本高，容易影响路由协议的整体性能。本章通过对路由协议的攻击手段进行分析，设计合理的恶意节点检测手段以此保证路由协议的安全。

5.2 问题分析

在 WSN 中大量的节点随机的分布在监测区域中，攻击者很容易将恶意的节点部署到其中并进行攻击。为了保证传感器网络的安全需要具有相应的检测手段识别恶意节点。在 WSN 路由协议中常见的攻击方式有以下几种。

(1) 虚假路由信息攻击。在虚假路由信息攻击中，恶意节点通过欺骗、修改和重复路由信息等手段，以此影响整个网络的路由信息。通过错误的路由信息可以使节点向错误的地方发送数据，导致节点不能正确的选择正确的最优路径，从而能耗大量增加影响网络的生命周期。

这种攻击方式可以通过数据包过滤的方式来对抗，通过对收到的数据包中的源地址进行检测，如果发现数据包中的源地址存在问题则丢弃数据包并将节点标记为恶意节点。

(2) 选择性转发攻击。这种攻击方式是恶意节点在收到数据包后选择性转发数据包或者不转发数据包，使得数据丢失，目的节点不能收到完整的数据。此外这些恶意节点也能够自己伪

造数据包，以此干扰网络的正常通信，增加网络的能耗。

这种攻击方式是通过对数据包进行不同的处理，或转发或丢弃从而达到破坏信息传递的目的。对抗这种攻击方式可以采用多路径的机制，这样即使某条路径上的数据被丢弃了目的节点仍可从其他路径获得数据。这种机制是以降低无线传感器网络的能耗性能为代价的。

(3) Sinkhole 攻击。Sinkhole 攻击是恶意节点通过伪造一个虚假的距离信息，宣称自己能量充足、路径短、信道可靠等手段然后广播发送消息至其他节点，让其他节点误以为该恶意节点是最优节点，从而选择该节点作为中继节点。该攻击方式可以吸引周围大量的数据包，并且可以和其他攻击方式相结合，具有较大的破坏性。

应对这种攻击可以通过监测网络中的流量以此发现恶意节点，或者通过节点身份认证、多路径路由等手段来抵御 Sinkhole 攻击。

(4) Sybil 攻击（女巫攻击）。在 Sybil 攻击中恶意节点通过伪造的手段，从而以不同的身份出现在网络的多个地方，通常是网络的关键位置。使恶意节点有更大的几率被选为中继节点，通常和其他攻击方式结合。

(5) 蠕虫洞攻击（Wormhole 攻击）。Wormhole 攻击是通过在网络中部署的两个恶意节点联合来进行攻击的，其中一个恶意节点临近基站，另一个则相反是在远离基站的位置。离基站较远的攻击通过广播宣称自己能够和离基站近的恶意节点建立起高效、低时延的链路，吸引其他节点将数据包发到恶意节点，从而达到破坏正常通信的目的。Wormhole 攻击还可以和其他攻击方式相结合。

(6) Hello 洪泛攻击。在路由协议中，经常需要发送 HELLO 报文。恶意节点以大功率泛洪 HELLO 报文从而影响其他节点的判断，建立起错误的距离信息。在随后的数据发送中节点以正常的功率向恶意节点发送数据，数据根本无法达到目的地。这将造成大量的能量损耗。

(7) DoS 攻击（Denial of Service）。DoS 攻击是恶意节点通过不断的发送数据，从而消耗目的节点的能量，或者占用信道从而使得其他正常节点的正常通信不能被接受，以此影响网络的正常工作。

通过以上的分析可以发现无线传感器网络的攻击方式和传统的方式具有一些差异。由于无线传感器网络能量有限的特性，使得攻击者可以有更多的攻击方式。攻击者伪造信息等手段使得无线传感器网络大量消耗能量，降低网络的生命周期，不在局限于数据截获的攻击方式。因此传统的加密手段并不能有效的应对这些攻击，WSN 路由协议需要新的机制来发现恶意节点。

本章通过对传感器通信特点的分析，建立节点的信任评价机制，以此检测可疑节点的存在，通过信任评价机制能够识别网络中的恶意节点，建立安全的多路径路由协议。

5.3 协议设计

在无线传感器网络中能耗问题一直是研究的重点，而随着应用的推广安全问题变成无线传感器网络亟待解决的问题。当无线传感器网络受到攻击时，不仅容易造成信息的泄露，还会影响网络的正常通信，增加网络的能耗。本文协议通过对数据进行收集然后分析，以此发现可能存在的恶意节点，随后通过部署在网络中的检测节点对可疑节点进行跟踪、检测，确定节点是否恶意节点并做出相应的响应。

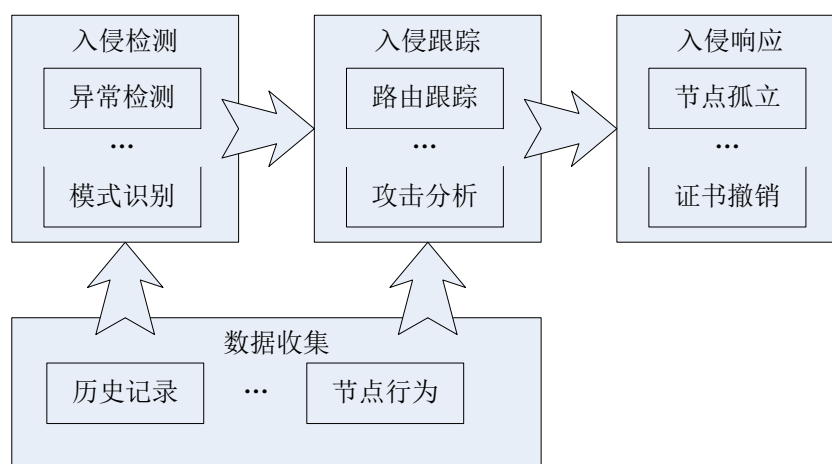


图 5.1 入侵检测框架

在对数据的收集和分析过程中采用节点的信任评价机制来发现可疑节点。在评价节点的可信值时可以从以下几个因素进行分析。

（1）节点的发送率。发送率是节点在一段时间下数据发送的数量，当节点发送的数据量远远小于其他节点的数据量时，该节点可能为自私节点，有可能在进行选择性转发攻击。节点的发送数据量远超其他节点时也可能在进行拒绝服务攻击。

（2）数据的新鲜性。若某个节点反复发送相同的数据包，则该节点可能在进行重放攻击，以消耗节点的能量。

（3）节点的转发率。在多路径路由协议中，数据通过中继节点发送到基站，当节点收到数据而不进行转发时可以判定其为恶意节点在进行选择性转发、黑洞攻击等攻击。

（4）数据包的完整性。为了防止恶意节点篡改数据包的内容，通过验证数据包的完整性可以检测节点是否存在恶意行为。

（5）剩余能量。在无线传感器网络中，正常的节点能量是有限的，若某个节点在进行多次的数据转发之后，所宣称的剩余能量变化不大，则该节点可能为恶意节点。

本章的主要思想是通过在网络中部署检测节点，通过对节点的可信值进行评价从而发现恶

意节点，保证网络的安全。

5.3.1 网络模型与能耗模型

在本章中对无线传感器网络做出如下假设：

- (1) 假设节点均匀的分布在监测区域中，并且每个节点都具有自己唯一的 ID；
- (2) 节点在部署完成后位置不再发生变动，并且节点能量有限不可进行补充。在监测区域中基站位置是固定的并且具有不受限制的能量，本章假设基站的位置部署在监测区域外面；
- (3) 在传感器网络中的每个节点都具有相同的处理能力，都可被选为簇头节点或者只是作为普通节点；
- (4) 节点的初始能量相同，节点可以获取自身的当前能量，即剩余能量 E_r ；
- (5) 节点的通信功率可变，节点就可以根据需提高发射功率增大通信距离，或者降低功率节省能量；
- (6) 节点的链接是对称的。节点根据收到的信号计算出两个节点之间的距离；

在本文的无线传感器网络模型中前三项属性是一般无线传感器网络的典型设置。第 4 项属性表明节点具有获取相关能量信息的能力。第 5 项属性主要是节省能耗，根据传输距离调节射频收发器的发射功率从而节省不必要的能量消耗。

网络的能耗模型采用第三章所述的能量消耗模型。

5.3.2 算法流程

本章协议是对第四章的多路径路由协议的改进，在本章在路由协议中加入恶意节点检测机制。为了实现检测恶意节点的存在，本章所提路由协议在网络中引入检测节点，通过建立可信度评价函数，对无线传感器网络中的节点进行可信评价，以此检测节点是否可信。

(1) 建立阶段

1) 簇头选举

协议的簇头选举采用和 LEACH 协议一样的策略，即每轮采用随机的方式来选择一组节点担当簇头。簇头的选举采用了概率模型，以此均衡簇头的均匀性。选举机制为：在每次选择簇头之前每个传感器节点随机产生一个 0~1 之间的随机数，将此数与给定的阈值 $T(N)$ 进行比较，如果产生的随机数小于阈值，则该节点可以当选为簇头。阈值 $T(N)$ 的计算公式如下：

$$T(N) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \times [r \bmod (1/p)]}, & N \in G \\ 0, & N \notin G \end{cases} \quad (5-1)$$

$$p = k / N \quad (5-2)$$

在上式中，参数 k 是网络中每轮的簇头数目， N 是网络中传感器节点的总数目，由此计算的参数 p 是节点成为簇头节点的百分数。 r 是当前的轮数， G 是在过去的 $1/p$ 轮没有当选为簇头节点的集合， mod 是求模运算。在上式的簇头选择机制中，没有担任过簇头的节点随着轮数的增加，其当选为簇头的概率会增大，从而保证在 $1/p$ 轮内每个节点都能当选一次簇头节点，以此均衡节点的能量消耗。

2) 成簇

在簇头节点选取好之后，每个簇头节点采用相同的功率向整个网络发送广播，网络中的节点可以根据其收到数据的信号强弱来选择加入哪个簇中。由于簇头广播功率相同，因此节点收到信号越强说明节点与簇头的距离越近，节点选择信号强的节点加入该簇中，节点通知相应的簇首节点完成簇的建立。

3) 簇间路由选择

本章协议的簇间路由选择使用第四章所使用的簇间路由选择方法，在第四章中的簇间路由选择中建立了节点的可靠性评价模型，该模型同时考虑了节点的能耗需求和 QoS 需求。在本章协议的协议中主要考虑的是协议的安全性，因此不对 QoS 进行要求。所以可将中继节点选择的评价函数修改如下：

$$Rvalue = w_1 f_{Er} + w_2 f_{PDR} + w_3 f_{Dis} + w_4 f_{Delay} \quad (5-3)$$

其中 $w_2 = w_4 = 0, w_1 + w_3 = 1$ ，即在选择中继节点时只考虑能量因素，而不考虑协议的 QoS 要求。

(2) 安全检测机制

在安全检测中，主要分为三个步骤，入侵检测、入侵定位和入侵相应。在入侵检测环节中主要通过分析收到的数据以及对节点的行为进行分析来发现异常，异常行为主要有基站收不到某条路径的数据，基站重复收到相同的数据包，节点的发送率在阈值之外等异常。在入侵定位阶段本章协议通过节点的可信值评价来判断节点是否是恶意节点。最后在入侵相应中将恶意节点从网络中屏蔽。安全检测机制的流程图如下：

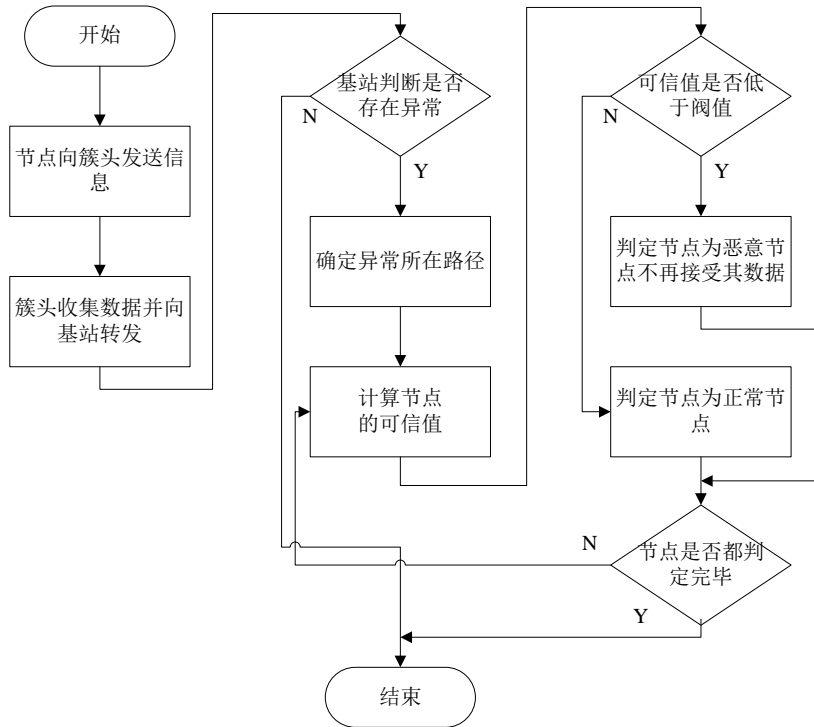


图 5.2 安全检测机制流程图

为了定位恶意节点引入检测节点。检测节点通过向可疑节点发送检测报文，并对接收到的检测报文进行分析，以此检测该节点是否为恶意节点。

在检测报文中通过发送经过标记的数据，向可疑节点发送该报文，随后通过验证数据的完整性、统计数据包的转发率等数据，对可信值进行计算。节点的可信值（Trusted Value）评价取决于节点的发送率、数据的新鲜性、节点的转发率、数据的完整性以及节点的剩余能量，通过这几个因素的综合评价来计算节点的可信值。

1) 节点的发送率（Send Ratio）因素。在无线传感器网络中正常节点的数据包发送率在一定的范围内，当节点的数据包发送量超过一定值时，可认为其在进行拒绝服务攻击，当发送量小于一定值时可认为其为自私节点。因此发送率因素的计算公式如下：

$$f_{SR}(i) = \begin{cases} \frac{SP_i - TS_L}{\overline{E_{sp}} - TS_L}, & SP_i < \overline{E_{sp}} \\ \frac{TS_H - SP_i}{TS_H - \overline{E_{sp}}}, & SP_i > \overline{E_{sp}} \end{cases} \quad (5-4)$$

在式 5-1 中 SP_i 表示的是节点发送的数据包数目， $\overline{E_{sp}}$ 表示的是网络中节点发送数据包的均值， TS_L 是下限值， TS_H 是上限值。当节点 i 发送的数据包数目在阈值之外时，计算节点的 SR_i 值。

2) 数据的新鲜性。通过对节点所发送数据进行分析, 若节点重复发送内容相同的数据包则节点可能在进行重放攻击, 因此可以将数据的新鲜性作为可信值的一个评价指标。数据的新鲜计算如下:

$$f_{FV}(i) = \frac{NP_i}{RP_i + NP_i} \quad (5-5)$$

其中 NP_i 表示基站收到的节点 i 发出的新的数据包, RP_i 表示重复收到的数据包。

3) 节点的转发率。在多路径路由协议中簇头节点通过中继的方式与基站进行通信, 通过评价节点的转发率可以判断节点是否存在选择性转发攻击、黑洞攻击等攻击方式, 转发率计算如下:

$$f_{TV}(i) = \frac{TP_i}{NRP_i} \quad (5-6)$$

其中 TP_i 表示的是节点 i 转发的数据包数量, NRP_i 为节点 i 收到的需要转发的数据包数目。

4) 数据的完整性。在无线传感器网络中当网络质量不佳时有可能导致接收到的数据包不完整, 恶意节点也可能对数据包进行篡改导致数据包不完整。因此数据包的完整性可以作为节点可信的评价指标, 计算公式如下:

$$f_{IR}(i) = \frac{IP_i}{NRP_i} \quad (5-7)$$

其中 IP_i 表示的是完整的数据包数目, NRP_i 表示基站收到的需要总的数据包数目。

5) 剩余能量。在无线传感器网络中, 正常节点的能量是有限的, 随着时间的进行节点的剩余能量逐渐减少, 而网络中恶意节点的能量通常是比较充足的, 因此可以将节点的剩余能量作为其中一个评价指标, 计算公式如下:

$$f_E(i) = \frac{\overline{E_N}}{E_{cur}(i) - \overline{E_N}} \quad (5-8)$$

其中 $E_{cur}(i)$ 表示的是节点的剩余能量, $\overline{E_N}$ 表示的是簇头节点的剩余能量的平均值。

节点的可信值可由上述指标通过加权平均计算得到, 根据具体的应用环境, 可以赋予上述评价指标不同的权重。为了降低网络环境的变化对可信值的影响, 可以将历史的可信值加入计算公式中, 因此节点的可信值计算公式如下:

$$Tvalue = \sigma(w_1 f_{SR}(i) + w_2 f_{FV}(i) + w_3 f_{TV}(i) + w_4 f_{IR}(i) + w_5 f_E(i)) + (1 - \sigma) \overline{Tvalue_{old}} \quad (5-9)$$

式中 σ 为参数, $\overline{Tvalue_{old}}$ 为历史可信值的均值, w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 为权重系数, 可以根据

具体的应用环境赋予其不同的值，且权重系数满足如下关系

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 = 1 \quad (5-10)$$

在计算完可信值后，将其与预设的可信值阈值相比较，若可信值低于阈值，则将其认定为恶意节点。

(2) 稳定阶段

在该阶段进行的是数据的传输。首先簇内的节点进行数据的收集，之后发送给各自的簇头节点。簇头节点收到节点发送的数据后，通过主路径将数据发送到基站，当主路径发生故障时，则启用备用路径，由备用路径将数据发送给基站。当三条路径都发生故障时，则启用路径更新策略，重新进行路径的选择。

5.3.3 实验与分析

实验在 MATLAB 环境下完成，实验环境为 100 个节点分布在 $100m \times 100m$ 的正方形区域内，基站位于区域外，表 5.1 为试验中采用的参数：

表 5.1 实验参数列表

参数名称	值
无线传感器网络节点数目 Num	100
网络覆盖区域大小 $M_s \times M_s$	$100m \times 100m$
发射电路射频能耗系数 E_{elec}	$50nJ / bit$
节点的初始能量 E_0	$0.5J$
自由空间下的信号放大能耗系数 ε_{fs}	$10pJ / bit / m^2$
多路径衰减下的信号放大能耗系数 ε_{mp}	$0.013pJ / bit / m^4$
数据融合能量消耗 E_{DA}	$50nJ / bit / message$
控制报文长度 CPL	$200bits$
数据报文长度 DPL	$4000bits$
数据融合比率 ar	0.6
传输距离阈值 d_0	$87.7m$
基站的位置 $(bs.x, bs.y)$	(50,175)
最优簇头数目比率 p_{opt}	0.05

在本章中所提的路由协议是一个安全的多路径路由协议，因此本章的实验从 WSN 协议的能耗、数据包的投递率、恶意节点的识别率和误判率来衡量网络的性能。实验选取了 CMRP^[63] 协议和 SMART^[64] 协议作为对比，其中 CMRP 协议是一个多路径路由协议，SMART 协议是安

全多路径路由协议，并且 SMART 是近期的研究工作，所选的两个路由协议具有较高的代表性，可以较好的衡量本文所提协议的性能。

（1）网络的能耗

实验首先对三种路由协议的能耗进行了对比。图 5.3 给出了网络中存活节点数量随时间的变化的情况，图 5.4 给出了网络中剩余总能量随时间变化的情况。

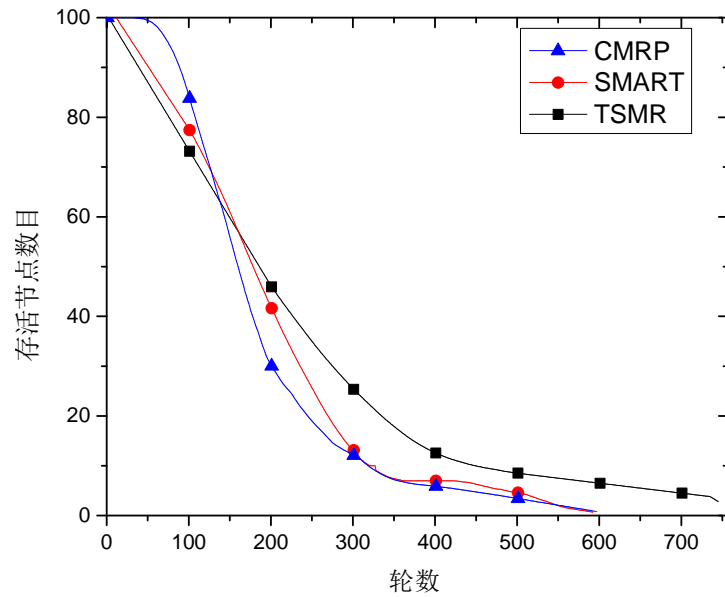


图 5.3 存活节点数量

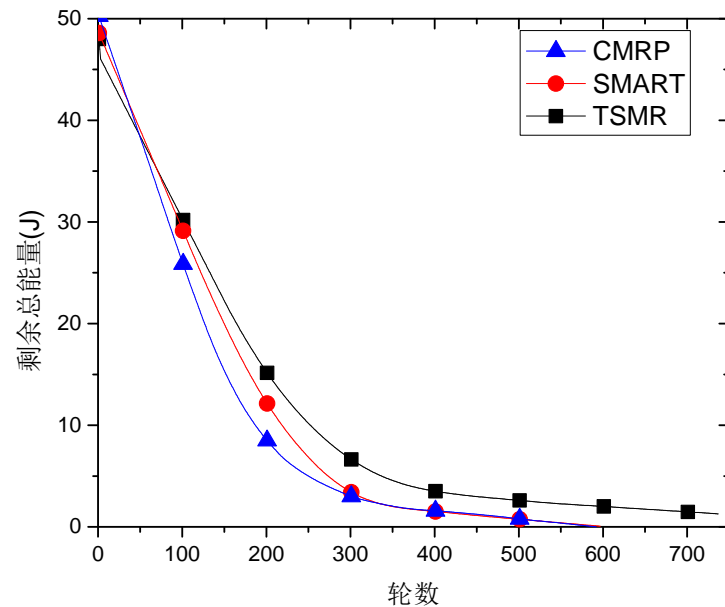


图 5.4 网络剩余总能量

从图 5.3 和图 5.4 中可以看到 SMART 协议和 CMRP 协议相比存活时间相差不大，即引入

安全机制的 SMART 协议和没有安全机制的 CMRP 协议相比能耗损失不大。而本文所提的安全路由协议 TSMR 是基于上一章的多路径构建方法,虽然增加了安全机制,但是协议的生存时间仍然高于 SMART 协议和 CMRP 协议,这说明协议在安全上造成的额外开销不大,因此协议仍然能保持较好的能耗性能。

(2) 数据包的投递率

在以下的实验中,主要检验协议对选择性转发攻击的抵抗能力。实验假设网络中存在 5 个攻击节点,并且攻击节点以 5% 概率丢包。攻击节点的攻击行为是按照假定的概率丢弃数据包。

图 5.5 和 5.6 给出了三个协议的网络投递率和丢包率随时间变化的情况。

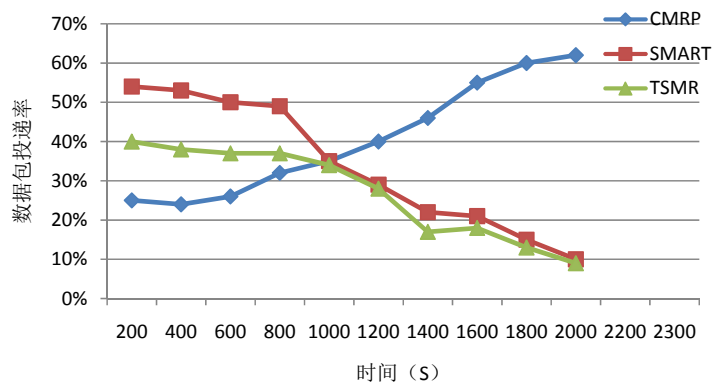


图 5.5 协议的网络投递率

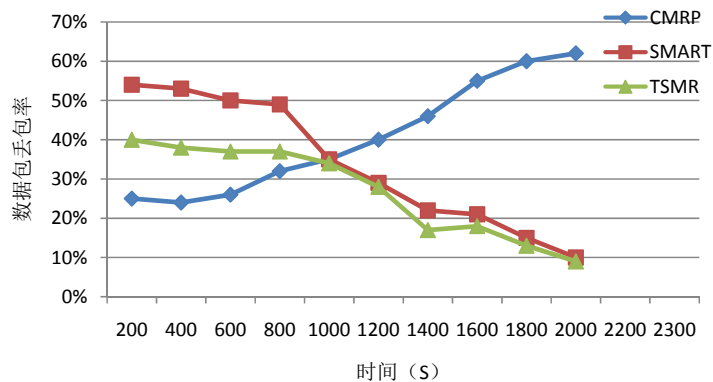


图 5.6 协议的丢包率

从图 5.5 中可以看出 CMRP 协议的数据包投递率随着时间的增加而减少,而 SMART 协议和 TSMR 协议的网络投递率随着时间的增加而增大。这是因为 CMRP 协议不具有安全检测机制,不能识别网络中的恶意节点,以此随着时间的增加丢失的数据包越来越多。而 SMART 协议和 TSMR 协议具有安全检测机制能够识别网络中的恶意节点。TSMR 协议的投递率在实验前期并

不高。这是因为在网络运行初期，对于网络中节点的丢包率和投递率没有足够的数据，无法有效的识别恶意节点，而随着时间的积累，协议能够获取足够的数据用于识别网络中的恶意节点。因此协议的数据包投递率随着时间的增加而提高。从图 5.6 中可以本文所提 TSMR 协议能够较好的识别恶意节点，网络的数据包投递率略高于 SMART 协议。

（3）识别率和误判率

图 5.7 给出的是当恶意节点以 10 概率丢包时协议的识别率和误判率。图中显示的是在一段时间内识别率和误判率与恶意节点数量的关系。

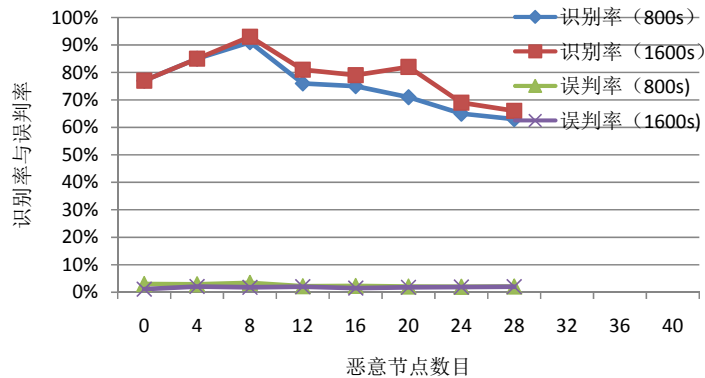


图 5.7 识别率和误判率与恶意节点数量关系图

从图 5.7 中可以看出，当恶意节点数目数量很少时，造成的丢包率等情况比较少，TSMR 协议无法及时发现异常行为，因此识别率较低，随着恶意节点数目增多识别率增高。当恶意节点数目增长到一定程度时随着恶意节点数目的增多则 TSMR 协议的识别率呈现下降趋势，而误判率上下波动变化不大。造成识别率下降的原因是在统计时间内部分恶意节点尚未参与到路由中，协议不能检测到恶意节点的存在。

5.4 本章小结

本章首先分析了无线传感器网络中的安全需求，随后分析了无线传感器网络中存在的安全问题及常见的攻击手段。通过分析网络中存在的攻击手段，提出了一个基于节点信任评价机制的安全路由协议 TSMR，在该协议中通过分析节点的行为以及对数据内容进行分析，以此发现可疑节点，随后通过可信值评价函数来判断节点是否为恶意节点。最后通过实验仿真对所提的路由协议进行了性能分析与评估，并与现有的安全路由协议进行了比较。实验结果表明所提路由协议能够较好的识别恶意节点，保证网络的安全。

第六章 总结与展望

无线传感器网络路由协议作为无线传感器网络中重要的一环，一直是学术界、工业界研究的宠儿。由于独特的应用优势，使其能够在军事，自然，民生，医疗以及航空等诸多领域得到广泛运用。结合不同的应用场景，本文分别从能耗、QoS 和安全方面对多路径路由协议进行了分析，下面对本文的工作进行总结并对将来能够进行的研究内容进行展望。

6.1 工作总结

本文在分析了基本无线传感器网络的相关背景知识后，开始对无线传感器网络路由协议进行重点分析。首先简要分析了无线传感器网络路由协议的特点和设计目标，并对现有的路由协议进行了分析，从中发现多路径路由协议在 QoS 和安全方面所具有的优点。在 QoS 方面不同的应用对于服务质量的要求各不相同，而为了提高 QoS 质量往往需要损失一定的能耗代价，因此协议需要考虑能耗与 QoS 的平衡。在安全性方面，提高安全性也可能损失一定的能耗代价。紧接着本文对无线传感器网络多路径路由协议进行了研究，分别从多路径路由协议下的能耗，多路径路由协议下的 QoS 以及多路径路由协议下的安全进行了分析。

(1) 首先分析了多路径路由协议的能耗问题，主要针对无线传感器网络中存在的能量消耗不均衡问题进行了研究，然后提出了基于能量消耗均衡的 NUDBEMR 协议，该协议通过不均匀分区以及多路径的构建来均衡网络的能量消耗，并通过实验对 NUDBEMR 协议进行了仿真与分析；

(2) 分析了多路径路由协议下的 QoS 问题，然后从 QoS 需求角度出发提出了 REQMR 多路径路由协议，该协议通过建立节点的可靠性评价函数，通过模糊决策确定权重系数来平衡节点的能耗和 QoS 质量，使协议可以满足应用的 QoS 需求，同时能耗较低，最后通过实验仿真对 REQMR 协议进行了性能分析与评估。

(3) 分析了多路径路由协议下的安全问题，然后提出了一个安全的多路径路由协议 TSMR，多路径路由协议自身能够较好的抵抗一些攻击，该协议通过建立可信评价机制来检测网络中是否存在恶意节点，最后通过仿真实验对协议的能耗和安全性能进行了分析与评价。

6.2 未来工作展望

本文提出的三种算法分别从多路径路由协议的能耗、QoS 和安全方面进行了研究。在增加 QoS 要求和安全机制时损失了一定的能耗，总体上能够做到能耗、QoS 和安全之间的平衡，但

由于客观存在的一些问题以及研究的盲点，本文的工作还有待进一步的研究：

(1) 在提出的 NUDBEMR 协议中，从能量消耗不均衡的问题入手，通过对网络进行非均匀的分区结合多路径的手段来提高能量的利用效率，在非均匀分区时提出了分层对网络进行划分可以有效的降低分区的计算量，但是算法所提的分层方法是静态的，在网络的拓扑结构发生变化时没有动态的方法进行调节，动态的算法有待继续研究。

(2) 在提出的 REQMR 协议和 TSMR 协议中，算法从平衡能耗和 QoS、安全之间进行了研究，通过评价函数来平衡协议的能耗和 QoS 需求及安全需求，在评价函数中考虑的参数有待继续研究。

(3) 从总体来看，文中对于无线传感器网络多路径路由协议的研究偏向于提高 QoS 性能和安全性，对于多路径路由协议的路径规划方面研究不多，如何有效的进行路径选择以及是否需要数据融合等方面的问题有待于更进一步得研究。

(4) 最后则是一个客观存在的问题，虽然实验中尽量靠近实际情况来进行假设模拟但主要从能耗角度出发对于网络中的通信消耗，广播消耗等等都有明确的量化处理，而网络中实际的感知能力、传输过程中意外耗损等情况则很难被模拟。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 2002, 38(4):393~422.
- [2] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Computer networks*, 2008, 52(12):2292~2330.
- [3] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 2002, 38(4):393~422.
- [4] Akkaya K, Younis M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, 2005, 3(3):325~349.
- [5] Al-Karaki J N, Kamal A E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *Wireless communications, IEEE*, 2004, 11(6):6~28.
- [6] 唐勇, 周明天, 张欣. 无线传感器网络路由协议研究进展. *软件学报*, 2006, 17(3):410~421.
- [7] Lim H, Kim C. Flooding in wireless ad hoc networks. *Computer Communications*, 2001, 24(3):353~363.
- [8] Kulik J, Heinzelman W, Balakrishnan H. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 2002, 8(2/3):169~185.
- [9] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, et al. Directed diffusion for wireless sensor networking. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 2003, 11(1):2~16.
- [10] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, et al. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE personal communications*, 2000, 7(5):16~27.
- [11] Braginsky D, Estrin D. Rumor routing algorithm for sensor networks. *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, ACM, 2002:22~31.
- [12] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *System Sciences*, 2000. *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on*, IEEE, 2000:8020.
- [13] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems. *Aerospace conference proceedings*, 2002. IEEE, IEEE, 2002:3~1125.
- [14] Younis O, Fahmy S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 2004, 3(4):366~379.
- [15] Manjeshwar A, Agrawal D P. TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. *Parallel and Distributed Processing Symposium, International*, IEEE Computer Society, 2001:2009~2015.
- [16] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, ACM, 2001:70~84.
- [17] Yu Y, Govindan R, Estrin D. Geographical and Energy Aware Routing: a recursive data

- dissemination protocol for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*, 2001, 13(9):924~935.
- [18] Niculescu D, Nath B. Trajectory based forwarding and its applications. *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*, ACM, 2003:260~272.
- [19] Kim H S, Abdelzaher T F, Kwon W H. Minimum-energy asynchronous dissemination to mobile sinks in wireless sensor networks. *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, ACM, 2003:193~204.
- [20] Luo J, Hubaux J. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks. *INFOCOM 2005. 24th annual joint conference of the IEEE computer and communications societies*. *Proceedings IEEE, IEEE*, 2005:1735~1746.
- [21] Shah R C, Roy S, Jain S, et al. Data mules: Modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2003, 1(2):215~233.
- [22] Zhang W, Cao G, La Porta T. Dynamic proxy tree-based data dissemination schemes for wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 2007, 13(5):583~595.
- [23] He T, Stankovic J A, Lu C, et al. SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks. *Distributed Computing Systems*, 2003. *Proceedings. 23rd International Conference on, IEEE*, 2003:46~55.
- [24] Akkaya K, Younis M. An energy-aware QoS routing protocol for wireless sensor networks. *Distributed Computing Systems Workshops*, 2003. *Proceedings. 23rd International Conference on, IEEE*, 2003:710~715.
- [25] Ye M, Li C, Chen G, et al. EECS: an energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks. *Performance, Computing, and Communications Conference*, 2005. *IPCCC 2005. 24th IEEE International, IEEE*, 2005:535~540.
- [26] Soro S, Heinzelman W B. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering. *Parallel and Distributed Processing Symposium*, 2005. *Proceedings. 19th IEEE International, IEEE*, 2005:8.
- [27] 李成法, 陈贵海, 叶懋, 等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议. *计算机学报*, 2007, 30(1):27~36.
- [28] 王毅, 张德运, 梁涛涛. 无线传感器网络分区能耗均衡的非均匀分簇算法. *西安交通大学学报*, 2008, 42(4):389~394.
- [29] 蒋畅江, 石为人, 唐贤伦, 等. 能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议. *软件学报*, 2012, 23(5):1222~1232.
- [30] 孙彦清, 彭舰, 刘唐, 等. 基于动态分区的无线传感器网络非均匀成簇路由协议. *通信学报*, 2014, 35(1):198~206.
- [31] Nikolidakis S A, Kandris D, Vergados D D, et al. Energy efficient routing in wireless sensor networks through balanced clustering. *Algorithms*, 2013, 6(1):29~42.
- [32] Pantazis N, Nikolidakis S A, Vergados D D. Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey. *Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, 2013, 15(2):551~591.
- [33] Tunca C, Isik S, Donmez M Y, et al. Distributed mobile sink routing for wireless sensor networks: A survey. *Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, 2014, 16(2):877~897.

- [34] Butun I, Morgera S D, Sankar R. A survey of intrusion detection systems in wireless sensor networks. *Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, 2014, 16(1):266~282.
- [35] Fadel E, Gungor V C, Nassef L, et al. A survey on wireless sensor networks for smart grid. *Computer Communications*, 2015, 71(1):22~33.
- [36] Villas L, Boukerche A, Ramos H S, et al. DRINA: a lightweight and reliable routing approach for in-network aggregation in wireless sensor networks. *Computers, IEEE Transactions on*, 2013, 62(4):676~689.
- [37] Branch J W, Giannella C, Szymanski B, et al. In-network outlier detection in wireless sensor networks. *Knowledge and information systems*, 2013, 34(1):23~54.
- [38] Liu Y, He Y, Li M, et al. Does wireless sensor network scale? A measurement study on GreenOrbs. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 2013, 24(10):1983~1993.
- [39] Ren F, Zhang J, Wu Y, et al. Attribute-aware data aggregation using potential-based dynamic routing in wireless sensor networks. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 2013, 24(5):881~892.
- [40] Alrajeh N A, Khan S, Lloret J, et al. Secure routing protocol using cross-layer design and energy harvesting in wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 2013(1):893~900.
- [41] El-Moukaddem F, Torng E, Xing G, et al. Mobile relay configuration in data-intensive wireless sensor networks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 2013, 12(2):261~273.
- [42] Zahariadis T, Trakadas P, Leligou H C, et al. A novel trust-aware geographical routing scheme for wireless sensor networks. *Wireless personal communications*, 2013, 69(2):805~826.
- [43] Li Z, Liu Y, Li M, et al. Exploiting ubiquitous data collection for mobile users in wireless sensor networks. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 2013, 24(2):312~326.
- [44] Xu Y, Ren F, He T, et al. Real-time routing in wireless sensor networks: A potential field approach. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 2013, 9(3):35.
- [45] Yao Y, Cao Q, Vasilakos A V. EDAL: An energy-efficient, delay-aware, and lifetime-balancing data collection protocol for wireless sensor networks. *Mobile ad-hoc and sensor systems (MASS)*, 2013 IEEE 10th international conference on, IEEE, 2013:182~190.
- [46] Sha K, Gehlot J, Greve R. Multipath routing techniques in wireless sensor networks: A survey. *Wireless Personal Communications*, 2013, 70(2):807~829.
- [47] Al-Hamadi H, Chen R. Redundancy management of multipath routing for intrusion tolerance in heterogeneous wireless sensor networks. *Network and Service Management, IEEE Transactions on*, 2013, 10(2):189~203.
- [48] Tyagi S, Kumar N. A systematic review on clustering and routing techniques based upon LEACH protocol for wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 2013, 36(2):623~645.
- [49] Jin R, Gao T, Song J, et al. Passive cluster-based multipath routing protocol for wireless sensor networks. *Wireless networks*, 2013, 19(8):1851~1866.
- [50] Gnawali O, Fonseca R, Jamieson K, et al. CTP: An efficient, robust, and reliable collection tree protocol for wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 2013,

- 10(1):16.
- [51] Faisal M, Al-Muhtadi J, Al-Dhelaan A. Integrated protocols to ensure security services in wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 15(3):1492~1519.
- [52] Li S, Zhao S, Wang X, et al. Adaptive and secure load-balancing routing protocol for service-oriented wireless sensor networks. *Systems Journal, IEEE*, 2014, 8(3):858~867.
- [53] Radi M, Dezfouli B, Bakar K A, et al. IM2PR: interference-minimized multipath routing protocol for wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 2014, 20(7):1807~1823.
- [54] Cheng L, Niu J, Cao J, et al. Qos aware geographic opportunistic routing in wireless sensor networks. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 2014, 25(7):1864~1875.
- [55] Wang L, Yang J, Lin Y, et al. Keeping Desired QoS by a Partial Coverage Algorithm for Cluster-Based Wireless Sensor Networks. *Journal of Networks*, 2014, 9(12):3221~3229.
- [56] Sharma S, Jena S K. Cluster Based Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2015, 45(2):14~20.
- [57] Hammoudeh M, Newman R. Adaptive routing in wireless sensor networks: QoS optimisation for enhanced application performance. *Information Fusion*, 2015, 22:3~15.
- [58] Jiang J, Han G, Guo H, et al. Geographic multipath routing based on geospatial division in duty-cycled underwater wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 2015, 59:4~13.
- [59] Gao T, Song J, Zou J, et al. An overview of performance trade-off mechanisms in routing protocol for green wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 2015:1~23.
- [60] Pham P P, Perreau S. Performance analysis of reactive shortest path and multipath routing mechanism with load balance. *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies, IEEE*, 2003:251~259.
- [61] Cobo L, Quintero A, Pierre S. Ant-based routing for wireless multimedia sensor networks using multiple QoS metrics. *Computer networks*, 2010, 54(17):2991~3010.
- [62] Balachandra M, Prema K V, Makkithaya K. Multiconstrained and multipath QoS aware routing protocol for MANETs. *Wireless Networks*, 2014, 20(8):2395~2408.
- [63] Sharma S, Jena S K. Cluster Based Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2015, 45(2):14~20.
- [64] Lasla N, Derhab A, Ouadjaout A, et al. SMART: Secure Multi-paths Routing for wireless sensor networks: Lecture Notes in Computer Science, HEIDELBERGER PLATZ 3, D-14197 BERLIN, GERMANY, 2014[C].

致谢

时光荏苒，转眼间两年半的研究生学习生涯就要结束了。在这两年半的学习生活中，我学到了许多有益的东西，我庆幸我能在南航这样一个良好的环境中度过我的研究生学习生涯。在这两年半的时间中我经历了许多，不仅学到了专业知识，也学会了为人处世的道理。在此期间我遇到了很多的良师益友，他们给了我很多的指引和帮助，使我能够顺利地完成学业，再此谨向他们表示衷心的感谢！

首先，感谢我尊敬的导师许峰副教授，整个研究生生涯许老师给了我许多帮助。在学习中学老师以实事求是，严谨踏实的治学态度对我进行指引，教会了我学习方法，引导我走上学习研究的道路。许老师在自己的专业方面具有渊博的学识，在我的论文写作给予了重要的帮助，从我的论文选题到撰写的各个阶段给予了许多帮助，在我研究陷入停顿时帮我指出方向，让我能够继续进行学习研究。许老师给予我最大的财富是研究的方法以及求学的态度，这是我能够受用终身的财富。在生活中，许老师言传身教，通过自身的经验教会了我为人处世的许多道理，让我更好的成长。在此对许老师再次致以崇高的感谢。

同时感谢教研室谭文安、夏正友、施慧彬等老师，感谢你们对我课题的指导和帮助。

感谢教研室师兄周韦，崔积峰，徐菁风，对我的帮助和指导，感谢徐军、师妹何颖、侯雅婷，感谢你们陪伴和支持。感谢室友王胜、于渤海、何一凡，感谢你们对我生活、精神上的支持和帮助。同你们的友谊将是我一生宝贵的财富。

特别感谢我的家人，你们一直是我不断前进的动力源泉。感谢父母寄予我生命之恩和二十五年的养育之恩。感谢亲戚朋友的支持和鼓励，感谢你们，你们是我不断前进的动力。

在学期间的研究成果及发表的学术论文

攻读硕士学位期间发表（录用）论文情况

1. Xu Feng, Zhu Wenzhi, Xu Jingfeng. A low energy adaptive clustering multi-hop routing protocol based on fuzzy decision. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2015,29(6):2547~2554. (SCI)
2. Wenzhi Zhu, Feng Xu. Minimizing Energy Consumption in Wireless Sensor Networks by Partition. 2016 3rd International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE 2016) (录用)