

江苏大学

硕士学位论文

能量感知的无线传感器网络多路径路由算法研究

姓名：胡耀锋

申请学位级别：硕士

专业：计算机应用技术

指导教师：张建明

20090524

摘 要

综合了传感器技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术和无线通信技术的无线传感器网络是计算机科学技术的一个新的研究领域,具有十分广阔的应用前景,引起了学术界和工业界的高度重视。无线传感器网络节点能源配置有限,通常情况下不进行电池更换和充电,为了提高网络生存时间,设计高效的能量受限的路由协议至关重要。而无线传感器网络与其它无线网络存在许多不同特点,因此其它无线网络中的路由协议并不能简单地移植到无线传感器网络当中来,这使得无线传感器网络中的路由设计面临诸多挑战。本文从数据传输的可靠性和能量有效性两个角度对无线传感器网络路由算法进行了探讨,主要工作体现在以下四个方面:

第一,深入研究无线传感器网络区别于传统有线网络和其它无线网络的一些特点,分析传感器网络路由算法设计标准,对现有的一些传感器网络路由算法进行总结,为设计性能更好的路由算法奠定基础。

第二,从多路径路由算法能够较好地提高传感器网络中数据传输的可靠性的角度考虑,在借鉴AOMDV路由算法思想的基础上,提出一种最大链路不相关的多路径路由算法MLMRA。该算法在建立链路不相关的多路径时,能够优先建立节点不相关的多路径,降低多路径之间的关联性,当路径发生中断时减小路径连锁失效的概率,提高路径的稳定性和数据传输的可靠性。

第三,为了提高能量使用效率,延长传感器网络的生存时间,针对MLMRA算法的能量有效性的不足,提出能量感知多路径算法EMRA。EMRA在选择数据传输路径时,尽量避开路径中处于低能量水平的节点,同时把路径上节点的剩余能量和中间跳数作为路径选择的度量之一,实现数据传输路径的低能耗和整个网络节点的能量均衡消耗,从而有效延长网络生存时间。

第四,在仿真平台TOSSIM中仿真本文提出的多路径路由算法EMRA。从能量有效性和数据传输的可靠性两个角度,网络生存时间、平均分组投递率两个方面对本文提出的算法与现有的多路径路由算法进行比较,验证了本文提出的多路径路由算法具有较高的可靠性和能量有效性。

关键词: 多路径; 链路不相关; 可靠传输; 能量感知; 无线传感器网络

ABSTRACT

A Wireless Sensor Networks (WSN), which integrating of sensor techniques, nested computation techniques, distributed computation techniques and wireless communication techniques, is a new research area of computer science and technology, and has a wide application future. Both academia and industries are very interested in it. The wireless sensor nodes are often only equipped with limited power resources, and it is very hard to change and recharge. In order to increase the network lifetime, it is crucial to develop an energy-efficient routing protocol in the design of the WSN. Since many differences are existed between the WSN and the other traditional wireless networks, the routing protocols in those wireless networks cannot simply be transplanted to the design of the WSN. This brings new challenges and pressures to the routing technologies for WSN. Therefore, this paper mainly focusing on data reliable transmission and energy-efficiency of routing in WSN, some researches are made. The main work is presented as follow:

First, WSN's inherent characteristics are firstly described, which are different from traditional wireless networks. And we analyze some design goal for routing protocol in WSN. Then, based on an analysis of the existing sensor network routing protocols, a comprehensive survey about advantage and disadvantage of them is done, that establish infrastructure for design nice behavior routing techniques.

Second, from the point of view of the multi-path routing algorithm which can better enhance data transmission reliability in WSN and on the basis of drawing on the thinking of AOMDV algorithm, a Maximum Link-disjoint Multi-path Routing Algorithm (MLMRA) is presented. MLMRA gives priority to the establishment of the node-disjoint multi-path when established the link-disjoint multi-paths, so reduces the relationship of paths and the probability of Chain disruption of the paths, and improves the stability and reliability of data transmission as well.

Third, in order to enhance energy efficiency and postpone WSN lifetime, we present Energy-aware Multi-path Routing Algorithm (EMRA) for the effectiveness of the energy shortage of MLMRA algorithm. In the selection of the data transmission path, the algorithm tries to avoid the low-energy level nodes, and at the same time puts on the remaining energy of nodes and hops as one of the path selection measures. For the reason that not only realize the low-energy consumption of data transmission, but also balance the energy consumption of nodes, effectively extend the life-time of the network.

Fourth, we simulate the EMRA algorithm in TOSSIM which is one of simulation tools for WSN. From the point of view of energy effectiveness and transmission reliability in WSN, we comparison and analyze among other ways detailed in network lifetime and Average packet delivery rate, the results prove the effectiveness and validity of our method.

Key Words: multi-path; link-disjoint; reliable transmission; energy-aware; Wireless Sensor Networks (WSN)

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权江苏大学可以将本学位论文的全部内容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和汇编本学位论文。

保 密 ☐，在 年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：胡耀峰

09年6月2日

指导教师签名：

09年6月2日

独 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。除文中已注明引用的内容以外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。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。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：胡耀锋

日期：09 年 6 月

第一章 绪 论

1.1 研究目的与意义

作为 21 世纪的计算模式的普适计算^[1,2], Mark Weiser 在 1988 年首次提出普适计算 (Pervasive Computing) 思想以来, 日益受到人们的重视与关注。普适计算涉及的技术包括无线通信技术、微机电系统制造技术 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)、面向应用的嵌入式操作系统技术及相关的软件技术等。而无线传感器网络正是体现普适计算基本思想的一个典型应用, 人们可以通过无线传感器网络快捷地收集到所感兴趣的各種信息。

无线传感器网络是一种新兴的前沿技术, 目前尚处于研究阶段。网络层路由协议是无线传感器网络研究的热点和难点问题之一, 也是影响整个网络性能的因素之一, 一个网络设计成功与否, 路由协议非常关键。由于无线传感器网络的应用背景相差较大, 设计通用的路由协议比较复杂, 通常针对不同的应用背景采用不同的处理方法设计通信协议, 提高性能。研究初期, 人们一度认为成熟的 Internet 技术加上 Ad hoc 路由机制对无线传感器网络的设计是足够充分的, 但深入的研究表明: 无线传感器网络与传统的无线网络相比, 具有其特殊性, 同时其应用领域与普通通信网络有着显著的区别^[9,10]。因此, 传统无线网络的路由协议不能直接应用于无线传感器网络。

国外研究人员针对无线传感器网络提出了不少研究成果, 在传感器网络数据传输、路由设计等方面的相关理论研究成果也很多。但是, 这些研究成果处于起步阶段, 距离实际需求还相差甚远。美国的麻省理工学院、康奈尔大学、南加州大学等很多大学开展了无线传感器网络通信协议的研究, 先后提出了几种新的路由协议, 包括 SPIN^[3]、Directed Diffusion^[4]、LEACH^[5]、TEEN^[6] & APTEERN^[7]、PEGASIS^[8]等。近年来, 国内一些科研院校也开展了无线传感器网络理论和应用的研究, 如清华大学计算机与科学系、解放军理工大学信息通信工程学院、西南交通大学计算机与通信工程学院、中山大学电子与通信工程系、哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院和黑龙江大学计算机科学技术学院等, 但大部分工作仍处在仿真和试验阶段。

随着微机电系统 MEMS 和通信等技术的发展、计算成本的下降以及微处理器体积的微型化, 无线传感器网络在越来越多的领域均表现出广阔的应用前景^[11,12], 主要表现在军事、环境、健康、家庭和商业等领域。

在军事领域,具有可快速部署、自组织性和具有较强容错能力的无线传感器网络可以用来建立一个集命令、控制、通信、计算、智能、监视、侦查和定位等功能于一体的战场指挥系统。

在商业领域,无线传感器网络可以实现家居环境和工作环境智能化。嵌入到家电和家具中的传感器节点与计算控制中心组成的无线网络与 Internet 连接在一起将会为人们提供更加舒适、方便和具有人性化的智能家居和办公环境。在其他商业领域,如工厂自动化生产线、仓储管理、智能交通等方面也引入了该技术。

在医疗及健康护理领域,可以实现远程实时监控病人的身体情况。传感器节点能够长时间的监测人体的各种生理状况,利用传感器网络可以随时了解病人的病情,一旦发生危急情况可在第一时间实施救助。

在环境监测和保护领域,无线传感器网络可用于实现诸如野生动物栖息地生态环境监控、火山爆发监控、森林火情预警监控等作用,另外,传感器网络还可以用于农、林业种植中,在空间探索和救灾抢险等特殊的环境监测领域,传感器网络也有其得天独厚的技术优势。

面对这些实际的应用,如何保证数据可靠的传输变得越来越至关重要,并且传感器节点由于受成本和体积的限制,通常采用能量有限的电池提供能量,然而整个网络中部署有大量的节点,并且工作环境通常比较恶劣,替换节点的电池或对电池充电是十分困难的。因此,在保证网络传输可靠性的前提下延长网络的生存时间是无线传感器网络应用研究所必须面对的重要课题^[13]。总体而言,我国在无线传感器网络方面的研究工作还较少,及时开展这项对人类未来生活影响深远的前沿技术的研究,将对整个社会和国家经济具有重大的战略意义。

1.2 国内外研究现状

无线传感器网络层主要研究节点间的路由协议,路由协议负责实现节点间可靠的数据传输。无线传感器节点功率受限,每个节点的通信距离十分有限,要维持整个网络通信,传感器节点与汇聚节点之间要通过多跳路由实现数据传递。传统有线网络通常选择一条时延最短的固定路由来传输数据。这种方法对于传感器网络是不适合的,因为无线传感器网络更为关心的是能量而非时延,无线传感器网自身特性决定了它的路由具有以下特性:(1)网络拓扑不断变化条件下,选择最可靠路由,减少寻找新路由的频率,对于节省能量更为有效;(2)路由的负载均衡。频繁使用某条最佳路由传送数据,会导致网络某个区域能量消耗集中,部分节点过早死亡,形成通信“空洞”,这也不利于网络的通信和维持;(3)采用多路径路由提高传输的可靠性。无线传感器网络应用在比较恶劣的自然环境中,节

点故障率较高,此外拓扑变化也会严重影响数据传输可靠性。而多路径路由方式,可以增加数据传输的可靠性,保证汇聚节点接收到正确的信息。

目前,国内外一些研究学者对这些方面进行了研究,提出了多种基于不同应用目标的路由协议,在不同方面解决了无线传感器网络的各种路由问题。

Mahesh K. Marina 等人在文献 [14] 中提出了一种多路径的路由协议,该协议是在 Ad Hoc 网络中提出的一种路由协议,是通过在数据源节点和汇聚节点之间建立多条链路不相关的路径提高数据传输可靠性的一种路由机制,但是选择时延最短的固定路由来传输数据,数据传输可靠性没有得到明显提高。

Deepak Ganesan 等人在文献[15]中提出了一种新的多路径建立方法,称为缠绕多路径,能够比以往经典的不相交多路径方法取得更高的传输可靠性。该方法是为源节点到目的节点的主路径上的每个点设置一个备用节点,当主路径上的某个节点出现失误时,可立即使用备用节点进行传输,如图 1.1 所示^[10]。虽然缠绕多路径考虑了平衡多条路径之间能耗的差距,但是由于备用路径数量有限,缠绕多路径同样无法很好的满足数据可靠传输的需要,例如图 1.1 中,若节点 B, C 同时失效,则 Source 将无法传递数据到汇聚节点 Sink。

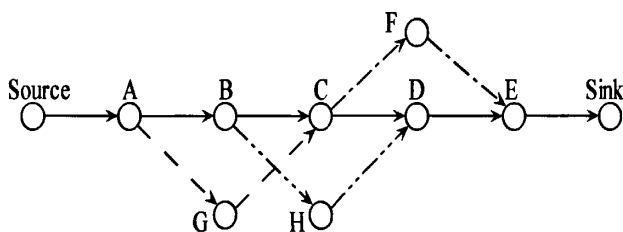


图 1.1 缠绕多路径示意图

De S 等人在文献[16]中提出了另外一种利用多路径提高数据传输可靠性的策略 MESH,它让数据在最初几跳快速展开到多条路径中,避免还没有展开就传输失败的情况,展开后的数据沿单一路径传向基站,和 Braided 只是发送低速率数据维护备用路径不同, MESH 把数据沿多条路径传输,因此 MESH 虽然达到了较高的可靠性,但是也消耗了较多的能量。

Rahul C 等人在文献[17]中认为,频繁地使用最优路径进行数据传输,从延长网络生命时间以及网络长期连通性的角度来说并非最佳选择的,因此文中提出了一种能量感知的路由协议。该协议的目的主要在于改善定向扩散协议的能耗情况,采用地理位置和数据类型(即节点类型)标识节点。该方法在源节点与汇聚节点间建立多条路径,并根据能量单位为每条路径分配一个被选择的概率,通过偶尔使用次优路径来取得延长网络生命时间以及延长网络连通性的目的。实验结果显示,该方法比传统的定向扩散路由延长了 40% 的网络生命时间。其缺点是汇聚节点需要周期性进行泛洪以维护路由信息,需要进行节点间收发开销和剩余

能量测量, 而且根据概率随机选择一条路径, 导致其可靠性不如定向扩散协议。

Intanagonwiwat C 等人在文献[18]中提出的是一种容忍错误的能量有效的无线传感器网络路由协议, 它是根据洪泛路由发展而来的, 但是比传统的洪泛路由更节省网络能量, 而且也具有更高水平的容错性。该方法假设每个节点都有各自的地理位置信息以及基站或汇聚节点的地理位置信息, 每个节点都有各自的传输角度范围, 降低了泛洪方法的冗余, 可以提高网络生存时间, 但是该方法由于存在角度限制, 节点只能在指定传输角度范围内寻找目的节点, 因此该方法在数据传输可靠性方面还存在局限性。

J. H. Chang 在文献 [19] 中提出一种沿着剩余能量最多的节点构成的路径路由数据的 MREP 算法 (Maximum Residual Energy Path algorithm)。一旦发现较好路径存在, 改变数据路由路径。基本路径用到其能量水平低于备用路径时, 启用备用路径。运用这种方法, 基本路径上的节点将不会因该路径持续被使用而耗尽其能量资源, 所以, 节点生命得以延长。然而, J. H. Chang 没有在文中量化考虑变换路径的成本。

S. Dulman 等人在文献 [20] 中提到多路径路由用于改善传感器网络的可靠性问题。这种算法对不可靠环境下的数据传输是有用的。众所周知, 网络可靠性可以通过提供从源节点到目标节点的多条路径和在每条路径发送同一个数据包得到改善。然而, 运用这种技术, 流量将大幅度增加。所以, 存在一种网络流量和可靠性之间的折衷方案。这种折衷方案运用依赖于多路径程度和可用路径失败几率的冗余函数。其思想是: 将源数据包分成若干个子包, 接着通过其多个可用路径之一发送每个子包。仿真证实, 即使一些子包丢失, 源数据包还可以重新还原。按照它们的算法, 仿真结果也证实, 给定一个节点失败的最大几率, 运用一个比某个最优值高的多路径程度将增加总的失败几率。

我国在传感器网络方面的研究还相对较少, 但一些高校和研究机构已经积极开展有关传感器网络方面的研究, 如: 国家自然科学基金 2003 年资助的“基于能量高效的传感器网络协议研究”等。现在, 关于无线传感器网络的研究已经列入国家“十一五”计划。

提高数据传输的可靠性以及延长网络的生存时间是无线传感器网络路由协议的重要研究方向之一。如何在网络资源受限的条件下, 使设计出的路由算法能够满足传感器网络中能量有效性的要求, 又能够将网络监测数据可靠地、有效地传递到汇聚节点, 是本文的研究重点。

1.3 研究内容及主要工作

无线传感器网络中的节点能量有限,延长整个网络的生存时间成为传感器网络路由协议设计的重要目标。能量感知多路径路由是一种非常重要的节能技术,无线传感器网络路由协议不仅要选择能量消耗小的数据传输路径,而且要从整个网络的角度考虑,选择使整个网络能量均衡消耗的路由,将网络监测数据可靠地、有效地传递到汇聚节点。本文从无线传感器网络多路径路由数据传输的可靠型和能量有效性两个角度进行了探讨,主要工作体现在以下四个方面:

第一,深入研究无线传感器网络区别于传统有线网络和其它无线网络的一些特点,分析传感器网络路由算法设计的目标。对现有的一些传感器网络路由算法进行总结,为设计性能更好的路由算法奠定基础。

第二,从多路径路由算法能够较好地提高传感器网络中数据传输的可靠性的角度考虑,提出一种最大链路不相关的多路径路由算法MLMRA(Maximum Link-disjoint Multi-path Routing Algorithm)。该算法在建立链路不相关的多路径时,能够优先建立节点不相关的多路径,降低多条路径之间的关联性,当路径发生中断时减小路径连锁失效的概率,提高路径的稳定性和数据传输的可靠性。

第三,针对MLMRA算法的能量有效性的不足,提出能量感知的多路径路由算法EMRA(Energy-aware Multi-path Routing Algorithm)。该算法在选择数据传输路径时,尽量避开路径中处于低能量水平的节点,同时把节点的剩余能量和中间跳数作为选择的度量之一,实现数据传输路径的低能耗和整个网络节点的能量均衡消耗,从而有效延长网络生存时间。

第四,在仿真平台TOSSIM中仿真本文提出的多路径路由算法EMRA。从数据传输的可靠性和能量有效性两个角度,网络生存时间、分组平均投递率两个方面对本文提出的算法与现有的多路径路由算法进行比较,验证本文提出的多路径路由算法EMRA具有较高的能量有效性和传输可靠性。

1.4 论文组织结构

论文共分六章,其主要内容概要如下:

第一章主要介绍课题的研究背景和研究意义,概述无线传感器网络的研究现状,总结了本文的主要研究工作。

第二章阐述传感器网络区别于传统有线网络和其它无线网络的一些特点,介绍传感器网络路由协议设计的标准,并从不同的角度对无线传感器网络路由协议进行不同的分类,分析总结典型的路由协议的性能和优缺点。

第三章分析无线传感器网络的数据传输可靠性问题,指出多路径路由机制能够较好的适用于传感器网络。针对现有多路径路由协议只考虑了节能而没有考虑链路质量的缺点,提出最大链路不相关的多路径路由算法 **MLMRA (Maximum Link-Disjoint Multi-path Routing Algorithm)**。

第四章分析现有的路由算法的节能策略,针对 **MLMRA** 算法的能量有效性不足进行改进,提出能量感知的多路径路由算法 **EMRA (Energy-aware Multi-path Routing Algorithm)**。设计并说明算法中多路径路由的建立过程以及能量感知的路径选择规则。

第五章介绍本文采用的仿真工具——**TOSSIM**,介绍本文提出的能量感知多路径路由算法 **EMRA** 的仿真实现过程,并就仿真结果给出性能评价。

第六章对本文的工作进行总结,并就下一步工作做出展望。

第二章 无线传感器网络及其路由协议

2.1 无线传感器网概述

2.1.1 无线传感器网络体系结构

无线传感器网络的组成如图 2.1 所示^[21]：监测区域中随机部署着大量传感器节点，这些节点通过自组织的方式构成网络。每个节点既有数据采集又有路由功能，采集到的数据经过多跳转发传输至汇聚节点或者基站，并可以通过互联网或卫星到达管理节点。用户通过基站或者管理节点对传感器网络进行配置和管理，发布监测任务以及收集监测数据。无线传感器网络系统通常包括传感器节点(Sensor Node)、汇聚节点(Sink)和管理节点(Manager Node)。

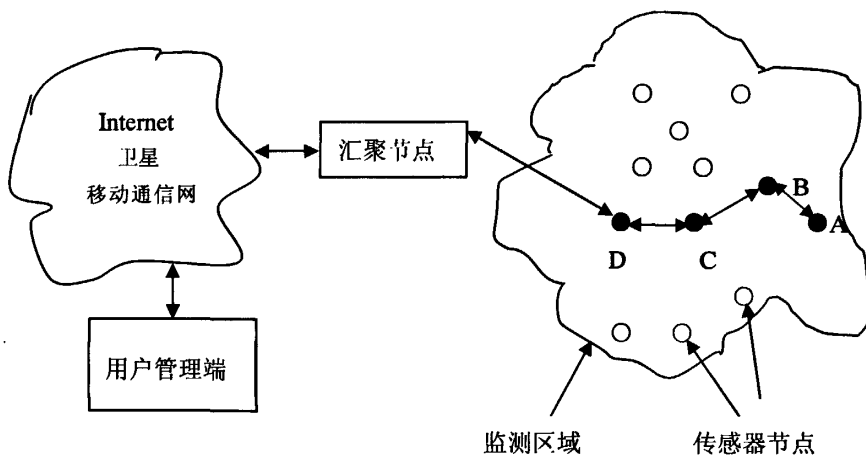


图 2.1 无线传感器网络的体系结构

在图 2.1 中，大量传感器节点随机部署于整个监测区域中，以自组织的方式构成网络。传感器节点在对所监测到的信息进行初步处理之后，以多跳中继的方式将其传送给汇聚节点，然后经过卫星、互联网或是移动通信网络等途径最终到达用户所在的管理节点。终端用户也可以通过管理节点对无线传感器网络进行管理和配置、发布监测任务以及收集监测数据。

传感器节点通常是一个嵌入式系统，由于受到体积、价格和电源供给等因素的限制，它的处理能力、存储能力相对较弱，通信距离也很有限，通常只与自身通信范围内的邻居节点交换数据。要访问通信范围以外的节点，必须使用多跳路由。为了保证监测到的数据信息能够通过多跳传输到汇聚节点，节点的分布要相

当密集。从网络功能上看,每个传感器节点都具有信息监测和路由的双重功能,除了进行本地信息收集和数据处理外,还要存储、管理和融合其他节点转发过来的数据,同时与其他节点协作完成一些特定任务^[22]。

汇聚节点通常具有较强的处理能力、存储能力和通信能力,它既可以是一个具有足够能量供给和更多内存资源与计算能力的增强型传感器节点,也可以是一个带有无线通信接口的特殊网关设备。汇聚节点连接无线传感器网络与外部网络,通过协议转换实现管理节点与传感器网络之间的通信,把收集到的数据信息转发到外部网络上,同时发布管理节点提交的任务。

2.1.2 无线传感器网络特点

无线传感器网络的特点是节点的电源能量有限、通信能力有限、计算能力有限、与物理世界紧密耦合、大规模密集部署、网络动态性强。为了准确、及时的获取信息,必须依靠节点间的协作,大量传感器节点只有通过低功耗无线电通信技术连成网络才能够发挥其整体和综合作用。

传感器网络虽然与 Ad Hoc 网络有相似之处,但同时也存在很大的差别。Ad Hoc 网络是由几十个到上百个节点组成的、采用无线通信方式的、动态组网的多跳的移动性对等网络;其目的是通过动态路由和移动管理技术传输具有服务质量要求的多媒体信息流。通常节点具有持续的能量供给。

传感器网络是集成了监测、控制以及无线通信的网络系统,节点数目更为庞大(上千甚至上万),节点分布更为密集;由于环境影响和能量耗尽,节点更容易出现故障;环境干扰和节点故障易造成网络拓扑结构的变化;通常情况下,大多数传感器节点是固定不动的。另外,传感器节点具有的能量、处理能力、存储能力和通信能力等都十分有限。

在无线传感器网络的研究初期,人们一度认为成熟的 Internet 技术加上 Ad Hoc 路由机制是足够充分的,但后续的研究表明传感器网络 and 传统网络,如移动通信网、无线局域网、蓝牙网络、Ad Hoc 网络等相比,前者具有明显不同的特点及技术要求^[23]:

■ 大规模

为了获取精确信息,在监测区域通常部署大量传感器节点,传感器节点数量可能达到成千上万,甚至更多。无线传感器网络的大规模性包括两方面的含义:一方面是传感器节点分布在很大的地理区域内;另一方面,传感器节点部署很密集,在一个面积不是很大的空间内,密集部署了大量的传感器节点。

■ 自组织

在无线传感器网络中,传感器节点的部署采用非人工、随机方式实施,节点的位置不能预知,节点之间的相互邻居关系预先也不知道,这样就要求传感器节点具有自组织的能力。在无线传感器网络使用过程中,经常有新节点加入或已有节点失效,网络的拓扑结构变化很快,无线传感器网络的自组织性要能够适应这种网络拓扑结构的变化。

■ 动态性

由于环境因素或电能耗尽,传感器节点容易出现故障或失效;环境条件也可能造成无线通信链路发生变化,甚至时断时通;无线传感器网络的传感器,感知对象和观察者都可能具有移动性;新节点的加入等等,这都要求无线传感器网络能够适应这种变化,具有动态的系统可重构性。

■ 可靠性

无线传感器网络通常部署在恶劣环境或人类不宜到达的区域,传感器节点可能工作在露天环境,非常容易遭到破坏,这都要求传感器节点非常坚固,不易损害,以适应各种恶劣环境条件。由于监测区域环境的限制,网络的维护工作十分困难,无线传感器网络的通信保密性和安全性也十分重要。因此,无线传感器网络的软硬件必须具有鲁棒性和容错性。

■ 应用相关

无线传感器网络用来感知客观物理世界,获取物理世界的信息量,不同的无线传感器网络应用,关心的物理量不同,因此对无线传感器的应用系统也有多种多样的要求,因而不可能像 Internet 一样,有统一的通信协议平台。

■ 以数据为中心

传统网络是以 IP 为中心的网络,每个节点拥有全网唯一的 IP 地址,数据转发以目的节点的转发为依赖。在无线传感器网络中,节点没有 IP 地址,是以数据为中心的网络,它关心的是数据本身,如事件、时间和地点,而并不关心数据是由哪个节点采集的。

2.2 无线传感器网络路由协议

路由协议是无线传感器网络网络层的主要功能,是网络节点相互通信、数据转发的基础。网络层协议负责路由发现和维护,其路由协议包括了两个方面的基本功能:一个是路径选择,即寻找源节点和目的节点之间的优化路径;一个是数据转发,即将数据沿优化路径正确转发。下面分别对无线传感器网络的路由协议的设计标准、协议的分类以及现有的典型路由协议进行介绍。

2.2.1 无线传感器网络路由协议设计标准

在研究无线传感器网络路由算法时,首先要确定如何评价无线传感器网络路由算法的优劣。传统计算机网络对路由协议要求如下:正确性、健壮性、稳定性、公平性、最优性。无线传感器网络对路由协议也有以上要求,但它更注重以下特殊要求^[24]:

(1) 能源有效性/网络生存时间

能源有效性是传感器网络设计中要考虑的重要因素。由于无线传感器网络节点能量有限,所以路由协议设计必须将有效利用能源放在第一位,将服务质量(QoS)放在第二位考虑。能量有限性是传感器节点最显著的特点,无线传感器节点体积小、价格低廉,大多采用电池作为能源提供者,要想在几年内将目前的电池的可供电时间提高30%都是很困难的^[25]。典型的无线传感器网络工作在人类无法忍受的恶劣的环境中,甚至是人类无法到达的环境,比如火山周围。一旦电池耗尽,将无法更换,设计有效的路由协议节约节点能源、延长网络的生存时间就成为无线传感器网络的核心问题。尽可能降低能源消耗,从而延长网络生存时间,是路由协议设计的首要目标。

(2) 可靠性/容错性

典型的无线传感器网络工作在人类无法忍受的恶劣的环境中,各种情况经常会使得节点失效,物理地维护或替换失效传感器常常是十分困难或不可能的,为了避免单个节点的失效影响整个网络的效率,要求每个节点尽可能维护多条路由,维护多条路由是指每个节点同时维护去往 Sink 节点的多条路由,只有当所有路由都失效时,才按需发起路由请求过程,从而降低了路由请求频率、分组等待延时和协议开销。传感节点容易因为能源耗尽或环境干扰而失效。部分传感节点的失效不应影响整个网络的任务。

(3) 可扩展性

在一些应用中可能需要成百上千的传感器节点,路由设计应能满足大量节点协作。无线传感器网络可扩展性表现在传感器数量、网络覆盖区域、生命周期、时间延迟、感知精度等方面的可扩展极限,给定可扩展性级别,无线传感器网络路由必须提供支持该可扩展性级别的机制和方法。

(4) 时延性

传感器网络的延迟时间是指观察者发出请求到收到应答信息所需时间,影响无线传感器网络时间延迟的因素也有很多。在设计路由时必须尽可能减少网络时延。

2.2.2 无线传感器网络路由协议的分类

无线传感器网络路由协议负责在 Sink 点和其余节点间可靠地传输数据。由于无线传感器网络与应用高度相关,单一的路由协议不能满足各种应用需求,因而人们研究了众多的路由协议。目前所提出的各种路由协议基本上可以按照下面三种思路进行分类:

(1) 按照获取路由信息的时机分类^[26]:可以分为主动式路由协议和按需式路由协议。主动式路由协议,又称表驱动的(table-driven)路由协议,这一类的路由协议试图在所有的网络节点中维护一组到其他所有节点的一致的、实时的路由信息表。当网络拓扑发生变化时,节点通过向其他节点发送路由信息来通告维护路由信息的一致性。按需式路由协议也称为反映式(reactive)路由协议。这种路由协议并不要求节点一直维护网络的路由信息表,只有在节点需要某条路由时才动态的创建它,并一直维护这条路由直到网络拓扑变化,或者该路由不再可用,或者信息传递结束不再需要这条路由时为止。

(2) 按照网络的层次分类^[27]:可以分为平面结构路由协议和层次结构路由协议。在平面结构路由协议中,所有节点的地位是平等的,在路由功能上地位相同维护的信息量相同,通过局部操作和反馈信息来生成路由,原则上不存在瓶颈问题。平面路由协议的优点是算法简单,易于实现,其缺点是缺乏对通信资源的优化管理,每一个节点都需要知道到达其它所有节点的路由,维护动态变化的路由需要大量的控制信息,可扩展性小,在一定程度上限制了网络的规模。平面结构路由协议拓扑结构如图 2.2 所示^[28]。

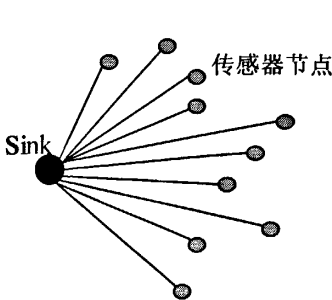


图 2.2a 平面单跳结构

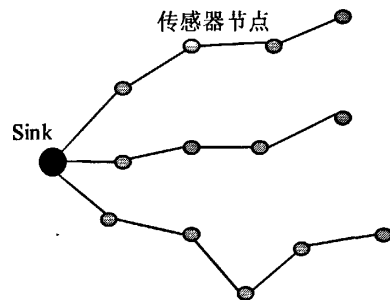


图 2.2b 平面多跳结构

在层次结构路由协议中^[29],网络通常被划分为簇(cluster),每个簇由一个簇头(cluster-head)和多个簇成员节点(cluster-member)组成,簇成员节点负责采集数据,并将采集到的数据转发给簇头,簇头节点负责簇内部数据的接收和数据融合,然后将数据转发给更高层次的簇。簇成员的功能比较简单,不需要维护复杂的路由信息,不同层次的节点的作用不同。这大大减少了网络中路由控制信息的数量,

具有很好的可扩展性,其缺点是簇头节点能量消耗大,可能会成为整个网络的瓶颈。层次结构路由拓扑结构如图 2.3 所示。

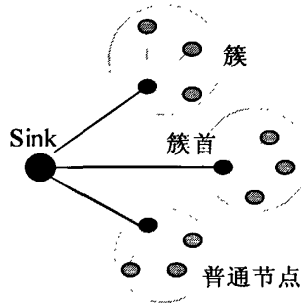


图 2.3 层次拓扑结构示意图

(3) 按照路由协议的功能分类^[30,31]: 根据数据传输过程中采用路径的多少, 可以为单路径路由和多路径路由。单路径路由协议的优势在于它的简单性。但是这种简单性从根本上限制了协议性能的提升空间。随着网络性能的提高, 单路径路由协议也无法满足路由可靠性和节点节能等方面的更高要求。多路径路由协议尽管有诸如难于实现, 要求更大的路由信息存储空间, 路由计算更复杂等难点, 但是其优势还是很明显的。在传感器网络中, 由于节点的冗余以及各个节点都具有路由功能, 因而从任何一个源节点到目的节点的路径通常会有多条。同时由于传感器网络的拓扑结构经常因为环境的变化而发生变化, 如果能为各个节点都建立一条或多条替换路径, 整个网络的路由可靠性和容错性就会得到提高, 而路由的可靠性正是无线传感器网络所面临的主要问题之一。根据路由选择是否考虑 QoS 约束, 可以分为支持 QoS 的路由协议和不支持 QoS 的路由协议。支持 QoS 的路由协议是指在路由建立时, 考虑时延、丢包率等 QoS 参数, 从众多可行路由中选择一条最适合 QoS 应用要求的路由; 根据是否以地理位置来标识目的地、路由计算中是否利用地理位置信息, 可以分为基于位置的路由协议和非基于位置的路由协议。

2.2.3 典型的无线传感器网络路由协议

下面介绍现有的几种典型的无线传感器路由协议, 对其性能进行分析比较, 总结优缺点。

1、Flooding^[32]和 Gossiping^[33]

泛洪(Flooding)路由是一种传统的网络通信协议。Flooding 算法不要求维护网络的拓扑结构和相关的路由计算, 仅要求接收到消息的节点以广播的形式转发数据包, 直到数据传输到目的节点, 或者为该数据所设定的生存期限变为零为止。

对于自组织的 WSN，泛洪式路由是一种较为直接的实现方法。它的优点是：实现简单，不需要为保持网络拓扑信息和复杂的路由发现算法而消耗计算资源，适用于鲁棒性要求高的场合。Flooding 的缺点是：①存在信息“内爆”问题，即出现一个节点可能得到一个数据多个副本的现象，如图 2.4(a)所示，传感器节点 S 采集的数据分别经过节点 A、B 和 C 到达节点 D；②出现信息“重叠”现象，如图 2.4(b)所示，如果处于同一观测环境的两个相邻同类传感器节点 A 和 B 同时对同一个事件做出反应，二者采集的数据性质相同，数值相近，那么，这两个节点的邻居节点 C 将收到双份数据副本；③盲目使用资源，Flooding 不考虑各节点能量可用状况因而无法做出相应的自适应路由选择。

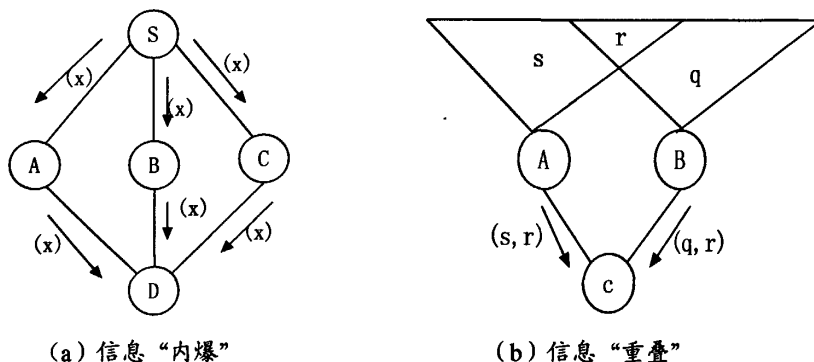


图 2.4 Flooding 的信息内爆和信息交叠问题

为了克服 Flooding 算法的这些固有缺陷，S.Hedetniemi 等人提出了闲聊式 (gossiping) 策略。Gossiping 算法使用随机性原则，即节点发送数据时不再采用广播形式，而是随机选取一个相邻节点转发它收到的数据副本。虽然 Gossiping 算法通过随机转发数据方式避免了消息“内爆”现象，但是仍然无法解决部分数据的交叠现象和盲目使用资源的问题，而且增加了端到端的数据延迟问题。Gossiping 算法的数据重发现象如图 2.5 所示，节点 E 若已收到它的邻居节点 B 的数据分组，当再次收到时，它就会将数据发回它的邻居节点 A。

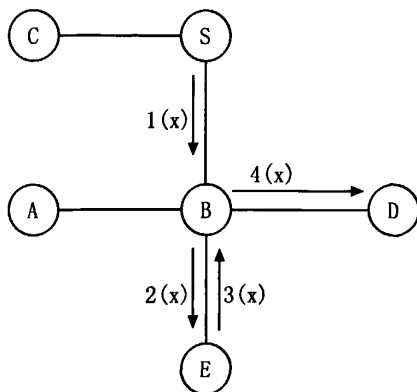


图 2.5 Gossiping 的数据重发现象

2、定向扩散^[4] (Directed Diffusion)

定向扩散是以数据为中心的路由协议发展过程的里程碑,与已有的路由协议有着截然不同的实现机制,其突出特点是引入了梯度来描述网络中间节点对该方向继续搜索获得匹配数据的可能性。该协议的一个关键步骤是汇聚节点 Sink 进行所谓的兴趣发布(Interest Dissemination),也就是用一组属性描述它的查询请求,并向全网广播以搜索匹配的数据。被称为“梯度”的度量与兴趣发布过程相关联,以反映在不同搜索方向上找到匹配数据的可能性。这样就建立起一个与查询请求对应的“梯度场”,传感器节点上的数据沿“梯度”最大的方向传输到 Sink 节点。其中,源节点采集的数据首先在本地采用数据融合技术进行整合,然后在网络中传输。该方法的缺点是没有形成到 Sink 节点的多条路径,路由健壮性不够好。

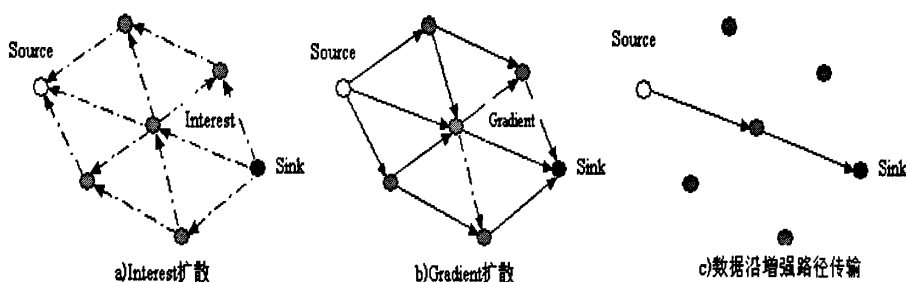


图 2.6 Directed Diffusion 路由协议路径建立过程

其他的以数据为中心的路由协议都是基于定向扩散改进或者采用类似的关键思想来提出的。定向扩散的数据命名机制,定向扩散方式,“梯度”决定加强选择路径的原理等都包含着广阔的研究空间。

DD 路由协议具有较好的节能和可扩展特性,特别适合在传感器节点接收到数据请求之后,在较长时间内需要连续向 Sink 节点传送数据的应用场合。它实现了路径的修正,这使得数据传输始终可以通过较少的跳数实现,同时节省了搜索新路径时耗费的能量。但这种方式不适合收到请求后只发一次少量数据的情况,因为这需要花很大的代价来建立梯度。

3、SPIN^[3] (Sensor Protocol for Information via Negotiation, SPIN)

SPIN 是一种以数据为中心的自适应路由协议。其目标是通过使用节点间的协商制度和资源自适应机制,解决洪泛法存在的不足之处。

为了避免出现洪泛法的信息爆炸问题和部分重叠现象,传感器节点在传送数据之前彼此进行协商,协商制度可确保传输有用数据。节点间通过发送元数据(即描述传感器节点采集的数据属性的数据, Meta-data)进行协商,而不是采集的整个数据。由于元数据大小远小于采集的数据,所以,传输元数据消耗的能量相对较少。

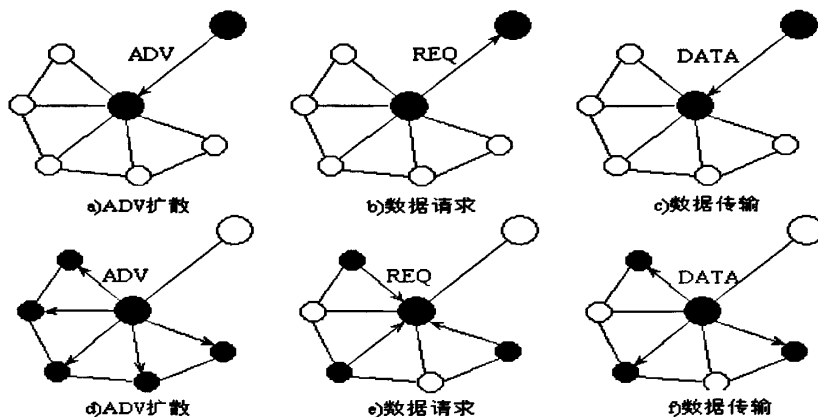


图 2.7 SPIN 协议路由建立和数据传输示意图

SPIN 协议的优点是当拓扑和位置改变时，节点只需要知道单跳的邻居，它通过协商机制处理信息冗余，能够节约大量能量，很好地解决信息爆炸、信息重复及资源浪费等问题。其缺点是无法保证数据能够顺利到达感兴趣的节点。如果希望得到数据的目的节点与拥有数据的源节点距离较远，而二者之间的节点对该数据的期望较小，那么该数据将无法到达目的节点。所以 SPIN 算法不适用于需要周期性传输可靠数据的应用。

4、LEACH^[5] (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

LEACH 是层次型路由协议中最具代表性的路由协议，其他层次式的路由协议如：TEEN、PEGASIS 等大都由 LEACH 发展而来。

LEACH 是由麻省理工学院的 Heinzelman 等人为无线传感器网络设计了自适应聚类路由算法。该协议分为两个阶段操作，即簇建立阶段 (Set-up Phase) 和就绪阶段 (Ready Phase)。为了使能耗最小化，就绪阶段持续的时间比簇准备阶段长。簇准备阶段和就绪阶段所持续的时间总和称为一轮 (Round)。在簇准备阶段，LEACH 随机选择一个传感器节点作为簇首节点 (Clusterhead Node)，随机性确保簇首与汇聚节点 Sink 之间数据传输的高能耗成本均匀地分摊到所有传感器节点。

在簇首节点选定后，该簇首节点对网络中所有节点进行广播，广播数据分组含有该节点成为簇首节点的信息。一旦传感器节点收到广播数据分组，根据接收到的各个簇首节点广播信号强度，该节点选择信号强度最大的簇首节点加入，向其发送成为其成员的数据分组。簇形成后，簇首节点采用 TDMA (Time Division Multiple Access, 时分多址) 策略分配信道使用权给簇内节点。一旦处于就绪阶段，簇首节点开始接收簇内各节点采集的数据，然后采用数据融合和数据压缩等技术进行整合，将整合后的数据传输给汇聚节点 Sink。在就绪阶段持续了一段时间后，网络又进入了另一次的簇准备阶段。LEACH 拓扑结构如图 2.8 所示。

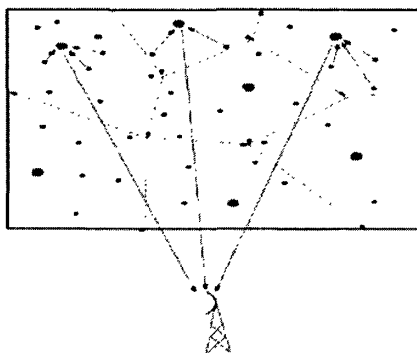


图 2.8 LEACH 拓扑结构示意图

LEACH 协议将整个网络的能量负载平均分配到每个传感器节点中，从而达到降低网络能源消耗，提高网络整体生存时间的目的。不足之处在于每轮都要选择簇首和分簇，所以建立阶段的协议开销较大；其次，它要求各传感器节点之间均可以直接通信，所以不适用于节点分布较广的网络。

5、TEEN^[6] (Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol)

TEEN 和 LEACH 的实现机制非常相似，只是前者是响应型路由协议，而后者属于主动型路由协议。在 TEEN 中定义了硬、软两个门限值，以确定是否需要发送监测数据。当监测数据第一次超过设定的硬门限时，节点用它作为新的硬门限，并在接着到来的时隙内发送它。在接下来的过程中，如果监测数据的变化幅度大于软门限界定的范围，则节点传送最新采集的数据，并将它设定为新的硬门限。

通过调节软门限值的大小，可以在监测精度与系统能耗之间取得合理的平衡。该机制的主要缺陷是如果没有收到门限值，节点将无法通信，从而使用户得不到数据。

6、PEGAGIS^[8] (Power-Efficient Gathering in Sensor Information System)

PEGASIS 是在 LEACH 基础上建立的路由协议。它仍然采用动态选举簇首的思想，不同的是网络中所有节点只形成一个簇，称为“链”。节点只需与它最近的邻居节点进行通信，各节点轮流成为链首。采集到的数据在链中以点到点的方式传送、融合，最终由链首送至汇聚节点。

PEGASIS 协议有效避免了 LEACH 协议频繁选举簇首带来的通信开销，极大地减少了数据传输次数和通信量。节点采用小功率方式，只与最近距离的邻节点通信，能够有效利用能量，与 LEACH 相比能大幅提高网络生存时间。但单簇方式使得簇首成为关键点，其失效会导致路由失败，且要求节点都具有与汇聚节点通信的能力，如果链过长，数据传输时延将会增大，不适合实时应用。此外还要求节点知道其它节点的位置，开销会很大。

7、GEAR^[34]

GEAR 是充分考虑了能源有效性的基于位置的路由协议,它比其他的基于位置的路由协议能更好地应用于 WSN 之中。传感器网络中的数据经常包含了位置属性信息,GEAR 算法提出利用这一信息,把在整个网络中扩散的信息传送到适当的位置区域中。同样 GEAR 也采用了查询驱动数据传送模式。它传送数据分组到目标域中所有节点的过程包括两个阶段:目标域数据传送和域内数据传送。

在目标域数据传送阶段,当节点接收到数据分组,它将邻接点同目标域的距离和它自己与目标域的距离相比较,若存在更小距离,则选择最小距离的邻接点作为下一跳节点;若不存在更小距离,则认为存在“hole”,节点将根据邻居的最小开销来选择下一跳节点。在域内数据传送阶段,可通过两种方式让数据在域内扩散:在域内直接洪泛和递归的目标域数据传送直到目标域剩下唯一的节点。

GEAR 协议缺点是由于缺乏足够的拓扑信息,路由过程中可能遇到路由空洞,降低了路由效率。但它通过定义估计路由代价为节点到目标区域的距离和节点剩余能量,并利用捎带机制获取实际路由代价,进行数据传输的路径优化,从而形成能量高效的数据传输路径。

路由协议是传感器网络设计的一个重要议题,上面讨论的各种路由算法都有其自身的特点,可以很好地适用于一些应用场合,很难说清楚某种协议比另外的协议各方面都表现优秀。

2.3 小结

本章首先概述了无线传感器网络的体系结构,阐述了无线传感器网络的特点;然后,介绍了传感器网络路由协议设计的标准,对无线传感器网络路由协议从不同的角度进行不同的分类,具体介绍典型的路由协议,并对各种路由协议的性能进行比较分析,总结优缺点。

第三章 最大链路不相关的多路径路由算法 MLMRA

现有路由协议往往以节省能量为目标,在选择路由时,仅考虑了传感器节点的能耗,而没有考虑所选路径的链路质量问题。所选的路径可能具有较高的能耗有效性,但某些链路的质量比较差,这样导致在路由数据时容易掉包丢包,而重传又严重浪费了能量。因此,在路由算法建立多路径路由时,必须考虑所建路由的链路质量,使得网络在路由数据时具有更高的传输可靠性,减少数据重传的概率,从而节省能耗。

3.1 无线传感器网络的数据传输可靠性问题研究

3.1.1 可靠数据传输的基本问题

可靠数据传输,是指当某一事件被检测到后,监测信息如何经过多跳路由可靠地传输到 Sink 节点。如果数据包无法可靠地传到 Sink,用户就无法监测到事件,传感器网络也就无法达到预期的效用。越来越多的传感器网络应用对数据传输的可靠性提出了更高的要求,例如煤矿瓦斯泄漏、水资源被污染、发生森林火灾、生态环境被破坏、军事战场上敌方情况异常等,它们都要求感知的数据能够可靠紧急地传回 Sink,以便让监测方能够根据感知信息精确快速地做出决策、采取行动。可靠数据传输直接影响到传感器网络对周围物理世界的监测性能,对系统的可用性、准确性、可扩展性等方面都有着重要的影响。

在传感器网络中,节点往往是大规模部署,相邻的多个节点之间感知的数据关联程度高。大量冗余节点的存在,增强了系统的容错性。因此,在特定条件下,报文丢失在一定程度上是可容忍的。许多传感器网络应用也并不要求所有报文都成功传输到汇聚,只需要满足一定概率的报文能成功传输。同时,由于传感器网络是一种应用相关的网络,不同的应用需求和应用环境对传感器网络的可靠数据传输也有不同的要求,可靠性的保障手段也不同。例如,检测到煤矿瓦斯泄露事件的可靠性要求应当比报告温度正常事件的可靠性要求高;多路径的数据传输方法比重传方法更适应延时敏感的场所等等。此外,还存在一些特殊的应用,如给传感器网络重新分发任务,这类应用不能容忍数据的丢失,要求所有数据都能可靠地从汇聚节点分发到所有节点,因为丢失任何一段数据都将导致整个任务的失败。因此,可靠数据传输方案应该兼顾到各类应用的需求,满足不同应用的期望可靠性。

3.1.2 无线传感器网络的数据可靠传输方法

由于传感器节点能量有限的特点,对于传感器网络可靠传输方法的设计极具挑战性。传感器网络的数据可靠传输方法必须以节省传感器节点的能量为出发点,并且能够最大限度的延长网络的生存时间。

无线传感器网络中数据可靠传输方法主要集中在链路重传机制、纠错码机制和多路径机制三个方面。通过对无线传感器网络中的数据可靠传输方法进行研究与分析:仅靠传统网络中的链路重传机制以及纠错码机制这类被动的提高传输成功率的方法是远远不够的,因为这两类方法对网络中的通信质量等客观环境具有很强的依赖性,不仅耗费了大量的能源,更重要的是不能够取得预期的效果,必须寻找一种能够主动解决问题的网络方案。在传感器网络中,由于节点的冗余以及各个节点都具有路由功能,因而从任何一个源节点到目的节点的路径通常会有多条,通过在源节点与目的节点之间建立多条传输通道,在前两类方法无法取得成功的条件下,多路径方法可以取得令人满意的效果。因此,多路径方法正是满足需求的提高传输可靠性的方法之一。

3.2 无线传感器网络多路径路由研究

在无线传感器网络路由协议中,基于单路径路由容易造成网络能量消耗不均衡,传输路径上节点能量消耗过快会形成路由空洞或者网络拓扑变化,而多路径路由在路由可靠性、容错性、均衡能量消耗、满足 QoS 等方面有更多优点,因此,多路径路由的研究成为当前路由研究的重要方向。

3.2.1 多路径路由相关概念

1、多路径路由定义

多路径路由是指为数据源节点和汇聚节点之间同时提供多条可用的路径,并允许节点选择如何使用这些路径。多路径路由算法为节点间提供多条路径,并确保发往其中一条路径的数据能由该路径到达汇聚节点。多路径路由网络是执行多路径路由算法的网络。

2、多路径路由使用

管理多条路径的网络协议层必须能够有效地使用多条路径,以便能够改善服务质量。适宜管理多条路径的网络协议层可以是网络层或应用层。比如,可以由应用程序甚至用户亲自决定使用哪些路径、如何使用;也可以由网络层透明地替用户提供路径的使用方法。究竟由哪个层次来管理多条路径的使用,涉及到灵活

性、性能和软件工程之间的折衷。

使用模式说明了多路径如何被使用。有两种基本的使用模式：

- 同时使用多条路径传输监测数据；
- 先使用主路径传输监测数据，主路径失效后再使用其它替换路径。

称前一种方法为同时多径，后一种为替换多径。

3、多路径路由特点

- 保证了传感器节点之间数据传输的可靠性；
- 可以为不同的服务质量要求提供不同的路径；
- 可以为同一种类型的服务提供多条路径，经聚集可实现更高的服务质量；
- 由于传感器节点对路径有自主的使用权，它可以通过探测各路径的状况（比如丢包率），据此调整对各路径的使用，从而在得到高质量服务的同时也提高了网络的利用率。因此，多条路径的正确使用还可以提高网络的利用率。

3.2.2 多路径路由分类

多路径路由根据网络中节点之间和链路之间是否存在相关性可以分为如下三类^[35]：

- 节点不相关多路径路由(Node-Disjoint)
- 链路不相关多路径路由(Link-Disjoint)
- 相关多路径路由(Non-Disjoint)

下面分别简要介绍。

1、节点不相关多路径路由(Node-Disjoint)

节点不相关路由，也即可以称之为完全不相关路由，路由之间没有共用的节点或者链路，如下图 3.1 所示，数据源与汇聚节点对 S 和 D 之间的路径 SXD，SYD，SZD 是节点不相关路由。

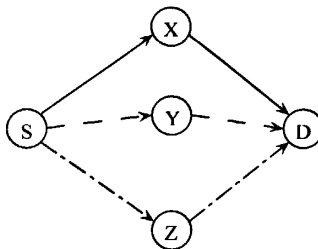


图 3.1 节点不相关路径示意图

2、链路不相关多路径路由(Link-Disjoint)

链路不相关的路由之间没有共用的链路，但是可能有共用的节点，如下图 3.2 所示，数据源与汇聚节点 S 和 D 之间的路径 SYD, SXYZD 是链路不相关路由，节点 Y 为共用节点。

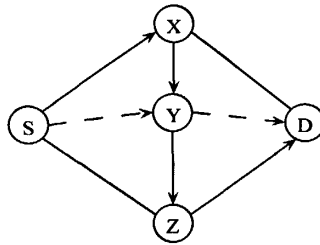


图 3.2 链路不相关路径示意图

3、相关多路径路由(Non-Disjoint)

相关路由之间既有共用的节点，也有共用的链路，如下图 3.3 所示，数据源到汇聚节点 S 和 D 之间的路径 SYD, SXYD 是相关路由，节点 Y 为共用节点，YD 为共用链路。

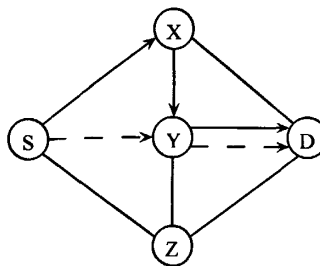


图 3.3 相关路径示意图

节点或链路相关路由同节点不相关路由相比，它所占用的资源要少，因为它既有共享的链路又有共享的节点，因此资源是共享的。并且同等的网络分布密度下，相关路由的搜索要容易的多，这是因为不相关路由的搜索其约束性要强的多。但是正是因为相关路由有共享的节点或者链路，其容错能力就差很多。在上述三种路由类型中，节点不相关路由的容错能力最强，链路不相关路由的容错能力次之，相关路由的容错能力最差。在链路不相关多路径路由中，如果共用的节点失效，那么该节点所连接的所有路径便都失败了，而节点不相关路由由于链路的独立性，则不会产生这种连锁反应，但由于建路条件比较苛刻，所以在实际中建立的路径数比较少。一般在网络分布密度相对较大的情况下，采用节点不相关多路径路由；但在节点密度相对稀疏的网络环境中，会采用链路不相关多路径路由。一般的话，相关多路径路由是不宜采用的。

3.2.3 多路径路由稳定性分析

无线传感器网络中,数据传输链路的稳定性同许多因素有关,比如说无线信道的干扰,地理位置的影响,以及节点的失效等。在本节的数据传输稳定性分析中,不考虑其他因素,只考虑节点的失效以及多路径路由的节点相关性对数据传输稳定所产生的影响。

在无线传感器网络中,节点的失效是造成路由中断的主要原因。如图 3.4(a) 中所示,节点 S 和 D 之间的多路径路由 MP_0 包括路径 $P(A_1A_2\cdots A_n)$ 和路径 $P(B_1B_2\cdots B_n)$, 多路径路由 MP_1 , 如图 3.4(b) 所示, 包括路径 $P(C_1C_2\cdots C_n)$ 和路径 $P(E_1E_2\cdots E_n)$ 。图 2.4 中 MP_0 和 MP_1 有相同的跳数, MP_0 和 MP_1 之间的不同之处是: MP_0 中路径 $P(A_1A_2\cdots A_n)$ 和路径 $P(B_1B_2\cdots B_n)$ 是节点不相关的, 而 MP_1 中路径 $P(C_1C_2\cdots C_n)$ 和路径 $P(E_1E_2\cdots E_n)$ 是链路不相关的, 因为他们之间有一个共用的节点。

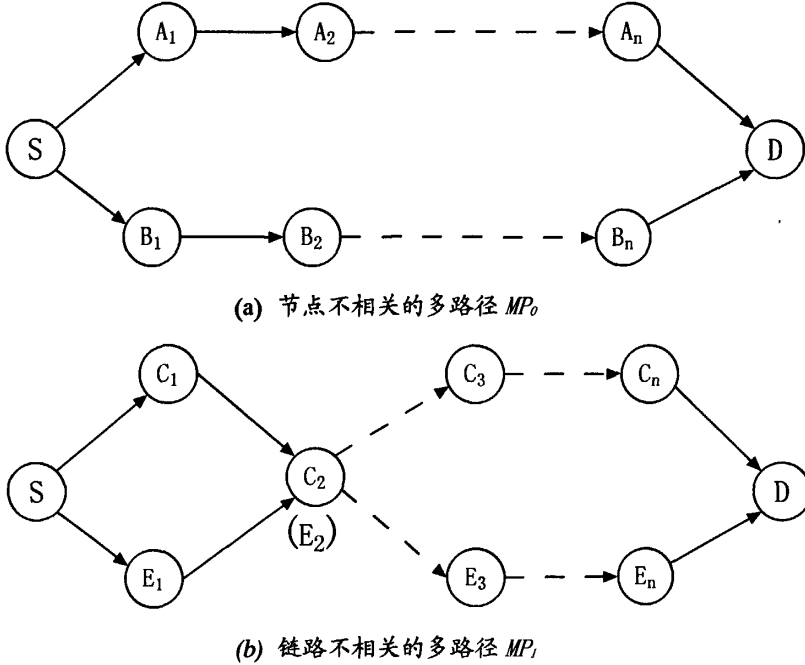


图 3.4 多路径路由的稳定性分析

假设每个节点的失效概率都相同, 均为 p 。对路径 $P(A_1A_2\cdots A_n)$, 其中断的概率 P_{break} 为: $P_{break} = 1 - (1 - p)^n$ (3.1)

其稳定性概率为: $P_{stability} = (1 - p)^n$ (3.2)

定义 MP_i 为包含两条路径的多路路由。其中 i 表示两条路径所共用的中间节点数。设其中第一条路径的跳数为 n , 第二条为 m 。

当 $i=0$ 时, 即为 MP_0 两条路径 $P(A_1A_2\cdots A_n)$ 和路径 $P(B_1B_2\cdots B_m)$ 没有共用的中间节点;

当 $i=1$ 时, 即为 MP_1 两条路径 $P(C_1C_2\cdots C_n)$ 和路径 $P(E_1E_2\cdots E_m)$ 有一个共用的中间节点 C_2 (E_2);

当 $i=k$ 时, 假设为两条路径有共用的中间节点数为 k 。

对于 MP_i 的稳定性分析, 计算 MP_i 两条路径均中断的概率。定义 $P(MP_i)$ 为 MP_i 两条路径均中断的概率。

当 $i=0$ 时,

$$\begin{aligned} P(MP_0) &= P_{break}(A_1A_2\cdots A_n) \cap P_{break}(B_1B_2\cdots B_m) \\ &= [1-(1-p)^n][1-(1-p)^m] \end{aligned} \quad (3.3)$$

当 $i=1$ 时,

$$\begin{aligned} P(MP_1) &= P_{break}(C_1C_2\cdots C_n) \cap P_{break}(E_1E_2\cdots E_m) \\ &= [1-(1-p)^{n-1}][1-(1-p)^{m-1}] + p \end{aligned} \quad (3.4)$$

将 $P(MP_1)$ 和 $P(MP_0)$ 相减, 得到:

$$\begin{aligned} f_1(p) &= P(MP_1) - P(MP_0) \\ &= [1-(1-p)^{n-1}][1-(1-p)^{m-1}] + p - [1-(1-p)^n][1-(1-p)^m] \\ &= p - p(1-p)^{n-1} - p(1-p)^{m-1} + p(2-p)(1-p)^{n+m-2} \\ &= p[1-(1-p)^{n-1} - (1-p)^{m-1} + (2-p)(1-p)^{n-1}(1-p)^{m-1}] \\ &\geq p[1-(1-p)^{n-1} - (1-p)^{m-1} + (1-p)^{n-1}(1-p)^{m-1}] \\ &= p[1-(1-p)^{n-1}][1-(1-p)^{m-1}] \\ &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\text{从 (3-5) 式可以得到: } P(MP_1) \geq P(MP_0) \quad (3.6)$$

当 $i=2$ 时,

$$\begin{aligned} P(MP_2) &= P_{break}(C_1C_2\cdots C_n) \cap P_{break}(E_1E_2\cdots E_m) \\ &= [1-(1-p)^{n-2}][1-(1-p)^{m-2}] + 2p \end{aligned} \quad (3.7)$$

将 $P(MP_2)$ 和 $P(MP_1)$ 相减, 得到:

$$\begin{aligned} f_2(p) &= P(MP_2) - P(MP_1) \\ &= [1-(1-p)^{n-2}][1-(1-p)^{m-2}] + 2p - [1-(1-p)^{n-1}][1-(1-p)^{m-1}] - p \\ &= p[1-(1-p)^{n-2} - (1-p)^{m-2} + (2-p)(1-p)^{n-2}(1-p)^{m-2}] \\ &\geq p[1-(1-p)^{n-2} - (1-p)^{m-2} + (1-p)^{n-2}(1-p)^{m-2}] \\ &= p[1-(1-p)^{n-2}][1-(1-p)^{m-2}] \\ &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

从 (3-8) 式可以得到:

$$P(MP_2) \geq P(MP_1) \quad (3.9)$$

由此, 对 i 值进行扩展后得出:

$$P(MP_k) \geq \dots P(MP_1) \geq P(MP_0), \min(n, m) \geq k > 1 \quad (3.10)$$

从对上述对节点不相关路径和链路不相关路径的稳定性分析中, 可以得出两个结论:

(1) 从 (3-4) 式可以看出, 多路径路由的中断概率首先与中间节点的失效以及中间节点的个数相关;

(2) 从 (3-10) 式可以看出, 多路径路由的中断概率还同路径中节点的相关性有联系。即多路径路由中共用的节点数越少, 其路径连锁失效的概率就越小。

3.2.4 多路径路由最优数目的确定

在相关的多径路由文献中, 一般只是确定如何发现多路径路由, 但是对路由的数目却没有明确的选择。实际上, 路由数目并不是越多效果会越好, 因为搜索到路径越多, 路由开销也会相应的增加, 因此路径数目的选择有个相对的最优值。

由文献 [36] 可得知:

(1) 随着 N 值的增大, 即随着多路由数目的增加, 路由发现的间隔时间 T 的期望值 $E(T)$ 也随着增加, 而且所有 N 条不相关路径的长度即跳数相等的情况下, 路由发现间隔时间的增长最明显;

(2) 当 $N > 3$ 时, 这种增长的趋势已经很缓慢, 因此选取多路径路由时, 一般取 3 条就足够了;

(3) 结合实际情况, 多路径路由的数目还同节点的分布密度有着很大的关系, 路由数目越多, 搜索的难度也就上升。

基于上述分析, 选取 3 条路径从效率和开销的折中来看是相对最佳的。

3.3 最大链路不相关的多路径路由算法 MLMRA

3.3.1 MLMRA 算法的设计目标

数据收集是无线传感器网络设计的初衷所在, 如何有效、可靠地将传感器节点监测的数据传输到观察点, 是研究无线传感器网络中数据传输的重要目的之一。无线传感器网络工作环境恶劣, 信道质量差、网络容易拥塞、节点易破坏, 使得数据传输失败的可能性大大增加, 由于传感器网络节点的冗余以及各个节点

都具有路由功能，因而从任何一个源节点到目的节点的路径通常会有多条，如果能为各个节点都建立一条或多条替换路径，整个网络的路由可靠性和容错性就会得到提高。

从多路径路由相关性分析可知，节点不相关路由比链路不相关路由具有更强的节点失效独立性，即某节点失效后只会造成一条路径断链。但节点不相关路由的选路规则太严格，这会限制运行场景中的多路径数目，因而在实际应用中一般都采用链路不相关路由的建路方式。无线传感器网络及网络节点具有高度冗余的特点，通过 3.2.3 小节中多路径路由稳定性分析，得出多路径路由的稳定性同路径中间共用节点的个数即路径中节点的相关性有关。当发生路径中断时，如果多路径路由中的共用节点越少，多路径连锁失效的概率也就越小。

文献[14]中提出的 AOMDV 协议采用寻找链路不相关路径为默认方式，通过获取多条无环路和链路不相关路由来实现多路径。AOMDV 协议建立链路不相关的多路径路由时，只考虑了最少跳数和最短时延，而没有考虑建立的多路径路由之间存在的相关节点对数据传输可靠性的影响，因此，本节以 AOMDV 协议为基础，提出了最大链路不相关的多路径路由算法 MLMRA。在 MLMRA 算法中，改进目的节点处理相同 RREQ 数据分组以获得多路径路由的实现过程，能够充分利用目的节点接收到的 RREQ 数据分组，在链路不相关路由的多路径建立过程中优先建立节点不相关路由，降低路径中断时连锁失效的概率以提高路由数据的可靠性。

3.3.2 主要数据分组及结构定义

MLMRA 算法将路由控制消息分为三类：RREQ, RREP, RERR。RREQ 和 RREP 数据分组是端到端的路由控制消息。RREQ 广播发起寻路过程，而 RREP 单播回馈路径。在 MLMRA 中，前提假设链路是双向的，根据此假设采用了反向路由技术，RREP 消息采用了单播的形式，通过反向路由，逐跳转发回到源节点。RERR 数据分组是路由出错消息。

MLMRA 算法的 RREQ/RREP/RERR 分组的结构如下：

1、RREQ 数据分组

RREQ 数据分组用于路由请求，主要由以下一些字段组成：

- Type
- Destination ID
- Destination Sequence Number
- Source ID

- Source Sequence Number
- Broadcast ID
- FirstHop ID
- Advertisement Hopcount

其中,“Type”用于标识分组的类型;“SourceID”和“DestinationID”分别是源节点和目的节点 ID,“Source Sequence Number”和“Destination Sequence Number”分别是源节点和目的节点的序列号;“Broadcast ID”用于唯一标识一个路由请求,字段的值要在源节点维护的最新值的基础上加 1;“FirstHop ID”为首跳节点 ID,用于记录首次转发 RREQ 数据分组的节点 ID,也即转发 RREQ 分组的源节点的一跳邻居节点的 ID,此字段只能由源节点的邻居节点设置值,在自此之后的转发过程中该字段值保持不变,这是保证路径之间链路不相关的关键字段;“Advertisement Hopcount”为广播跳数,用于计算 RREQ 分组经过的节点数。

2、RREP 数据分组

RREP 数据分组用于路由回复,主要由以下一些字段组成:

- Type
- Broadcast ID
- Destination ID
- Destination Sequence Number
- Source ID
- Source Sequence Number
- Hop Count

其中,“Broadcast ID”用于唯一标识一个路由回复,字段的值要在源节点维护的最新值的基础上加 1;“Source ID”用于记录 RREP 数据分组的源节点 ID,即 RREQ 数据分组的目的节点 ID;“Destination ID”用于记录 RREP 数据分组的目的节点 ID,即 RREQ 数据分组的源节点 ID;“Hop Count”用于计算 RREP 数据分组经历过的跳数。

3、RERR 数据分组

- Type
- Destination ID
- Destination Sequence Number

RERR 数据分组中包含不可到达节点的 ID 和序列号,其中“Destination Sequence Number”用于收到 RERR 的节点判断该消息是否已经收到或过时。

4、节点路由表的格式如图 3.5 所示。

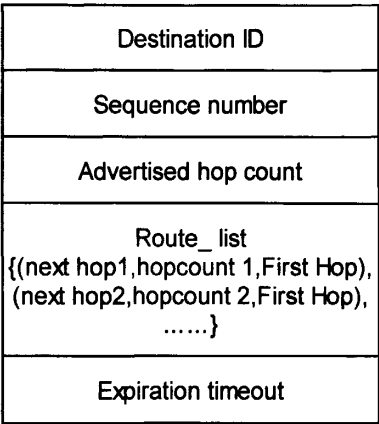


图 3.5 节点路由表示意图

3.3.4 多路径路由的建立

MLMRA 算法是基于 AOMDV 的按需驱动路由。当源节点需要向目的节点发送数据时，它首先在本节点维护的路由表中查找是否有到达该目的节点的路由。若路由表中已包含了到达目的节点的有效路由，则立即使用此路由向目的节点发送数据分组，否则它就生成一个路由查询数据分组 RREQ，并向所有邻居节点广播 RREQ 数据分组，用以发起一个路由发现过程来建立多条链路不相关的到达目的节点的可用路由。

（一）源节点生成及发送 RREQ 数据分组

源节点需要发送数据时且路由表中无到达目的节点的有效路由时，它便启动路由发现机制，广播一个 RREQ 数据分组。

（二）中间节点接收及处理 RREQ 数据分组

中间节点收到 RREQ 报文时，首先检查广播序列号的值判定该报文是否为重复路由请求报文，如果是重复路由请求报文，则不转发；然后检查该报文是否为有效路由请求报文，若是，则更新自身路由表信息，转发该 RREQ 报文；否则，扔到该请求报文。

中间节点判定 RREQ 有效性的标准是：

- ①. 所获报文目的节点序列号大于该节点路由信息表中相应的序列号；
- ②. 所获报文目的节点序列号等于该节点路由信息表中相应的序列号，广播跳数小于该节点路由信息表中相应的广播跳数且首跳节点不存在路由列表中。

则认为该报文为最新报文。

RREQ 数据分组的生成及处理流程如图 3.6 所示。

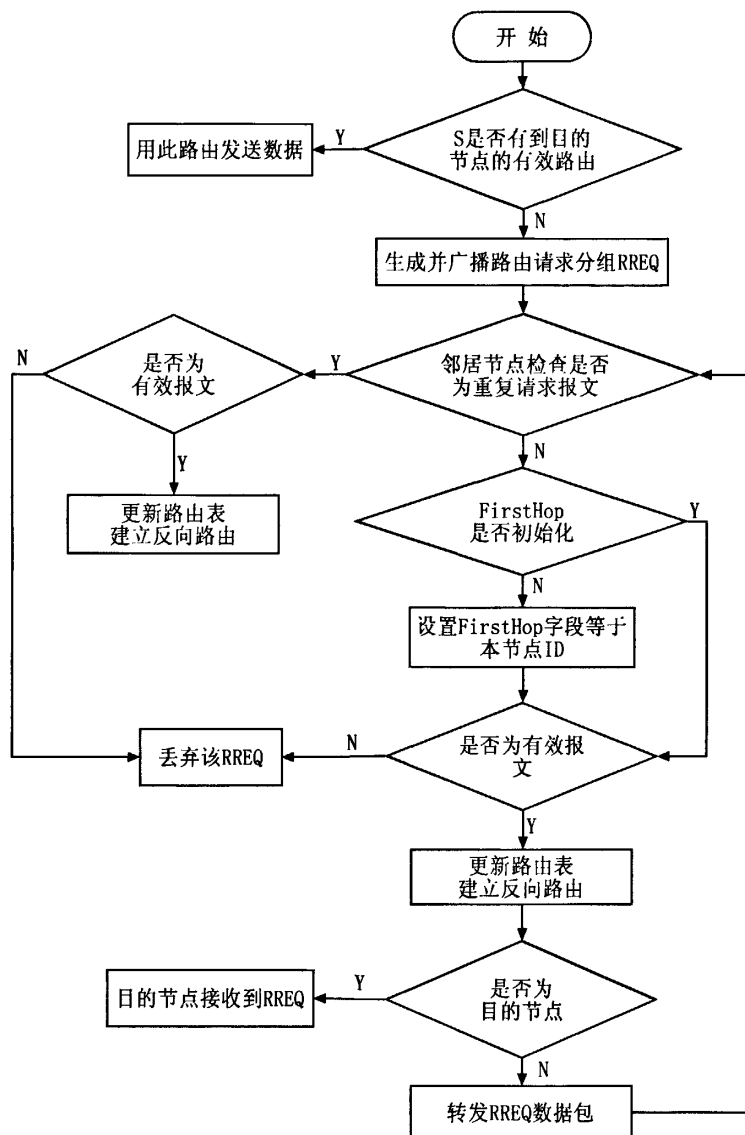


图 3.6 RREQ 生成及处理流程

(三) 目的节点接收 RREQ 及生成 RREP 数据分组

为了最后建立的多路径路由能够尽可能的实现节点不相关,降低路径之间的关联性,我们改进了目的节点处理相同 RREQ 数据分组以获得多条路径的实现过程。目的节点处理 RREQ 及生成 RREP 的流程图如图 3.7 所示。

当目的节点收到第一个 RREQ 包,它并不像传统路由协议那样立刻对其进行处理并建立反向路由发送路由应答分组 RREP,而是将收到的 RREQ 存储在缓冲存储器中,同时启动一个定时器,在定时器的时间内,目的节点存储其它相同的 RREQ 数据分组。

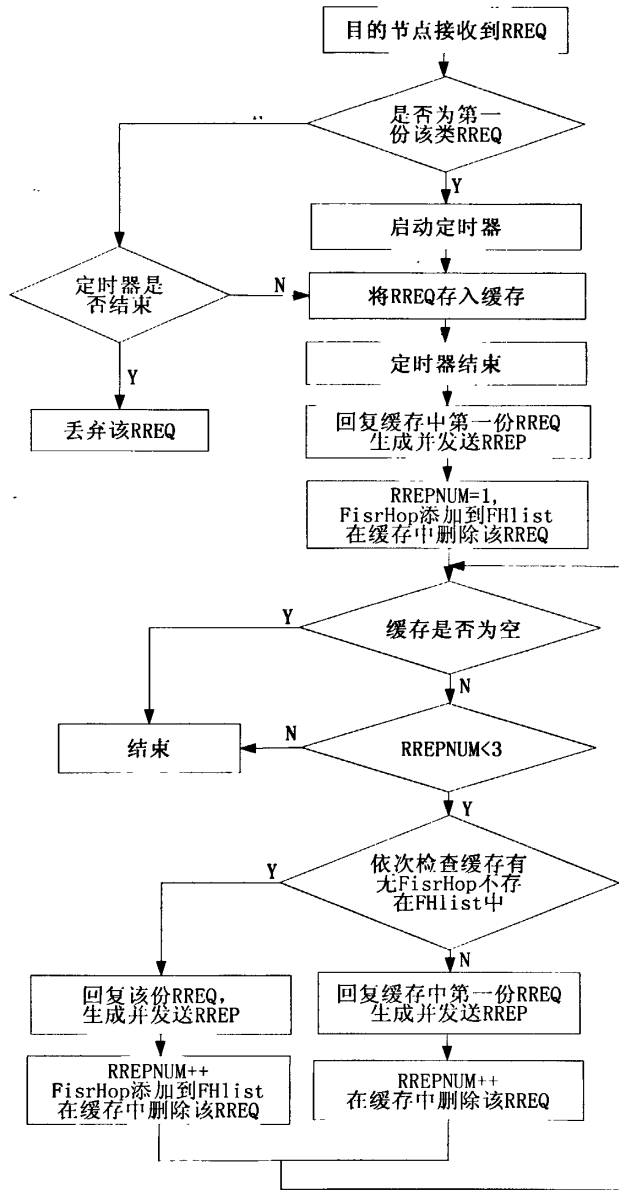


图 3.7 目的节点处理 RREQ 及生成 RREP 的流程

当定时器关闭后，目的节点才对这些 RREQ 数据分组进行处理：

STEP 1. 目的节点对缓冲存储器中第一个 RREQ 建立反向路由并发送路由应答分组 RREP，将该 RREQ 的首跳节点 ID 加入到 FHlist() 列表中，RREPnum=1，删除缓冲存储器中该 RREQ 的表目；

STEP 2. 如果缓冲存储器为空或者 RREPnum>3，则转到 STEP 5；否则，依次对存储在缓冲存储器中的其他 RREQ 的首跳节点 ID 与 FHlist() 列表中的节点 ID 比较，如果存在不相同的，执行 STEP 3；否则执行 STEP 4；

STEP 3. 对该 RREQ 建立反向路由并发送路由应答分组 RREP, 将该 RREQ 的首跳节点 ID 加入到 FHlist () 中, RREPnum+1; 删除缓冲存储器中该 RREQ 的表目, 执行 STEP 2。

STEP 4. 对该 RREQ 建立反向路由并发送路由应答分组 RREP, RREPnum+1; 删除缓冲存储器中该 RREQ 的表目, 执行 STEP 2。

STEP 5. 结束。

根据 3.3 小节中所分析的, 算法中我们确定建立的路由的最大数目为 3, 即目的节点最多只回复三份路由应答分组 RREP。

(四) 中间节点转发 RREP 数据分组

当一个中间节点从它的邻居节点处接收到一个 RREP 包时, 首先建立反向路由以显示已经发现到目的节点的路径。然后, 更新 RREP 数据分组, 在路由表中选择一条到源节点的路径, 将更新后的 RREP 数据分组传输到相应的邻居节点。

(五) 源节点接收到 RREP 数据分组

当源节点接收到 RREP 数据分组时, 节点 ID 匹配, 不再转发 RREP, 源节点到目的节点的前向路径就建立起来了。源节点可以选择一条路径进行数据传输。

3.3.5 多路径路由的维护

数据通过主路径进行传输, 同时利用备用路径低速传送数据来维护路径的有效性; 主路径中的链路可能由于节点的失效而断裂。因此, 修复断裂的路径非常重要。在我们的算法中, 当一个节点不能够将包传送到下一个节点, 就认为到下一个节点的链路已经断开, 于是发出一个路由错误数据分组 RERR 到这条路径的上游节点。这个 RERR 数据分组中包含不可到达节点的 ID 地址和序列号。上游节点一旦收到 RERR 数据分组, 将删除其路由表中所有使用断开节点的表项, 如果该节点还有上游节点, 则继续广播这个消息。源节点接收到 RERR 数据分组, 从备用路径中选择一条作为新的主路径继续传送数据包。当所有的路径都断开时, 源节点将重新发起一个路由查询过程。

3.3.6 MLMRA 算法分析

首先通过一个例子了解 MLMRA 算法的目的节点处理 RREQ 及生成 RREP 的过程。在如图 3.8 的网络拓扑中, 采用 AOMDV 和 MLMRA 两种路由算法进行路由计算。假设目的节点 D 先后从邻居节点 E, F, G, H 和 I 接收到了 5 份

RREQ, 节点 E, F 发送的 RREQ 的首跳节点 $Fhop$ 为 A, 节点 G, H 发送的 RREQ 的 $Fhop$ 为 B, 节点 I 发送的 RREQ 的 $Fhop$ 为 C。

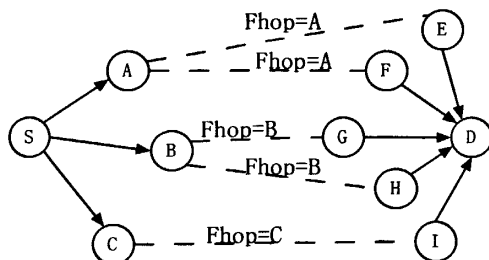


图 3.8 网络拓扑结构

采用 AOMDV 算法, 目的节点 D 将回复最先收到的三份 RREQ, 分别是来自于邻居节点 E, F 和 G, 而 H, I 节点发送过来的 RREQ 将直接丢弃。从图 3.8 的网络拓扑可以看出, AOMDV 算法最后将只能建立起 S-A---E-D 和 S-B---G-D 两条路径。

采用 MLMRA 算法, 在定时器结束前, 目的节点的缓存存储了邻居节点 E, F, G, H 和 I 发送的 RREQ 数据分组。当定时器结束, 目的节点通过对首跳节点 First Hop 的筛选, 将分别回复来自于邻居节点 E, G 和 I 的三份 RREQ, 源节点和目的节点之间能够建立起 S-A---E-D, S-B---G-D 和 S-C---I-D 三条节点不相关路由。

由此可以看出, 相对于传统的 AOMDV 算法, MLMRA 算法不仅能够保证路径建立的数目, 而且能够优先实现多路径路由的节点不相关, 降低了所建立的多路径路由之间的节点关联性, 减少了路径中断时连锁失效的概率, 数据传输的可靠性得到了提高。

3.4 小结

路由的可靠性是任何无线网络中最重要的研究热点之一。在已有的数据可靠传输方法中, 由于多路径方法可以显著的提高网络在数据传输方面的可靠性, 在借鉴以往路由算法思想的基础上, 本章给出了最大链路不相关的多路径路由算法 MLMRA, 该算法在建立链路不相关的多路径过程中, 考虑了无线传感器网络及网络节点高度冗余的特点, 能够快速的在源节点与目的节点之间优先建立多条节点不相关路由, 降低了路径之间的关联性, 减少了路径中断时连锁失效的概率, 能够有效提高数据传输的可靠性。

第四章 能量感知的多路径路由算法 EMRA

网络的生存时间是无线传感器网络非常重要的度量指标之一。由于节点能量受限,数据的传输能耗以及网络中节点的能量均衡直接关系到无线传感器网络的生存时间。本章针对 MLMRA 算法的能量有效性不足,对其进行改进,提出能量感知的多路径路由算法 EMRA,实现数据传输低能耗的同时更好的解决了网络中节点的能量均衡消耗,达到延长网络生存时间的目的。

4.1 路由算法的节能策略分析

路由协议负责路由的生成和路由选择,需要从全局上考虑如何将数据流量从源节点传递到目的节点。对整个无线传感器网络而言,网络层路由协议能量效率的提高是无线传感器网络节能的重要途径,重要问题是如何在源节点和目的节点之间找到一条节能的多跳路由。路由协议常采用不同的路由度量方式来提高能量效率,节能路由算法是在普通的路由协议基础上,考虑相关的能耗因素,引入新的与能量消耗有关的路由衡量指标,实现能耗的节约。总的说来,能量高效的路由协议研究主要集中在两个方面:最小化路由通讯所消耗的总能量和最大化网络生存时间。

4.1.1 最小化路由通讯所消耗的总能量

最小化通讯能量路由协议 MTPR^[37](Minimum Total Transmission Power Routing)试图在源节点 S 和目的节点 D 之间找到一条消耗能量最小的路径。假设一个数据包传输经过的节点为 $n_1, \dots, n_i, n_{i+1}, \dots, n_k$, 我们用 $E_{Tx}(a,b)$ 来表示从节点 a 一跳传输数据包到节点 b 所消耗的能量。那么如果不考虑接收能量,数据包的一次传输所消耗的总能量为:

$$E = \sum_{i=1}^{k-1} E_{Tx}(n_i, n_{i+1})$$

该协议的目标是对于某个数据包,最小化其传输总能量 E。

最小化通讯能量策略算法简单并且可以很好地嫁接到原有的按需路由策略或者表驱动路由策略中,但它包含两个缺点:一方面,这类节能策略有可能使得一些关键节点频繁地落入最小传送功率路径上,而大量的负载将使得这些节点过早地耗尽能量,从而产生网络分化。另一方面,产生大量的 Hop,增长端到端时

延,在较差的无线链路上还将导致大量的重传,仿真结果表明重传带来的消耗在一些场合中甚至超过该策略本身所减少能耗。

4.1.2 最大化网络的生存时间

最大化网络生存时间(maximum lifetime)的节能路由协议考虑的是将通讯负载分散在各个节点之间,平衡网络中各个节点的能量消耗,从而延缓网络出现分割的时间,使整个网络的生存时间最大化。当前研究者们提出了很多最大化网络生存时间的路由算法与协议,比如 MBCR^[38],和 MMBCR^[38]等。

MBCR 策略从网络全局上得到平均电池能量充足的路由,但仍旧不能避免该路由中某些节点的电池能量消耗比较快,导致过早失效;MMBCR 策略在选择路由时尽可能地避开了网络中具有最小电池能量的节点,因而实现了节点的公平使用,但节点的平均寿命将由于选择了那些具有较大能耗的路径而减少。

上面我们给出了两种节能路由算法的所考虑的度量指标:最小化路由通讯所消耗的总能量和最大化网络的生命时间。我们可以把这两种度量指标结合起来,在考虑最大化网络生命时间的同时最小化路由通讯所消耗的总能量。

4.2 能量感知的多路径路由算法 EMRA

4.2.1 EMRA 算法的设计目标

网络中节点的能量均衡消耗是无线传感器网络的一个关键技术,最终目的是使网络中的无线传感器节点在能量有限的情况下能够较为均衡地减少。因为如果数据转发消耗的能量集中在某几条路径上,那么这些路径上的节点能量将很快耗尽,产生“隔离带”,严重影响网络的数据转发,甚至导致网络瘫痪,失去数据采集能力。无线传感器网络节点的能量有限性促使路由算法在设计上应充分考虑节点能量的有效使用,路由算法的合理设计可以极大地降低能量的消耗。

传统路由协议的首要目标是提供高质量服务和公平高效地利用网络带宽,主要任务是寻找源节点到目的节点间通信延时小的路径,同时提高整个网络的利用率,避免产生通信拥塞并均衡网络流量等,而能量消耗问题不是考虑的重点。在无线传感器网络中,节点能量有限且一般没有能量补充,所以路由算法必须考虑如何选择路径才能高效地利用能量,不仅要选择能量消耗小的数据传输路径,而且要从整个网络的角度考虑,选择使整个网络能量均衡消耗的路由。

本节我们对 MLMRA 算法的能量有效性所存在的不足进行改进,提出了能量感知的多路径路由算法 EMRA。在 EMRA 算法中,能量感知的数据传输路径

的选择策略不仅能够均衡网络中节点的能量消耗,而且能够实现数据传输路径的低能耗,从而达到延长网络生存时间的目的。

4.2.2 网络模型

由于无线传感器网络的设计目标差别很大,为此我们对 EMRA 算法适用的无线传感器网络做如下假设:

(1) 无线传感器网络由一个基站和 n 个传感器节点组成,基站和节点的位置固定。

(2) 基站能量充足,传感器节点能量有限且不可替换。为保证节点能量的一致性,设定每个节点具有相同的初始能量。每个节点能随时获得自己的能量水平。

(3) 网络中每个节点都拥有唯一的 ID 编号,且发射功率固定,不可调节;节点不需要了解自己的位置信息,因此,节点不需要配备 GPS 设备。

(4) 网络中节点间不存在单向链路,即 A 节点能够与 B 节点通信, B 节点也能与 A 节点通信。

4.2.3 相关定义

首先,我们给出下面的定义:

定义 $G=(V, E)$ 表示一个传感器网络,其中, V 代表网络中的传感器节点集合, E 是网络中的传感器节点之间所有通信链路的集合, $\forall i, j \in V$, 如果传感器节点 i, j 之间的距离小于最大通信距离 r , 则它们之间存在一条双向通信链路 $(i, j) \in E$ 。假设从 S 到 D 有 m 条路径可以传输数据, $Path_m$ 属于源节点 S 到目的节点 D 的可供选择的有效路径集合 Ω , 即 $Path_m \in \Omega$, Ω 表示 S 到 D 的有效路径集合。 $Npath_m$ 表示 S 到 D 的路径第 m 条路径上的节点集合。

定义 4.1: 节点能量模型。定义节点的初始能量为 IE (Initial Energy), 可用能量为 EA (Energy Available), 节点能耗为 EC (Energy consumption), $EA=IE-EC$ 。

定义 4.2: 节点的能量因数。节点的能量因数 (Energy Factor of node i , EF_i) 是指某时刻网络中的节点 i 的可用能量 EA_i 与初始能量 IE_i 的比值。可以看出, 节点 EF_i 的值越大, 表示节点的剩余能量水平越好。

$$EF_i = EA_i / IE_i \quad (4.1)$$

定义 4.3: 路径的能量因数。路径的能量因数 (*Energy Factor of Path_m*, $EF(Path_m)$) 是指源节点 S 到目的节点 D 的有效路径 m 上的所有节点的能量因数的乘积。

$$EF(Path_m) = \prod_{i \in N_{path_m}} EF_i \quad (4.2)$$

路径的能量因数以中间跳数和节点能量因数为权值, 体现了路径的健壮性。当发送功率固定不变时, 减少路径的中间跳数意味着降低总的传输功率, 从而可以减少网络总能耗。 $EF(Path_m)$ 的值大小不仅与路径的中间跳数有关, 而且与路径上节点的能量因数有关。在节点的能量因数相对均等的情况下, 路径上的跳数越多, $EF(Path_m)$ 的值就越小; 相同的, 在路径跳数相等的情况下, 若路径上某个节点的能量因数接近临界状态, $EF(Path_m)$ 的值收敛很快。

定义 4.4: 决定性能量。决定性能量 (*Decisive Energy, DE*) 是指某条可用路径 $Path_m$ 上的所有节点的最小能量因数。记 $DE(MinEF, Path_m)$ 为路径 $Path_m$ 的决定性能量。

$$DE(MinEF, Path_m) = \min_{i \in N_{path_m}} \{EF_i\} \quad (4.3)$$

4.2.4 多路径路由的建立

EMRA 算法是基于 MLMRA 的改进, 其多路径路由的建立过程与 MLMRA 相似。所不同的是, 当目的节点回复 RREP 数据分组时, RREP 数据分组中除了广播序列号, 目的节点 ID、目的节点序列号、源节点 ID, 源节点序列号, 跳数等参数以外, 还增加了新的参数 $EF(Path_m)$, $DE(MinEF, Path_m)$ 以及 *LastHop*, $NodeJoint\{(i, Path_m)\}$ 。RREP 数据分组格式如图 4.1 所示。

Type	Bid	Did	Dseq	Sid	Sseq	$EF(Path_m)$	DE	LastHop	NodeJoint
------	-----	-----	------	-----	------	--------------	----	---------	-----------

图 4.1 EMRA 算法的 RREP 数据分组格式

其中, $EF(Path_m)$ 用来表示路径 m 的能量因数; $DE(MinEF, Path_m)$ 表示路径 m 的决定性能量; *LastHop* 记录目的节点回复的 RREP 数据分组所到达的第一个邻居节点 ID, 可以用来标记不同的路径序号; *NodeJoint* 记录多条路径之间的相关节点 ID 以及相关的路径序号。

当一个中间节点从它的邻居节点处接收到一个 RREP 数据分组时:

STEP1: 首先建立反向路由以显示已经发现到目的节点的路径。

STEP2: 该节点检查 RREP 数据分组中 *LastHop* 和 $DE(MinEF, Path_m)$ 有没有初始化, 如果没有, 设置 *LastHop* 等于本节点 ID, $DE(MinEF, Path_m)$ 等于本

节点的能量因数 EF_i 。否则比较 $DE(\text{MinEF}, \text{Path}_m)$ 与本节点的 EF_i 的值, 如果大于, 则更新 RREP 数据分组中 $DE(\text{MinEF}, \text{Path}_m)$ 等于本节点的能量因数 EF_i 。

STEP3: 更新 RREP 数据分组中的 $EF(\text{Path}_m)$ 值。

STEP4: 检查节点路由表, 是否已经建立了到源节点的路径。如果是, 则把相关的路径序号 Path_m 和该节点 ID 更新到 RREP 数据分组 NodeJoint 字段中。

STEP5: 在节点路由表中选择一条到源节点的路径, 将更新后的 RREP 数据分组传输到相应的邻居节点。

当源节点接收到 RREP 数据分组时, 节点 ID 匹配, 不再转发 RREP 数据分组, 源节点到目的节点的前向路径就建立起来了。源节点可以选择一条作为主路径进行数据传输。

EMRA 算法处理 RREP 流程图如图 4.2 所示。

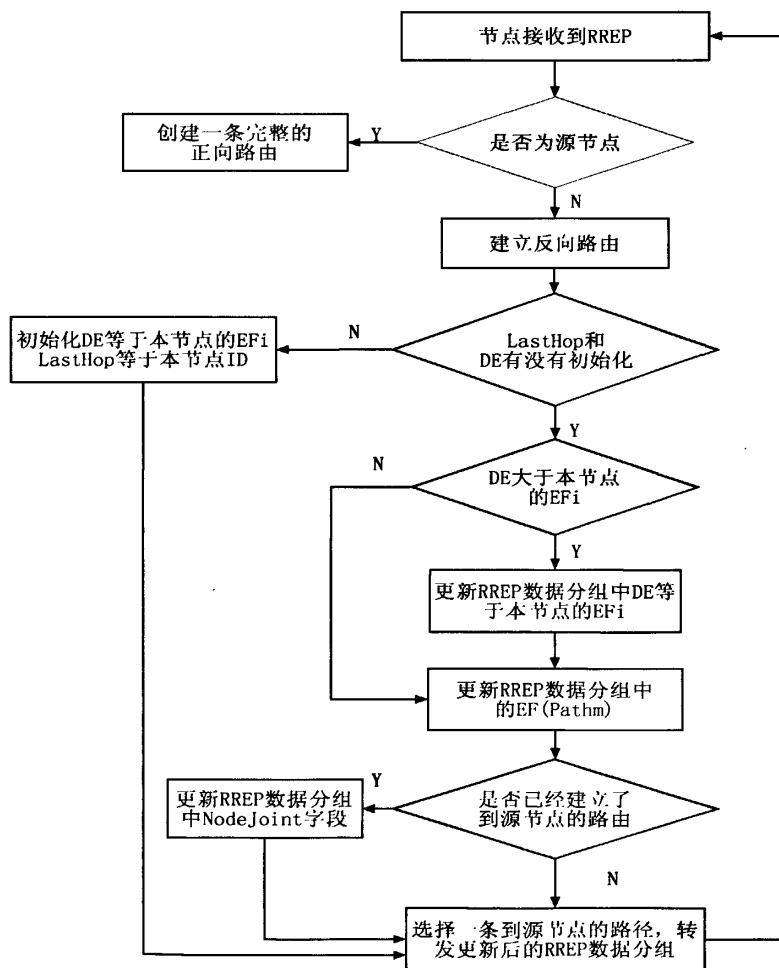


图 4.2 EMRA 算法 RREP 数据分组处理流程

4.2.5 数据传输路径选择规则

MLMRA 算法数据传输的主路径选择是采用最短跳数或最少时延的路径,即通过接收第一个 RREP 分组建立的路径,而其它的作为备用路径,在主路径失效时随机切换到一条备用路径,当所有备用路径都失效时才重新启动路由发现过程。但是这种选择主路径的方法不能保证主路径的健壮性,一条具有最短跳数的路径但同时可能是极不稳定的路径,在拓扑结构易变的环境中更容易断链,从而导致丢包严重。EMRA 算法改进了这一点,能量感知的主路径的选择和次优路径的选择规则综合考虑了数据传输的能耗以及路径的可靠性。

(一) EMRA 算法主路径选择规则

当源节点和目的节点建立了多条路由,需要进行数据传输时,源节点按照定义 4.5 选择主路径进行数据传输。

定义 4.5: 设 $Q = \{DE > \lambda, Path_m \in \Omega\}$, 其中 λ 为阈值。如果 $Q \neq \emptyset$, 从 Q 中选择一条路径的能量因数最大的路径。

$$Router = \arg \max_{Path_m \in Q} \{EF(Path_m)\} \quad (4.4)$$

否则, 从所有可用的路径集 Ω 中选择一条决定性能量最大的路径。

$$Router = \arg \max_{Path_m \in \Omega} \{DE(MinEF, Path_m)\} \quad (4.5)$$

其基本思想是: 在可选路径集中如果存在决定性能量大于阈值 λ 的路径, 则选择决定性能量大于 λ 并且路径能量因数最大的那条路径进行数据传输; 否则选取决定性能量最大的那条路径进行数据传输。这里我们设置 λ 的阈值为 0.3。

据此算法, 源节点可根据任务和传输要求来选择合适的路径来传输数据。在源节点在进行数据传输任务时, 都会选择当前能量均衡的、健壮、跳数尽量少的路径来传输数据, 避免了能量相对少的网络路径, 使能量的消耗相对均衡, 延长了网络的生存时间。

在图 4.3 的拓扑结构所示, 采用 EMRA 算法, 假设从源节点和目的节点建立了三条节点不相关路由, 分别是 $Path_c$: S-A-B-C-D, $Path_h$: S-E-F-G-H-D 和 $Path_z$: S-X-Y-Z-D。数据可以沿着其中的任意一条路径从源节点发送到目的节点。

源节点通过接收到的 RREP 数据分组中的 $EF(Path_m)$ 和 $DE(MinEF, Path_m)$ 字段信息可以知道:

- ① $Path_c$ 的路径能量因数为 $0.6 \times 0.6 \times 0.6 = 0.216$, 决定性能量为 0.6;
- ② $Path_h$ 的路径能量因数为 $0.6 \times 0.7 \times 0.8 \times 0.6 = 0.2016$, 决定性能量为 0.6;
- ③ $Path_z$ 的路径能量因数为 $0.9 \times 0.3 \times 0.9 = 0.243$, 决定性能量为 0.3。

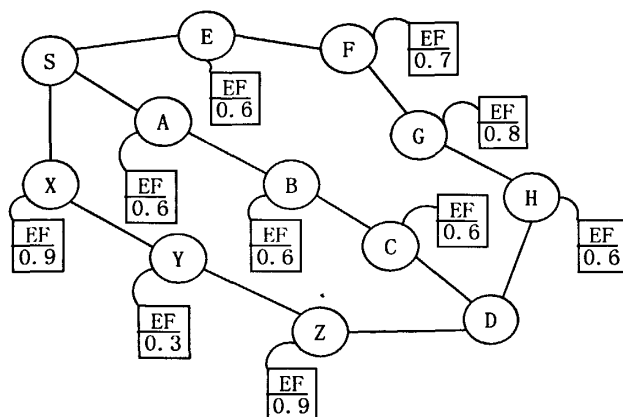


图 4.3 网络拓扑及节点的能量因数

按照定义 4.5 的主路径选择规则，由于 $Path_c$ 和 $Path_h$ 的决定性能量 DE 大于 λ ，因此主路径在 $Path_c$ 和 $Path_h$ 中选择。其中， $Path_c$ 的路径能量因数大于 $Path_h$ ，所以源节点最后选择路径 $Path_c$ 作为主路径进行数据传输。从中可以看出，虽然 $Path_z$ 的路径能量因数值最大，但是由于决定性能量 DE 不大于 λ 而被排除；而路径 $Path_h$ 上的节点的能量因数虽然均大于或者等于 $Path_c$ 上的节点，但是由于跳数较多，最后的路径能量因数乘积小于路径 $Path_c$ 。

所以，EMRA 算法的主路径选择策略不仅保护了网络中处于低能量水平的节点，而且考虑了把较少跳数和节点的剩余能量水平作为路径选择的度量，较好地实现传输路径的低能耗，从而延长网络的生存时间。

（二）EMRA 算法次优路径的选择规则

当主路径失效时，需要从备用路径中选择一条作为次优路径继续传输数据。EMRA 算法次优路径的选择规则如下：源节点通过 RREP 数据分组中的 *NodeJoint* 字段中的信息可以知道建立的路径之间的节点相关性。通过比较，在剩下的备用路径集中找出一条与失效主路径不存在相关节点或者共用节点数目最少的一条作为次优路径。只有当备用路径集中的路径与主路径都不存在相关节点或者共用节点数目相同的情况下，才按照定义 4.5 来选择次优路径。

通过一个例子来理解次优路径的选择规则。如图 4.4 所示的网络拓扑中，采用 EMRA 算法，假设源节点 S 和目的节点 D 之间建立了三条路径，分别是 $Path_c$ (S-E-F-G-C-D)， $Path_h$ (S-A-B-G-H-D)， $Path_z$ (S-X-B-Y-Z-D)。源节点 S 从接收到的 RREP 数据包中 *NodeJoint* 字段的信息可以知道，源节点 S 到目的节点 D 的路径集中， $Path_c$ 和 $Path_h$ 有共用的节点 G， $Path_h$ 和 $Path_z$ 有共用的节点 B。

1) 如果源节点选择 $Path_c$ 作为主路径，当 $Path_c$ 因为节点失效而导致路径断开时，按照次优路径选择规则，源节点将避开有共用节点的 $Path_h$ 而选择 $Path_z$ 。

作为次优路径。同样的，如果选择 $Path_z$ 作为主路径，当主路径失效时，源节点将选择 $Path_c$ 作为次优路径。

2) 如果源节点选择 $Path_h$ 作为主路径，当 $Path_h$ 断开时，由于 $Path_c$ 、 $Path_z$ 与 $Path_h$ 均存在一个共用的节点，则按照定义 4.5 来选择次优路径。

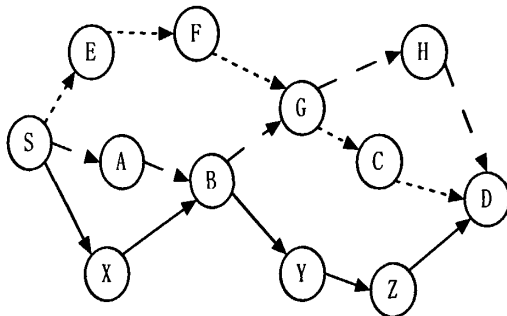


图 4.4 节点拓扑结构图

次优路径的选择规则保证了在主路径失效时，源节点能够优先选择与主路径不相关的或者共用节点数目最少的路径作为次优路径，降低路径连锁失效的概率，增强了网络的容错能力。

4.2.6 EMRA 算法分析

由 EMRA 算法可知，在多路径建立阶段，和 MLMRA 路由算法相比，开销基本一样，只多了计算能耗参数，计算消耗的能量相对于发射和接收来说，几乎可以忽略不计。源节点和目的节点之间生成多条最大链路不相关路径，保证能完成任务，避免出现发现的路径完不成任务的情况。

源节点选择数据传输路径时，通过计算得到各条路径的能量因数以及决定性能量，隐式的反映了各路径的健壮状况，源节点 S 可以根据各路径的能量因数和决定性能量来选择合适的路径传输数据。据此算法，源节点选择数据传输路径时，都能选择当前能量均衡的、健壮、跳数尽量少的路径来传输数据，避免了能量相对少的网络路径，使能量的消耗相对均衡。当主路径发生断裂，源节点选择次优路径时能够优先选择与主路径不相关的或者共用节点数目最少的路径作为新的数据传输路径，降低了路径连锁失效的概率，增强了网络的容错能力。

因此，EMRA 算法在保证网络传输可靠性的前提下，不会因为某条路径过度使用造成此路径上的关键节点能量过快消耗使得网络因能量消耗不均而引起部分网络瘫痪或者整个网络失效，达到均衡能量消耗、延长网络生存时间的目的。

4.3 小结

无线传感器网络一个突出的特征就是能量受限,节点的能量均衡直接关系到无线传感器网络的生存期,所以目前针对无线传感器网络设计的协议基本上都是以能量最优为设计目标的。本章针对 **MLMRA** 算法能量有效性的不足,提出了能量感知的多路径路由算法 **EMRA**,能均衡网络中节点的能量消耗,实现数据传输的低能耗,达到延长网络生存时间的目的。

第五章 仿真实验与结果分析

网络仿真工具中,最具代表性的是 OPNET^[40], QualNet^[41], OMNET++^[42] 和 NS-2^[43]。其中, OPNET 涵盖网络设计、仿真、分析和优化等领域,提供庞杂的开发库,功能强大,是市场上最成功的商业网络仿真软件之一。QualNet 基于 GloMoSim^[44],包括网络设计、仿真、分析和动画等功能模块,与 OPNET 相比,易于掌握,仿真效率较高。OMNET++是基于组件的开源网络仿真框架,具有较友好的图形用户界面。NS-2 是基于分裂对象模型的开源网络仿真工具,能较快反映当前网络仿真需求的热点,提供了较完整的协议栈和大量已有协议的实现,易于进行协议间的横向性能比较,其仿真结果得到学术界认可,在国内外高校科研院所得广泛应用。

但是以上仿真工具目前都不直接提供对传感器网络仿真的支持,需做相应扩展。考虑到 TOSSIM^[45,46]仿真软件直接提供对传感器网络仿真的支持,因此本文在实验阶段采用了 TOSSIM 仿真工具。

5.1 实验仿真平台——TOSSIM

TinyOS^[47]是美国加州大学 Berkeley 分校开发的一个开源的嵌入式操作系统,它是专门针对现代无线传感器节点的特性及应用需求设计的。TinyOS 是一个基于组件(Component-Based)的操作系统,结构简单,能够快速实现各种应用。TinyOS 的程序采用模块化设计,程序核心都很小(一般来说核心代码和数据大概在 400Bytes 左右),克服了传感器节点存储资源受的不足,这使得 TinyOS 能够有效的运行在无线传感器网络上并去执行相应的应用管理任务。

TinyOS 系统、库及应用程序都是用 nesC 语言写的,它本身提供了一系列的组件,它可看成是一个可以与传感器进行交互的 API 接口,它们之间可以进行各种通讯,这样可以很简单方便的编制程序,用来获取和处理传感器的数据并通过无线电来传输信息。TinyOS 在构建无线传感器网络时,会有一个基地控制台,用来控制各个传感器子节点,并聚集和处理它们所采集到的信息,通过在控制台发出管理信息,然后各个节点通过无线网络互相传递,最后达到协同一致的目的,比较方便。

nesC 语言^[47]是由 C 语言扩展而来的,具有类似 C 语言的语法,意在把组件化/模块化思想和基于事件驱动的执行模型结合起来。nesC 提供了比较完善的组件机制和事件驱动机制,从而降低了面向传感器网络的操作系统和应用程序实现

的复杂度。目前 nesC 已被用作 Berkeley 大学 TinyOS 的编程语言。现有的一些重要传感器网络应用程序使用 nesC 实现。

TOSSIM 是一个可以在 PC 机上运行的 TinyOS 的模拟器。TOSSIM 能够同时模拟成百上千个节点，并捕获节点的网络行为。TOSSIM 提供运行时调试输出信息，允许用户从不同的角度分析和观察程序的执行过程。TOSSIM 的特点是建立了 TinyOS 的底层部分硬件的软件抽象，并增加了仿真必须的事件模型和外部通信机制。TOSSIM 已经使用在 TinyOS 节点的性能分析中，并通过仿真运行发现解决了 TinyOS 系统内部的部分缺陷。TOSSIM 是高度面向 TinyOS 系统的仿真工具，可以进行比特级的仿真，而这点是目前大部分仿真工具所不具备的。TinyViz 是基于 Java 的 TOSSIM 可视化工具，允许仿真的可视、可控及可分析，展示了 TOSSIM 的通信服务能力。TinyViz 如图 5.1 所示。

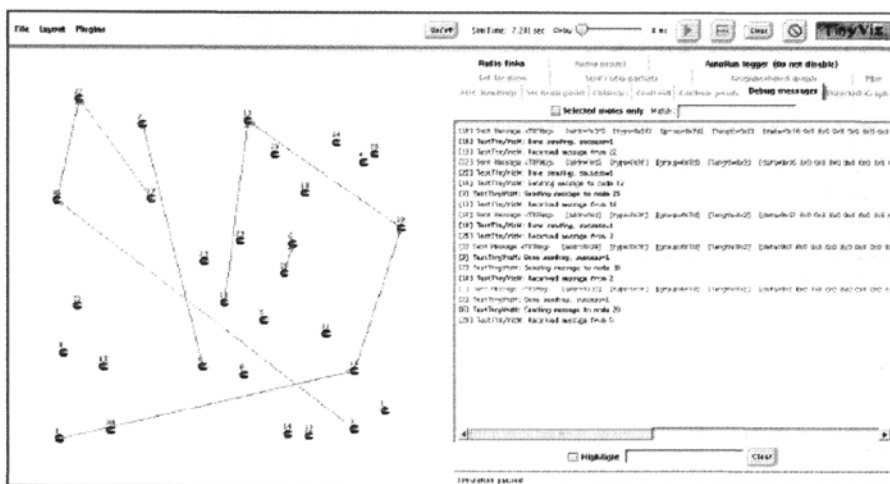


图 5.1 可视化工具 TinyViz 的示意图

5.2 仿真运行环境

TinyOS 的安装运行文件从 <http://www.tinyos.net> 处获得，软件包括两个安装文件：

■ TinyOS 自动安装程序版本：TinyOS Version 2.0

■ JDK 版本：JDK Version 1.4.1_02

安装完成后在 cygwin shell 窗口中的命令行中，键入 `toscheck` 命令能够检查软件安装是否成功。

运行 TinyOS 的 PC 配置如下：

■ CPU: Pentium (R) 4 CPU 2.40GHz

■ 内存: 512MB

■ 操作系统版本: Microsoft Windows XP Professional 2002 Service Pack 2

5.3 EMRA 算法实现

5.3.1 组件及模块介绍

第四章里面已经阐述了 EMRA 路由算法的详细过程和细节, 这里讨论如何在 TinyOS 操作系统中来实现 EMRA 路由算法。通过前面的描述可以发现, 论文采用的路由算法是一个庞大的系统, 如果只采用一个文件来实现所有的功能, 就显得非常复杂冗长, 也不符合 TinyOS 的模块化的特点。因此, 按照路由的逻辑功能, 将路由分为两个部分: 数据接收转发和路径选择。两个部分向上下层组件提供统一的接口, 它们之间也有接口相连。这样按功能分块还可以增加程序的扩展性, 当有新的路由选择算法的时候, 只需要替换相应的路径选择模块就可以了。所有的路由功能都在此模块中实现, 它对于上层的应用来说是透明的。模块的接口情况如图 5.2 所示。

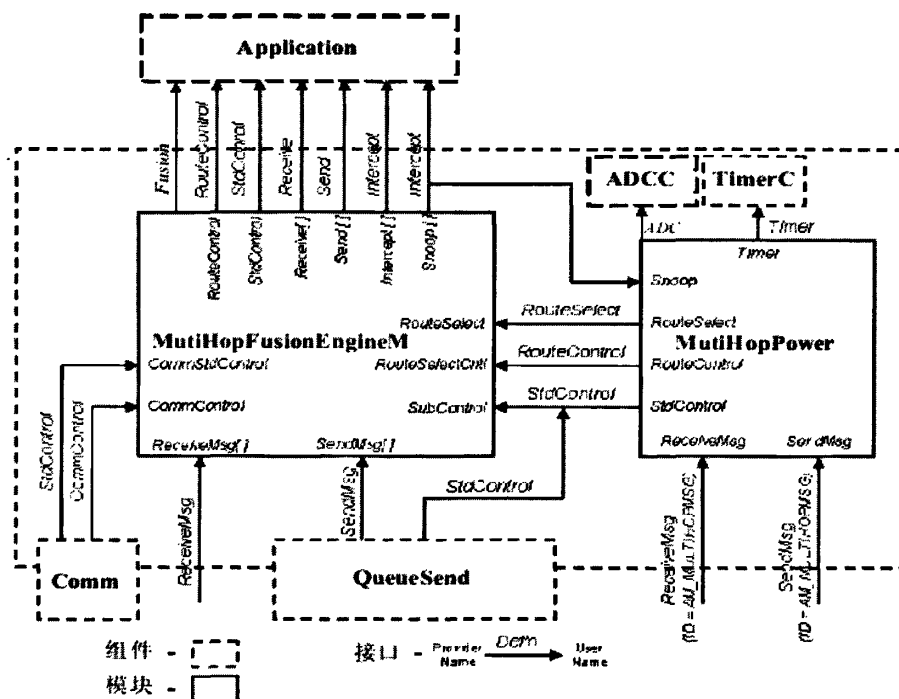


图 5.2 模块连接关系示意图

具体来看, 组成多跳路由的模块是路由引擎模块 MultiHopFusionEngineM 和路由功能模块 MultiHopPower, 连接它们的配件是 MultiHopRouter。

MultiHopFusionEngineM 提供多跳所需要的数据逻辑移动的全部功能, 包括数据包的发送、转发和接收, 判断本地是否该处理和如何处理接收到的数据包。它使用 **Routeselect** 接口获取下一跳的转发路径并且通过参数化的 **SendMsg** 接口将数据包发送。它只需要 **RouteControl** 以及 **Routeselect** 接口就可以独立工作。

MultiHopPower 模块主要就是提供路径选择算法以及能量策略的实现, 包括了节点能量的感知、链路质量评估、路由消息的发送和接收、邻居表管理等功能。它调用 **TimerC** 组件中的 **Timer** 接口获得定时功能。

MultiHopRouter 配件不仅连接了 **MultiHopFusionEngineM** 和 **MultiHopPower** 模块, 还连接其他必要的组件和接口以共同完成网络层功能。虚线框代表的是几个特别重要的功能组件。**QueuedSend** 组件提供数据优化的重发机制来实现向外数据包的排序和发送。**Comm** 组件提供通信相关的功能。**TimerC** 组件则提供计时器, 为所有一需要时间的模块提供计时接口, 在路由模块中的应用比如路由消息的定时更新等。**MultiHopRouter** 连接 **QueuedSend** 组件以向 **MultiHopFusionEngineM** 和 **MultiHopPower** 提供向外发送数据的能力, 连接 **ReceiveMsg** 接口提供接收数据的能力。这样 **MultiHopPower** 模块可以方便地和邻居节点交换并更新路由信息。

MultiHopRouter 配件向外提供以下 6 个接口:

(1) **StdControl**: **TinyOS** 标准的控制接口, 它控制组件的初始化、启动以及停止等操作。

(2) **RouteControl**: 控制监控路由操作的一个专门接口, 可以控制和监视路由操作的一些参数和设置。

(3) **Receive[]**: 此接口是一个参数化的接口, 它属于 **TinyOS** 中标准的高层接收消息接口, 高层中与接收相关的操作都通过调用它来实现。目的节点在收到数据包时, 通过此接口向上传递数据。这里隐含的目的节点只有汇聚节点。

(4) **Send[]**: 此接口是一个参数化的接口, 它是 **TinyOS** 中标准的高层发送消息的接口, 高层中所有与发送数据有关的操作由它来提供。

(5) **Intercept[]**: 此接口是 **TinyOS** 标准的截获本地消息的接口, 它在接收到需要转发的数据包时使用。它提供了检查转发路径的手段, 通过其接口的返回值决定是否转发数据包。此接口是可参数化的接口。

(6) **Snoop[]**: 此接口与 **Intercept** 有相同的定义, 但是具有不同的含义。它是 **TinyOS** 中标准的截获异地消息的接口。它是在收到不需要转发的数据包是才使用, 顾名思义, 他用于被动监听。此接口也是一个可参数化的接口。

整个路由部分调用了以下 4 个接口:

(1) **StdControl**: TinyOS 标准的控制接口, 它控制组件的初始化、启动以及停止等操作。

(2) **CommControl**: TinyOS 标准的通信功能控制接口, 负责所有与通信功能相关的命令的定义和实现。

(3) **Sendmsg**: 此接口是 TinyOS 中标准的底层发送 **TOS_msg** 消息的接口, 所有与发送 **TOS_msg** 数据包有关的操作由它来提供。

(4) **ReceiveMsg**: 此接口是 TinyOS 中标准的底层接收 **TOS_msg** 消息的接口, 所有与接收 **TOS_msg** 数据报有关的操作由它来提供。需要说明的是, 在接收到一个 **TOS_msg** 数据包之后, 这个缓存被传递给程序, 但关键的是, 程序必须在处理完后返回指向缓存的指针。若是要保存消息内容以后处理, 那么应复制消息内容到新的缓存, 或向网络栈返回一个新缓存的指针 **MultiHopFusionEngineM** 和 **MultiHopPower** 之间的一个重要接口是 **Routeselect**, **MultiHopFusionPower** 通过此接口向 **MultiHopFusionEngineM** 传递路径选择的结果。

5.3.2 数据结构设计

(1) **TOS_Msg**

TOS_Msg 是面向用户的最基本的消息格式。消息中包括了目的节点地址、消息类别、消息长度、消息组别以及消息载荷等。其中消息载荷是提供给用户的有效消息载体, **TOSH DATA LENGTH** 值设定为 29 字节。**TOS_Msg** 结构如下所示。

```
typedef struct TOS_Msg
{
    uint16_t addr;
    uint8_t type;
    uint8_t group;
    uint8_t length;
    int8_t data[TOSH DATA LENGTH];
    uint16_t crc
    uint16_t strength;
    uint8_t ack;
    uint16_t time
    uint8_t sendSecurityMode;
    uint8_t receiveSecurityMode;
```

```
}TOS_Msg;
```

(2) MultihopMsg

多跳路由消息 **MultihopMsg** 是为实现多跳路由功能而设置的消息, 对应于传感器网络网络层所使用的数据报。它包括源地址、发起地址、顺序号、跳数以及应用载荷等。**MultihopMsg** 消息是封装在 **TOS_Msg** 消息的载荷字段当中, 而 **MultihopMsg** 自己的载荷则只有最大 22 个字节, 它可以直接而向应用程序, 提供用户所需要的数据。**MultihopMsg** 消息的格式如下所示。

```
typedef struct MultihopMsg
{
    uint16_t sourceaID;
    uint16_t destinationID;
    int16_t Sseqno;
    int16_t Dseqno;
    uint8_t hopcount;
    uint8_t data[(TOSH_DATA_LENGTH_7)];
}__attribute__((packed)) TOS_MHopMsg;
```

(3) AppMsg

AppMsg 消息是应用程序所使用的数据结构。用户可以根据需要自行设定所需要的数据。**EMRA** 算法只设定了路径能量因数, 决定性能量, 节点关联列表三个有效数据。如果需要, 还可以加上时间等其他字段。**Appmsg** 的格式如下:

```
typedef struct Appmsg
{
    uint8_t EF(Pathm);
    uint8_t DE(Pathm);
    uint16_t NodeJoint;
}
```

5.3.3 数据分组的接收和发送

EMRA 算法需要转发数据包时, 首先根据路由表得到本节点的下一跳节点信息, 然后更新数据分组的相应字段, 再发送到下层的无线通信模块进行 **AM** 消息层和比特流层的数据包的发送。在 **AM** 层和比特流层进行数据分组处理时, 常用到 **TinyOS** 系统中的 **send**, **intercept**, **receiver** 接口把一个数据包从低层推进到多跳网络中。数据包发送顺序如图 5-3 所示。

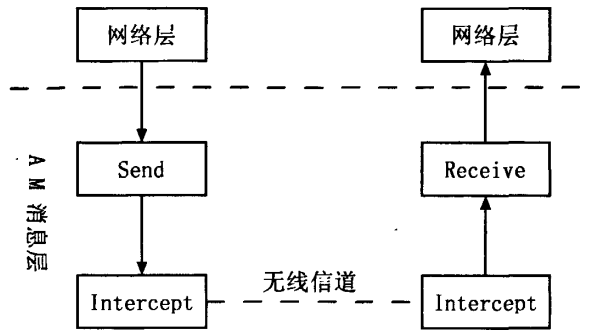


图 5.3 数据包发送图

(1)要想使用 TinyOS 系统中的 Send 接口必须实现此接口的命令，send 命令为发送数据包，参数 pMsg 为数据缓冲，PayloadLen 为数据长度，下面是 Send 接口的具体实现：

```
command result_t Send.send[uint8_t id](TOS_MsgPtr pMsg, uint16_t PayloadLen)
{
    uint16_t usMHLlength=offsetof (TOS_MHopMsg, data)+PayloadLen;
    if (usMHLlength>TOSH_DATA_LENGTH)    //取得用户最大的数据长度，
        如果大于 TinyOS 定义的数据长度，就说明发送失败
    {
        return FAIL;
    }
    call RouteSelect. initializeFields(pMsg, id)
        //通过 PMsg 和 id 号来初始化路由表字段
    if (call RouteSelect. selectRoute(pMsg, id)!=SUCCESS)
        //如果选择路由不成功，则发送失败
    {
        return FAIL;
    }
    if (call SendMsg.send [id] (pMsg->addr, usMHLlength, pMsg) !=SUCCESS)
        //如果 AM 消息层发送失败，则发送数据失败
    {
        return FAIL;
    }
    return SUCCESS;
}
```

(2)在发送数据包之前要先把数据发送到缓冲区，我们通过发送接口的 `getBuffer` 方法来获取缓冲区的数据包。

```
command void *Send.getBuffer[uint8_t id](TOS_MsgPtr pMsg, uint6_t*length)
{ //设备发送数据包缓冲区
  TOS_MHopMsg *pMHMsg=(TOS_MHopMsg*) pMsg->data;
  *length=TOSH_DATA_LENGTH - offsetof(, data);
  return (&pMHMsg->data[0]);
}
```

(3)要想使用 TinyOS 系统中的 `receive` 接口必须实现此接口的命令，我们通过 AM 消息层 `ReceiveMsg.receive` 接收数据包，返回的是向前推进队列的更新值，具体实现如下：

```
event TOS_MsgPtr ReceiveMsg.receive[uint8_t id](TOS_MsgPtr pMsg)
{
  TOS_MHopMsg *pMHMsg=(TOS_MHopMsg*) pMsg->data;
  uint6_t PayloadLen=pMsg->length - offsetof(TOS_MHopMsg, data);
  #if 0
    dbg(DBG_ROUTE, "MHop : Msg Rcvd, src 0x%02x, org 0x%02x,
    pMHMsg->sourceaddr, pMHMsg->originaddr,0/*pMHMsg->parentaddr*/);
    //设置数据包的源地址，和目的地址
  #endif
  //如果目的节点地址是本地地址，就进行截断。否则就进行侦听
  if (pMsg->addr ==TOS_LOCAL_ADDRESS)
  {
    If ((signal Intercept.intercept [id] (pMsg, &pMHMsg->data[0],PayloadLen))
      ==SUCCESS)
    {
      pMsg=mForward (pMsg, id)
    }
    Else
    {
      signal Snoop.intercept [id] (pMsg, &pMHMsg->data [0], PayloadLen);
    }
    return pMsg;
  }
}
```

5.3.4 仿真程序运行

采用 nesC 语言设计本文路由算法，并在 TOSSIM 中进行了仿真：

1. 在路由协议程序目录下运行命令：`make pc`，将程序代码编译成可以在 PC 端仿真工具 TOSSIM 上运行的二进制格式，生成可执行文件 `main.exe`。
2. 通过 `gdb` 调试程序，使用命令：`gdb build/pc/main.exe`，将程序的调试结果显示出来。
3. 使用 TinyViz 命令：`tinyviz -run build/pc/main.exe -num`，跟踪程序的运行，显示程序运行过程中节点间的通信以及节点的输出信息。
4. 利用命令：`o file-name`，将仿真结果输出到某个文件中，以便数据分析。
5. 统计数据，利用 Matlab 做出结果分析图。

通过仿真测试，可以完成以下的功能：1.节点能够在网络结构布置初期建立起平面拓扑结构；2.在仿真过程中，能够对当前事件进行响应，并触发相应事件。

5.4 EMRA 算法仿真

本文的实验在 TinyOS 提供的仿真平台 TOSSIM 上进行。TOSSIM 在 5.1 节已经给予了较为详细的介绍。从前面可以知道，EMRA 是基于 MLMRA 算法的改进。所以实验中我们只对 EMRA 进行了仿真。仿真的主要目的是评价我们提出的 EMRA 算法的性能，同时在相同的仿真场景下与其他的多路径路由算法 AOMDV^[14]，DD^[4]，MPD^[48]进行比较。

5.4.1 仿真配置

下面给出实验的基本假设：

图 5.4 为 TOSSIM 中仿真实验节点分布。所有节点都配置在一个固定区域中，基站位于区域中央。本文选择在 200×200 的矩形区域中随机布置 100 个节点，节点具有相同的发射功率和感知半径。每个传感器节点初始能量 EA 为 200000 点，节点发送、接收一次数据包消耗能量 5 点，每次数据采集和处理消耗能量 1 点。

在实验中为每个节点引入了一个大小在 $(200,200)$ 内的虚拟坐标，前面已经说过，在实际的网络应用中，EMRA 算法是不需要节点的坐标的，这里为节点引入坐标是因为：TOSSIM 需要利用坐标来形成无线发送消息的拓扑，如果没有这个坐标，则在仿真中一个节点发送的消息，其它节点都能收到，这是不符合实际

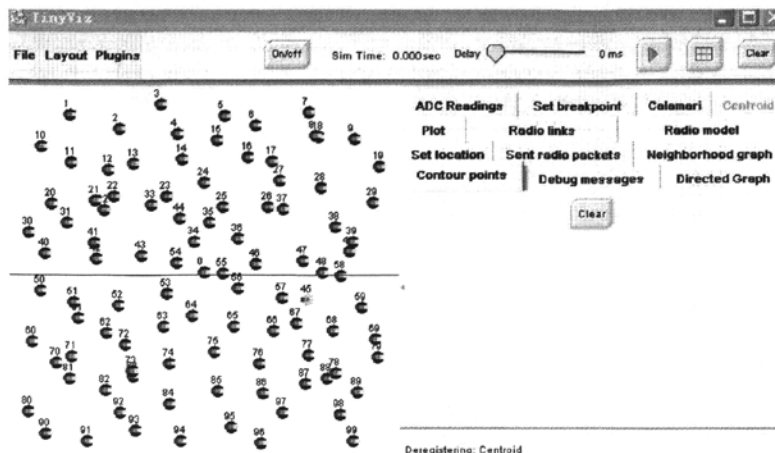


图 5.4 TOSSIM 中仿真实验节点分布

情况的, 引入这个坐标后, TOSSIM 根据节点间的距离和感知半径之间的关系来决定一个节点发送的消息能否被其它节点收到。每个节点信息定义如下

```

Typedef nx_struct node info
{
    nx_uint8_t  TOS_NODE_ID;    //标识节点的ID 号
    nx_uint8_t  energy initial   //标识节点的初始能量
    nx_uint8_t  energy available //标识节点的可用能量
    nx_uint8_t  location x;      //标识节点的x 轴坐标
    nx_uint8_t  location y;      //标识节点的y 轴坐标
}

sensor node;
sensor node base station;
sensor node source node;
sensor node node[SENSOR_NODE_NUM];

```

5.4.2 参数选择

无线传感器网络是通过其网络中的有效传感器节点执行环境监测与数据采集等任务, 而一个传感器节点的有效性, 主要取决于节点的活动性 (即能否监测采集数据) 以及与网络中其它节点的连通性 (即能否发送、转发监测数据至汇聚节点)。随着网络运行时间的增加, 传感器节点由于能量耗尽或连通性等原因由有效节点变为失效节点, 当网络中有效节点的数量占全部节点的比例低于某一百分比时, 则认为传感器网络的生存时间已经结束。

由于目前尚没有针对无线传感器网络中路由协议的统一的衡量标准,根据文献[9, 13]中对传感器网络路由协议性能的测量方法,本节我们对 EMRA 算法以及 AOMDV 算法^[36], DD 算法^[4], MPD^[48]算法进行能量有效性和传输可靠性的验证,主要在网络生存时间、分组平均投递率两个方面上进行比较分析。

(一) 网络生存时间

该性能评测标准主要衡量不同算法下,网络生存时间的变化趋势,是体现路由协议是否符合能量有效性要求的重要指标,主要包括节点存活个数百分比和平均剩余能量两个方面。

- ◆ 网络节点存活率: 这个标准用来比较算法保护剩余能量少的节点避免过早枯竭的能力。仿真过程中,将剩余能量值低于接收一次数据包所需要消耗的能量的节点定义为死亡节点。该标准反映某一时刻网络中节点存活的情况,也用于反映网络生存时间的长短。
- ◆ 节点平均剩余能量值: 这个标准表明网络中每个节点平均消耗能量的情况,用于反映网络各节点平均拥有能量的情况,从一个侧面反映网络生存时间的长短。

(二) 分组平均投递率

分组平均投递率定义为,网络仿真过程中,汇聚节点成功接收的应用层数据分组数目与源节点应用层发送的分组数目之比,是反映数据传输可靠性的主要衡量指标。使用公式(5.1)计算。分组平均投递率越大,说明传送过程中丢失的包就越少,网络性能越好。

$$\text{分组平均投递率} = \text{成功接收分组数} / \text{发送分组数} \quad (5.1)$$

5.4.3 仿真结果与性能分析

(一)网络生存时间

网络的生存时间即网络的有效生存时间,是网络实用价值的体现,这一衡量指标一定程度上反映了网络能耗问题的直接效果,即它与网络的全网能耗指标具有相同的意义。

(1)网络节点存活率

网络节点存活率可定义为三种形式:第一个节点死亡(First Node Died)、一半节点死亡(Half Node Died),全部节点死亡(Last Node Died)。节点死亡时间在一定程度上反映了网络中的能耗均衡性,各个算法在比较过程中,如果第一节点死亡时间较短,说明无线传感器网络在收集数据通信的过程中过多的使用某个或某几个传感器节点进行数据的中继传输,即出现了网络中某一区域或某一链路很快

灼烧殆尽；如果第一节点死亡时间相对较长，说明数据提交过程中的能量消耗较均衡的分布在网络中的更多的节点上，一定程度上增加了网络的生存性和有效性。

图 5.5 为 EMRA 算法和 AOMDV 协议、DD 协议、MPD 协议的网络生存时间比较。图中纵坐标是网络中生存节点的数目，横坐标是完成数据传输的轮数。网络初始化后节点定期发送数据，当一个节点能量耗尽就退出网络，仿真运行直到所有节点全部死亡。

从该图中可以看出，在网络运行初期，四种算法的网络节点存活百分比没有差别，但是随着网络运行时间的增加，这方面的差别出现并逐渐明显。AOMDV、DD 和 MPD 分别在第 135、140、138 开始出现节点死亡，而 EMRA 在 148 周期才开始出现节点死亡；EMRA 一半节点死亡的时间则是 AOMDV 的 1.20 倍，DD 的 1.08 倍，MPD 的 1.12 倍；全部节点的死亡时间是 AOMDV 的 1.31 倍，DD 的 1.09 倍，MPD 的 1.18 倍。可以看出，EMRA 明显延长了网络的生存时间。

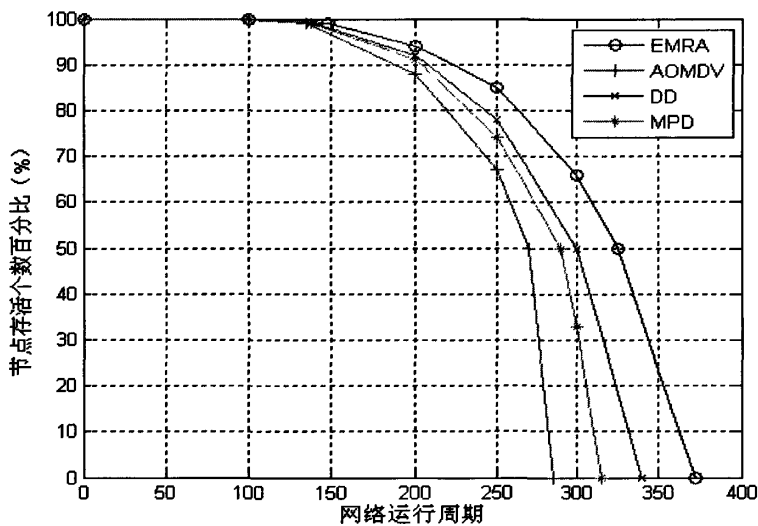


图 5.5 节点存活个数对比曲线

(2) 节点平均剩余能量

图 5.6 为四种路由算法的节点平均剩余能量的仿真比较。图中纵坐标是节点平均剩余能量，横坐标是网络运行周期数。如该图所示，在网络运行初期 150 个周期之前，四种算法在节点平均剩余能量方面的表现没有明显区别，但是随着网络运行时间的增加这方面的表现区别逐渐明显。从网络运行的整个时期来看，EMRA 算法平均剩余能量变化较另外三种算法相对平缓，这表明 EMRA 具有较高的能量有效性，更能节省能量损耗，并使能量的损耗更加均匀的分布到所有节

点中。因此从节点平均剩余能量的角度进一步验证了运行 EMRA 算法的网络能够获得较长的网络生存时间。

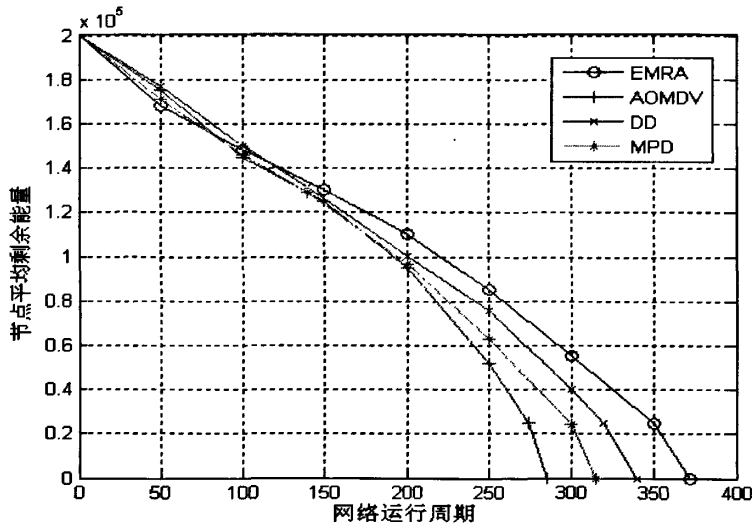


图 5.6 节点平均剩余能量对比曲线

(二) 分组平均投递率

该仿真中，主要是衡量不同算法下，汇聚节点成功接收的数据分组数目与源节点发送的分组数目之比，反映了数据传输的可靠性。图 5.7 是分组平均投递率随时间变化曲线，图中纵坐标是分组平均投递率，横坐标是完成网络运行的周期数。在相同的实验环境下，四种算法的分组平均投递率并不相同，从网络运行的整个时期来看，EMRA 算法获得了较优的结果，体现出了较高的传输可靠性。

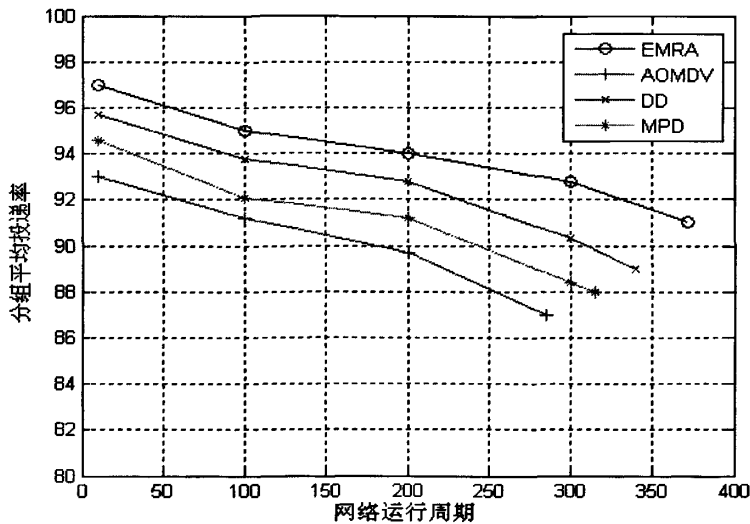


图 5.7 分组平均投递率对比曲线

优化数据传输路径、提高节点能量的使用效率，延长网络的生存时间是无线传感器网络路由协议设计的主要目标。从仿真结果可以看出，EMRA 算法具有较高的数据传输可靠性，较好的能量使用效率和能量使用均衡性，有效延长了整个网络的生存时间。

5.5 小结

本章借助仿真工具——TOSSIM 对本文所提出的 EMRA 算法进行了仿真，主要测试了能量有效性和传输可靠性两个方面，具体包括了两种性能评测标准：网络生存时间、分组平均投递率。仿真结果显示本文提出的路由算法是可行的，尽管增加了多路径的建立延时，但相对于该方法在提高能量有效性以及路径传输可靠性方面所表现出的有效性是值得的。通过分析比较，在能量有效性和传输可靠性两个方面，本文提出的算法都具有较优的性能表现，符合无线传感器网络能量有效、路径可靠的数据传输路由的要求。

第六章 总结与展望

6.1 总结

无线传感器网络作为一项新兴的信息采集技术日益得到国内外重视,由于无线传感器网络能量受限,均衡网络节点的能量消耗以延长网络生存时间已经成为普遍共识与关注重点,另外,无线传感器网络有很多应用都有不同程度可靠性要求,为使网络可用,必须研究无线传感器网络中的数据传输可靠性问题。因此设计能量消耗低又能可靠传输的无线传感器网络协议,对于节省成本有效完成信息采集任务具有非常重要的意义。本文的具体工作主要体现在:

第一,深入研究无线传感器网络区别于传统有线网络和其它无线网络的一些特点,分析了传感器网络路由算法设计的目标。对现有的一些传感器网络路由算法进行了分析,总结了它们的优缺点,为设计性能更好的路由算法奠定基础。

第二,从多路径路由算法能够较好地提高传感器网络中数据传输的可靠性的角度考虑,针对多路径路由的稳定性进行了分析。在借鉴AOMDV路由算法思想的基础上,提出一种最大链路不相关的多路径路由算法MLMRA,该算法在建立链路不相关的多路径路由时,能够优先建立节点不相关的多路径,降低了多路径之间的关联性,当路径发生中断时减小了路径连锁中断的概率,提高了路径的稳定性和数据传输的可靠性。

第三,为了提高能量使用效率,延长传感器网络的生存时间,对MLMRA算法的能量均衡方面存在的缺点进行了改进,提出了能量感知的多路径算法EMRA。该算法在选择主路径时,把路径上节点的剩余能量和中间跳数作为路径选择的度量之一,同时尽量避开处于低能量水平的节点,达到了均衡网络能量消耗和延长网络生存时间的目的。当主路径发生断裂,源节点选择次优路径时能够优先选择与主路径不相关的或者共用节点数目最少的路径作为新的数据传输路径,增强了网络的容错能力。

第四,在仿真平台TOSSIM中仿真本文提出的多路径路由算法EMRA。从数据传输的可靠性和能量有效性两个角度,网络生存时间、分组平均投递率两个方面对本文提出的算法与现有的多路径路由算法进行了比较,验证了本文提出的多路径路由算法的具有较高的数据传输可靠性和能量有效性。

6.2 展望

能量感知的无线传感器网络多路径路由算法在本文中已经进行了详细的论述,并通过仿真实验对其进行了相关验证,在本文研究工作的基础上,还可以从以下几个方面对此系统做出一些探索:

■ 安全可靠的节能路由策略

由于无线传感器网络自身的特点和应用环境使用的无线链路是不可靠的,且安全性低;同时为了提高可靠性和安全性,必须要消耗掉额外的能量。从这个意义上说,安全可靠和节能是一对矛盾关系,在未来的路由策略制定中,必须要很好地平衡这一对矛盾,尽可能地根据网络具体的实现应用环境,制定不同的安全可靠等级的节能策略。

■ 与网络传统性能的综合考虑

节能的最终目的同样是为了提高网络的性能,但从现有提供的策略来看,为了达到节能往往要牺牲一部分的网络传统性能,如延时等。虽然从现在的研究情况分析,延时与能耗是一对矛盾体,但是随着研究的继续深入一定可以找到平衡两者关系的方法。

参考文献

- [1] M. Weiser. The computer for the 21st century. Scientific American, 1991, 265(3):94-104.
- [2] 郑增威, 吴朝晖. 普适计算综述. 计算机科学, 重庆, 2003, 30(4):18-22, 29.
- [3] Kulik J, Heinzelman W R, Balakrishnan H. Negotiation-based Protocols for disseminating information in wireless sensor networks In: Wireless Networks, 2002,(8): 169-185.
- [4] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed Diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks In: Proceedings of the ACM MobiCom'00, Boston, MA, 2000. 56-67.
- [5] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks In: IEEE Transaction on Wireless Communications, 2002, (10):660-670.
- [6] Manjeshwar A, Agrawal DP. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001. 2009-2015.
- [7] A. Manjeshwar and D. P. Agarwal, APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks In: Parallel and Distributed Processing Symposium, Proceedings International, IPDPS 2002, 195-202.
- [8] S. Lindsey, C.S. Raghavendra, PEGASIS: power efficient gathering in sensor information systems, In: Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2002. 1125-1130.
- [9] Shijin Dai, Xiaorong Jing, Lemin Li. Research and Analysis on Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. IEEE. 2005. 0-7803-9015-6/05:407-412.
- [10] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. IEEE Communications Magazine. 2002. 40(8):102-114.
- [11] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. 软件学报. 2003, 14(7):1282-1291.
- [12] Ning Xu. A Survey of Sensor Network Applications. <http://enl.use.edu/-ningxu/papers/survey.pdf>
- [13] Lob K., Long H., Pan Y. An Efficient and Reliable Routing Protocol for Wireless Sensor Networks.[C] //Proceedings of ACC'05. IEEE Communication Society Press, 2005, Vol. 02. 12-516.
- [14] M K Marina, S R Das. On-Demand Multi-path Distance Vector Routing in Ad Hoc Networks [A]. Proc of the Int'l Conf for Network Protocols (ICNP) [C]. 2001. 14-23.

- [15] Deepak Ganesan, Ramesh Govindan, Scott Shenker, Deborah Estrin. Highly-Resilient, Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks. *Mobile Computing and Communications Review*. 2002. Vol.1. Number 2.
- [16] De S, Qiao C, Wu H. Meshed multipath routing: An efficient strategy in sensor networks. *Wireless Communications and Networking (WCNC 2003)*. IEEE. Vol 3:16-20.
- [17] Rahul C, Jan M. Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks. *IEEE. WCNC2002*.:1-6.
- [18] Ning Xu et al. A Wireless Sensor Network for Structural Monitoring. *ACM SenSys*. 2004.
- [19] J.-H. Chang and L. Tassiulas. "Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks" *Advanced Telecommunications and Information. Distribution Research Program (ATIRP2000)*, College Park, MD, Mar. 2000.
- [20] S. Dulman, T. Nieberg, J. Wu, P. Havinga, "Trade-Off between Traffic Overhead and Reliability in Multipath Routing for Wireless Sensor Networks", *WCNC Workshop*, New Orleans, Louisiana, USA, March 2003.
- [21] 孙利民等著. 无线传感器网络. 北京: 清华大学出版社, 2005
- [22] Pister K, Hohlt B, Jeong J, Doherty L, Vainio J P. Ivy. A sensor network infrastructure. 2003. <http://www.bsac.eecs.berkeley.edu/projects/ivy>.
- [23] Shijin Dai, Xiaorong Jing, Lemin Li. Research and Analysis on Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. *IEEE*. 2005. 0-7803-9015-6/05:407-412.
- [24] Sameer Tilak, Nael B, Abu-Ghazaleh and Wendi Heinzelman. A Taxonomy of Wireless Micro-Sensor Network Models. *ACM Mobile Computing and Communications Review (MC2R)*, 6(2), 2002: 1-8.
- [25] R.A. Batteries for low power electronics. *Proceedings of the IEEE*, Volume:83, Issue: 4, 1995 687~693.
- [26] Jamal N. Al-Karaki Ahmed E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey", *IEEE Personal Communications*, Vol. 11, Issue: 6 pp. 6- 28, Dec. 2004.
- [27] 沈波, 张世永, 钟亦平. 无线传感器网络分簇路由协议. *Journal of Software*. Vol 17.No.7. July 2006:1588-1600.
- [28] Jamil Ibric, Imad Mahgoub. Cluster-Based Routing in Wireless Sensor Networks: Issues and Challenges. *SPECTS'04*. 1-56555-284-9:759-767
- [29] Jamil Ibric, Imad Mahgoub. Cluster-Based Routing in Wireless Sensor Networks: Issues and Challenges. *SPECTS'04*. 1-56555-284-9:759-767.
- [30] Kay Romer, Friedeman Mattern. The Design Space of Wireless Sensor Networks. *IEEE Wireless Communications*. December 2004.

- [31] Holger Karl, Andreas Willig 著, 邱天爽等译. 无线传感器网络协议与体系结构. 电子工业出版社. 2007 年 1 月.
- [32] Chee-Yee Chong, Srikanta P. Kumar. Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges .Proceedings of the IEEE, vol. 91, NO.8, Aug.2003.
- [33] S. Hedetniemi, A. Liestman. A Survey of Gossiping and broadcasting in Communication Networks. IEEE Network, vol. 18, No.4, 1988, pp.319-349
- [34] Yu Y, Estrin D, Govindan R. Geographical and energy aware routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks[R], UCLA Computer Science Department Technical Report, 2001.
- [35] Stephen Mueller, Rose P. Tsang, Dipak Ghosal. "Multipath Routing in Mobile Ad Hoc Networks: Issues and Challenges". 2004.
- [36] Asis Nasipuri, Robert Castaneda, Samir R. Das, "Performance of Multipath Routing for On-Demand Protocol in Mobile Ad Hoc Networks". Mobile Networks and Applications, 2001, 6(4), pp.339-349
- [37] Dashy S., Bandar S., Brown T.X. An on-demand minimum energy routing protocol for a wireless ad hoc network. ACM Mobile Computing and Communication 2002, 6(3): 50-66.
- [38] Singh S. , Proc. Woo M., Raghavendra C.S. Power-aware Routing in ad hoc mobile networks. MobiCom'98. ACM/IEEE: 181 — 190.
- [39] Toh C.K. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks. IEEE Communication, 2001, 39: 138-147.
- [40] Opnet. <http://www.opnet.com>.
- [41] QualNet. <http://www.scalable-networks.com/>.
- [42] OMNET++. <http://www.omnetpp.org/index.php>.
- [43] NS-2. <http://www.isi.edu/nsnam/dist/>.
- [44] Glomosim. <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>.
- [45] Philip Levis, Nelson Lee, Matt Welsh, David Culler Philip Levis TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications. SenSys'03, Los Angeles, California, USA. November 5-7. ACM 1-58113-707-9/03.
- [46] TOSSIM. <http://www.tinyos.net>.
- [47] Philip Levis. TinyOS Programming. June 28, 2006.
- [48] Ren Xiuli, Yu Haibin. A Novel Multipath Disjoint Routing to Support Ad Hoc Wireless Sensor Networks[c]. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society. 2006. Pages: 174-179

致 谢

值此论文完成之际，我要衷心感谢所有关心、支持和帮助过我的老师和朋友们！

首先要向我的导师张建明教授表达最真挚的敬意和最诚挚的感谢。感谢张老师在学术上的耐心指导，生活上的细心关怀，为人处事上的淳淳教诲。张老师广博的学识、敏锐的洞察力、执着的敬业精神给我留下永生难忘的印象，严谨求实、以身作则、开放合作的工作态度和谦逊和蔼、不拘小节、宽容豁达的人格魅力永远是我学习的楷模。

感谢詹永照教授。作为一名计算机科学领域的专家，詹老师对科学研究忘我和执著的追求、严谨的治学态度、敏锐的学术洞察力、缜密的组织能力和高尚正直的人格，对我的成长产生很大的影响。

感谢王良民副教授。王老师对课题研究具有独到的见解，对我的研究课题提出了很多启发性的建议，能够在网络课题组学习和生活，让我感到非常荣幸和自豪。同时，还要感谢网络课题组的所有老师及组员们，感谢他们对我的指导和帮助。

永远怀念与 417 实验室的全体兄弟姐妹相处的日子。感谢张沛、牛险峰，周玲玲、缪少军、杨丽瑞、陈君、江长勇、刘霄、杨忠、许博文、樊莉静、房芳、段丽、张晓翠，杨锋清、张灵增、汪大庆等，感谢他们在学习和生活上对我的帮助和支持。

借此机会，还要感谢我的家人，感谢他们对我的理解和支持，他们对我无私的关爱与鼓励是我鼓起勇气克服困难，继续向前的源泉。

最后，感谢培育我的江苏大学，感谢计算机学院的所有老师们！

硕士期间发表的论文

在攻读硕士学位期间，作者发表论文如下：

1. 胡耀锋，张建明，王新胜，王良民. 能量感知的无线传感器网络多路径路由协议研究. 《计算机工程与设计》. 2009,10