

三峡大学

硕士学位论文

无线传感器网络多路径路由技术研究

姓名：朱鹏飞

申请学位级别：硕士

专业：计算机应用技术

指导教师：蒋廷耀

20080401

## 内 容 摘 要

无线传感器网络是由大量的价格低廉的传感器节点组成,这些传感器节点组织形成多跳无线网络,协作地完成大规模传感任务。作为一种新型的网络和计算技术,它可以将客观世界中不断变化的信息持续高效地传递给人们,为人们提供各种形式的数据与服务,通过这种方式将逻辑上的信息世界与客观上物理世界融合起来,改变了人与自然的交互方式。传感器网络已经有着非常广泛的应用前景,引起人们的普遍关注。

作为一种新型的网络:大规模的网络部署,自组织的组网方式,能量有限的传感器节点,动态变化的无线信道以及各种类型的流量模型和数据收集方式是这种网络的固有特性,这些特性在实现网络功能的同时,也会影响到网络的整体性能。在大规模部署的传感器网络中,如何设计专用的算法和协议来更好地节省能量,保证数据传输的可靠性,提高网络整体性能已经成为研究的热点问题。本文围绕这一主题,在一些与节能和提高数据传输的可靠性密切相关的算法和协议上展开研究。

论文在分析传统 WSN 的路由机制以及相应算法基础上,进一步论证了在无线传感器网络中采用多路径进行数据传输比采用单路径进行数据传输的优势,总结分析了 WSN 研究过程中所采用的节能措施,在分析无线传感器网络多路径路由协议的基础上,采用遗传算法对无线传感器网络多路径路由进行优化。在算法设计过程中,通过引入两级阈值实现对节点剩余能量进行评估,而后以评估的结果为基准通过适应函数的设计与计算实现新种群的择取,从而实现多路径优化,使得传输路径上具有较多能量的节点得到更为充分的利用。此算法在保证网络能量均衡消耗的同时,也延长了网络生命周期,同时在部分程度上保护网络的骨干节点。

在接下来的章节我们提出基于容载检测的可靠多路径路由,通过在无线传感器网络中引入容载检测因子实现对节点负载进行感知,而后进行相应的处理,对于负载较重的节点的数据传输量进行分流,降低在数据传输过程中的数据丢包率。文章在实现对算法思想的阐释及设计后,通过实验的手段对算法的有效性进行验证。

**关键词:** 无线传感器网络 路由 多路径 遗传算法 可靠性

## **Abstract**

Wireless sensor networks normally consist of a larger number of inexpensive wireless sensor nodes that organize themselves into a multi-hop wireless network. These nodes cooperate with each other to accomplish sense task. Being one kind of new network and computation technology, it can transfer the immediately changeable data from the out world to people effectively, as the result of which supply human with many kinds of data and service. Consequently, it generally accepted that it is the WSN that change the method of communication between human being and nature. Through the usage of WSN, people can get the detail data of the observed objects and sense the change of nature and then make the final decision. The attracting foreground of WSN makes it being paid increasing attention from all fields of human-life.

But this new kind of network has many new special characters, such as large scale, self-organized, nodes with limited energy and so on. And these features make many research achievements of MANET not be applied to the use of this network. Besides, these features mentioned above can affect the whole function of WSN. Therefore, a growing number of abstract institutions and research fellows show great interest in these difficulties and manage to resolve them, which makes the research of WSN become a hotspot. One case in point is how to design routing protocols to low the energy-consuming, better the reliability of data transmission and improve the whole performance of WSN. This paper focuses on this topic and makes a further research on the routing protocol.

The thesis firstly analyses the current routing protocols and concerned algorithms, then statements the advantages of adopting multi-path to transfer data over single-path to do. Secondly , we summarize the general taken measures to reduce energy-consuming. Based on the work of research on multi-path routing, we refer to the optimization of multi-path in WSN with the GA. In the algorithm, we introduce two limited value to check the energy-consuming condition of node, which is used as the key factor to select the most optimal paths. This measure can balance the load the whole network and prolong network's life.

In the oncoming chapter, we refer to reliable multi-path routing based on load-checked (RMR/LC). The introduction of load-check factor can effectively check the load of intermediate nodes and then make relevant process. When one node receives more expected data packets, other nodes help to balance the data. In this way, we assure lower

packet loss probability. In the thesis, we firstly expand on the idea of RMR/LC, and then detail this process. Finally, we check the validity of the algorithm.

**Key words:** wireless sensor network   routing   multi-path   GA   reliability

## 三峡大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。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后果由本人承担。

学位论文作者签名：\_\_\_\_\_

日 期：\_\_\_\_\_

## 引 言

无线传感器网络是由大量的价格低廉的传感器节点组成,这些传感器节点组织形成多跳无线网络,协作地完成大规模传感任务。作为一种新型的网络和计算技术,它可以将客观世界中不断变化的信息持续高效地传递给人们,为人们提供各种形式的数据与服务。因此有人说过:Internet 构成逻辑上的信息世界,改变了人与人之间的沟通方式,而无线传感器网络则将逻辑上的信息世界与客观上物理世界融合起来,改变了人与自然的交互方式。人们可以通过无线传感器网络直接感知客观世界,从而极大地扩展了现有网络的功能和人类认识世界的能力。当前,传感器网络已经有着非常广泛的应用前景,引起人们的普遍关注。

# 1 绪论

## 1.1 无线传感器网络概述

微电子技术、计算技术和无线通信等技术的进步，推动了低功耗多功能传感器的快速发展，使其在微小体积内能够集成信息采集、数据处理和无线通信等多种功能。无线传感器网络就是由这些廉价低功耗多功能的微型传感器组成，通过飞机播撒、炮弹发射等手段将它们部署在监测区内，它们利用无线通信的方式形成一个多跳自组织的网络系统，从而实现协作地感知、采集和处理网络覆盖的地理区域中感知对象的信息，并发送给观察者<sup>[1]</sup>。人类通过无线传感器网络可以直接感知客观世界，从而极大地扩展了现有网络的功能和人类认识世界的能力。美国商业杂志和 MIT 技术评论在预测未来技术发展的报告中，分别将无线传感器网络列为 21 世纪最有影响的 21 项技术和改变世界的 10 大技术之一。

### 1.1.1 无线传感器网络的组成

一个完整的无线传感器网络体系包含分布式传感器节点（群）、汇聚节点、互联网和用户界面等部分<sup>[2]</sup>。无线传感器网络的工作原理如下：传感器节点（群）通过数据采集模块采集环境数据，而后传感器节点按照传感器网络路由协议，把采集数据通过数据转发模块发送到 Sink 节点，Sink 节点通过卫星或信息收发基站与 Internet 连接到 PC 机上，或者 Sink 节点直接与 PC 机连接，完成数据的采集、处理及分析；下面是无线传感器网络工作的示意图：

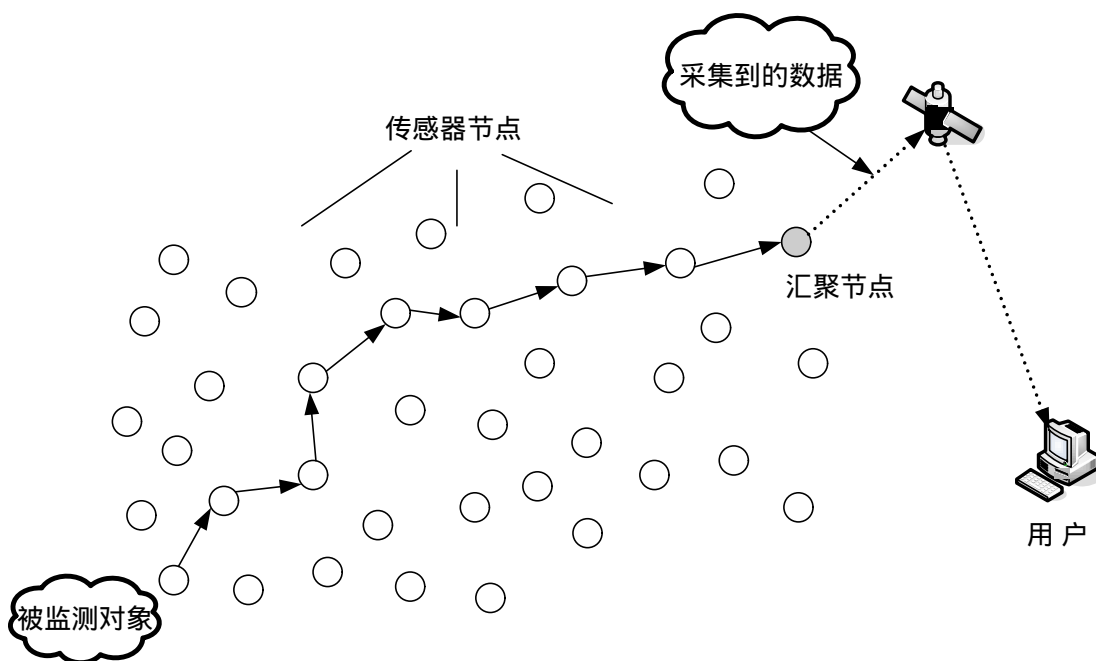


图1.1 无线传感器网络工作示意图

无线传感器由传感器节点、汇聚节点、感知对象及观察者组成；传感器节点主要完成数据的采集、融合，并负责将数据传送到观察者；它主要由四大模块组成：传感

器模块、处理器模块、无线通信模块及能量供应模块。传感器模块由传感器和模数转化功能模块组成，负责监测区域内信息的采集和数据转换；处理器模块由嵌入式系统构成，包括CPU、存储器、嵌入式操作系统等，负责控制整个节点的操作，存储和处理本身采集的数据以及其他节点发来的数据；无线通信模块主要完成节点之间的通信；能量供应模块为传感器节点提供运行所需的能量，通常采用微电池。此外，可以选择的其它功能单元包括：定位系统、移动系统以及电源自供电系统等。这些单元使传感器节点拥有自己的数据处理能力，能够采集数据并且按照网络路由协议把数据顺利发送给Sink节点，完成网络采集任务。图1.2是传感器节点的结构示意图：

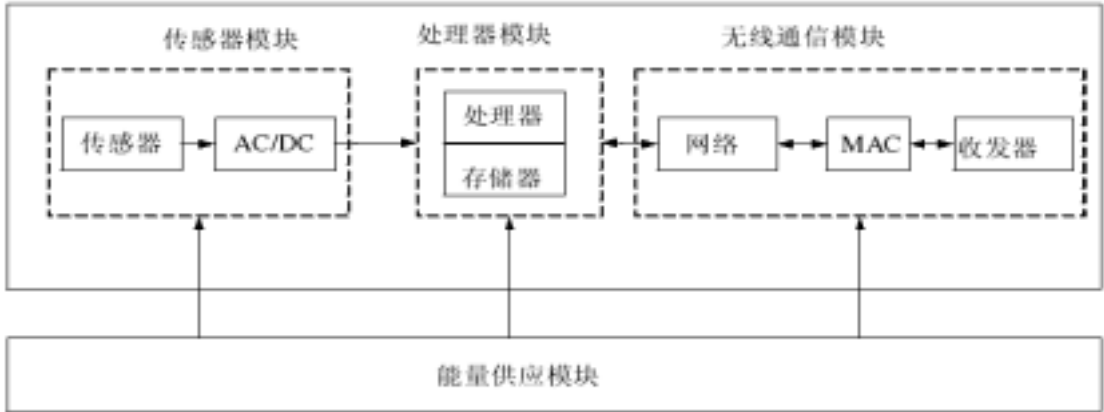


图1.2 传感器节点结构示意图

汇聚节点拥有较多能量且拥有较大信息发送能力，能直接与卫星或信息收发基站通讯，它通过卫星或信息收发基站与Internet网络连接实现将数据，最终将数据传输到PC机上，在某些情况下汇聚节点也可以直接与PC机连接。

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

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

### 1.1.2 无线传感器网络的发展历史及研究现状

无线传感器网络是在传感器网络的基础上发展而来：上世纪70年代，出现了第一代传感器网络雏形，它通过采用点对点传输，用传感控制器把传统传感器组成网络；



随着相关学科的不断发展和进步，尤其是网络通信技术和传感器技术的发展和进步，传感器节点具有了处理多种信号的综合能力以及处理计算能力，通过与传感控制器相连，形成了具有较强的信息综合和处理能力的传感器网络，这便是第二代传感器网络；到了上世纪末，现场总线技术在传感器网络中的应用使得传感器网络逐渐向智能化方向发展；同时，大量多功能传感器被运用于传感器网络，且通过无线技术进行连接，无线传感器网络应运而生。

无线传感器网络的应用研究最早起源于军事领域，在现代军事中仍然有着广泛的应用。使用方通过飞机撒布或特种炮弹发射等手段<sup>[3,4,5]</sup>，把传感器网络节点大量部署在人员不便于到达的观察区域（如敌方阵地内），实现对被监测对象在任意时间和地点数据的采集、处理和分析。在环境监测领域方面，无线传感器网络一般具有部署简单、便宜、长期不需更换电池、无需派人现场维护等优点。通过密集的节点布置，可以观察到微观的环境因素，为环境研究和环境监测提供了崭新的途径<sup>[6]</sup>。传感器网络研究在环境监测领域已经有很多的实例，其中包括：对海岛鸟类生活规律的观测，气象现象的观测和天气预报，森林火警，生物群落的微观观测等<sup>[7]</sup>。在城市建筑及管理方面，各种传感器节点可以灵活方便地布置于建筑物内，获取室内环境参数，从而为居室环境控制和危险报警提供依据。在反恐和公共安全方面，通过特殊用途的传感器，特别是生物化学传感器监测有害物、危险物的信息，最大限度地减少其对人民群众生命安全造成的伤害。

传感器网络的广泛应用使得传感器网络为信息感知和采集带来了一场革命，它作为一个全新的研究领域，在基础理论和工程技术两个层面向科技工作者提出了大量的挑战性研究课题。由于传感器网络的巨大应用价值，它已经引起了世界许多国家的军事部门、工业界和学术界的极大关注：美国自然科学基金委员会2003年制定了传感器网络研究计划，投资34 000 000美元，支持相关基础理论的研究；美国国防部和各军事部门都对传感器网络给予了高度重视，在C4ISR的基础上提出了C4KISR计划，强调战场情报的感知能力、信息的综合能力和信息的利用能力，把传感器网络作为一个重要研究领域，设立了一系列的军事传感器网络研究项目；英特尔公司、微软公司等信息工业界巨头也开始了传感器网络方面的工作，纷纷设立或启动相应的行动计划；日本、英国、意大利、巴西等国家也对传感器网络表现出了极大的兴趣，纷纷展开了该领域的研究工作<sup>[8]</sup>。

传感器网络的研究起步于20世纪90年代末期，从2000年起，国际上开始出现一些有关传感器网络研究结果的报道，但是，这些研究成果处于起步阶段，距离实际需求还有一定的距离。我国在传感器网络方面的研究工作起步相对较晚，哈尔滨工业大学和黑龙江大学在该领域的研究相对较早，近些年来，中科院计算研究所也成立了无

线传感器网络研究组,而且在该领域取得了一些成就。目前国内不少科研单位以及很多大学都对无线传感器网络展开了研究,成果频频报导期刊杂志上。

## 1.2 本课题的研究背景

### 1.2.1 无线传感器网络特性

无线传感器网络因其具有极高的应用价值而受到广泛重视,其移动自组形成网络的特性使得科研人员在最初的研究中将其与无线移动自组织网络(Ad-hoc)等同起来,但深入的研究表明这两者并不能划等号。同 Ad-hoc 网络相比,无线传感器网络具有下面的一些特性,使得以前研究很多的 Ad-hoc 成果并不完全适用于无线传感器网络:

#### 1) 节点通信能力有限

传感器网络的传感器节点的通信带宽窄而且经常变化,通信覆盖范围只有几十到几百米;传感器之间的通信断接频繁,经常导致通信失败。同时由于其工作的恶劣自然环境,传感器节点可能会长时间脱离网络。

#### 2) 节点电池能量有限

传感器节点体积微小,通常携带能量十分有限的电池,而且节点的能量一般是不能够再得到有效补充的,这点和 Ad-hoc 网络中的节点能够得到能量补充是不同的。

3) 无线传感器网络是以数据为中心的,该网络旨在收集信息,而 Ad Hoc 网络则倾向于分布式计算和端到端通信。

4) 无线传感器网络的规模比 Ad Hoc 网络大,节点数量可以高出 Ad Hoc 网络节点数量几个数量级,节点布置的密度也要比 Ad Hoc 网大的多。

5) 传感器网络更注重节点之间的协调,单个节点的重要性并不突出,单个节点在整个网络中也不像 Ad Hoc 网络中需要进行唯一地址标识。

6) 传感器节点要比组成 Ad Hoc 网的移动节点廉价,便于大规模布网。

7) 从数据提交和转发的角度考虑,传感器的网络结构一般都较为简单,整个网络数据转发就是一个传感区域到 Sink 节点或基站的数据提交过程,以及由 Sink 节点到传感器区域的数据控制过程,而 Ad Hoc 网络更多的体现在节点之间的互相通信上,数据流并没有传感器网络那么规则。

无线传感器网络的这些特性使得研究人员在研究无线传感器网络路由时,必须另外开发路由协议及 MAC 层协议,满足数据传输的需要。

### 1.2.2 本课题国内外研究现状

在传统无线传感器网络路由协议设计过程中,一般采用从源节点到汇聚节点间的最佳路径来进行数据的传输;这就意味着,在传统路由机制中数据的传输是采用单路径的,多路由机制采用的并不是很多,只有在考虑到数据传输的安全性及网络的残存性时才会考虑到这一路由机制。因为在无线传感器网络中,节点之间的相对位置是动

态变化的,这种动态变化的网络拓扑结构可能使得在前一时刻建立的路径在随后的某一时刻就会失效。出现这种情况后,源节点与目的节点再进行通信或数据传输时就需要重新建立路由,若是要建立多条路径时,路由开销就会变的很大,从而使得本来能量就不很充分的节点需要消耗更多的能量来进行路由的建立。但是另一方面,若源节点和目的节点之间有大量数据需要传输,一味地依靠某一条路径进行数据传输往往造成某些节点的早衰,使得网络上节点的能量消耗悬殊极为严重,最终很有可能会造成网络上的分割或者是该网络快速崩溃。为此,Rahul C. Shal 等人提出了一种能量多路径路由机制<sup>[9]</sup>,该机制在源节点和目的节点之间建立多条路径,根据路径上节点的通信能量消耗以及节点的剩余能量情况,给每条路径赋予一定的选择概率,使得数据传输均衡消耗整个网络的能量;这种路由机制的提出的确可以很好地解决无线传感器网络能量的比较均衡消耗问题,实验证明,它能够在很大程度上延长网络的生命周期;但是由于该机制下路径的选择概率是与该路径上剩余能量最少的节点是相关的,因而也就不能十分有效地利用该路径上的其它传感器节点,更加均衡消耗节点能量。针对多路由机制,国外学者提出了基于不相交路径的路由机制和缠绕多路径的路由机制<sup>[10]</sup>。所谓不相交路径是指从源节点到目的节点之间的任何两条路径都没有相交的节点;而缠绕多路径是指从源节点到目的节点之间的路径上每一跳都存在有冗余路径,这两种多路径路由机制很好地保证了数据传输的可靠性,但是由于出发点是保证数据传输的可靠性,所以它们仍然没有很好解决网络能量的均衡消耗。此外 Deb B 等提出的 ReInForM<sup>[11]</sup>路由机制也存在有同样的问题:一味地考虑数据的可靠性传输,而忽略了网络能量的均衡消耗和有效消耗。

这些问题的提出,客观上都要求在某些无线传感器网络中,一方面要使源节点和目的节点存在有多条路径,保证数据的可靠传输,另一方面对源节点和目的节点之间存在的路径进行一定的优化,使得在路径建立以及数据传输过程中,能量消耗最少及保证能量的均衡消耗。本文的研究试图通过对无线传感器网络多路径路由技术的研究,提出新的路由保护机制来进一步保证数据传输的可靠性,减低数据在传输过程中的丢包率,实现网络负载均衡,降低网络能量的消耗。

### 1.2.3 本课题研究目的及意义

本课题的研究目的在于改变传统仅仅利用WSN多路径路由的特性来保证数据在传输过程的可靠性,提出一种新的路由保护机制来进一步保证数据传输的可靠性,降低数据在传输过程中丢包率,实现网络负载均衡,降低网络能量消耗。

无线传感器网络将逻辑上的信息世界与客观上物理世界融合起来,改变了人与自然的交互方式,但是如何利用 WSN 为人们长期地提供关于被监测物体可信数据,一直科研人员关心的热点问题,本项工作拟在以前研究理论的基础上提出一种新型路由机

制，进一步优化及提高数据传输的可信性，延长网络生命周期。

### 1.3 无线传感器网络的应用

无线传感器网络的应用前景十分诱人。传统应用有军事、监控、应急、环境、防空等领域，新兴应用将涉及家用、企业管理、保健、交通等领域。可以预计，将来无线传感器网络将无处不在，比如家庭采用无线传感器网络负责安全、调控、节电和保健等；企业和社区采用无线传感器网络负责保卫与安全、供应监测、人员流动与车辆进出等；服务业采用无线传感器网络负责商品流通、服务环境秩序、金融流通安全等。在各种社会活动中，无线传感器网络的应用更是举不胜举。

传感器网络的最初发展是由于军事方面的应用而推动的，在军事上，使用声音、压力等传感器可以侦探敌方阵地动静，如人员、车辆行动情况，从而实现战场实时监督、战场损失评估等。军事应用的例子有很多，从实现海洋监控功能的大规模声学监控系统到实现地面目标探测功能的无人操作地面传感器网络。同时，随着传感器网络通信功能的增强，成本的降低，在其它方面的用途也越来越广泛。例如设施安全，工业监控等等。

#### 1.3.1 军事应用

无线传感器网络最早就是应用于军事活动。利用传感器网络能够实现对敌军兵力和装备的监控、战场的实时监测、目标的定位、战场评估、核攻击和生物化学攻击的监测和搜索等功能。通过飞机或者炮弹直接将传感器节点播撒到敌方阵地内部，或者在公共隔离带部署传感器网络，就能够非常隐蔽而且近距离准确地收集战场信息，迅速获取有利于作战的信息。传感器网络是由大量的随机分布的节点组成的，即使一部分传感器节点被敌方破坏，剩下的节点依然能够自组织地形成网络。传感器网络可以通过分析采集到的数据，得到十分准确的目标定位，从而为火控和制导系统提供精确的制导。利用生物和化学传感器，可以准确地探测到生化武器的成分，及时提供情报信息，有利于正确防范和实施有效的反击。此外，视频、声学和其它一些传感器件可以探测到潜在的威胁，根据传感器收集的数据可以准确的发出警报。虽然固定的传感器有线网络可以完成大多数这方面的工作，但是无线网络在需要的时候可以提供更加灵活和更大覆盖范围的监控。另外，传感器网络还可以探测生化攻击和核攻击。

#### 1.3.2 环境监控

比如温度这样的待测数据是分布在较大的区域内的，因此环境监控理所当然的成为传感器网络的又一大用途。洛杉矶的嵌入式网络传感中心（Center for Embedded Network Sensing，CENS）<sup>[12]</sup>就是一个环境监控系统。环境传感器负责研究植被对于气候和疾病做出的反应，声学 and 图像传感器负责识别、追踪和测量鸟类和其它物种的生存数量。巴西政府投资兴建的亚马逊预警系统是一个具有很大覆盖面的系统，它

可以提供环境监测,毒品监控以及空中交通控制等多方面的服务。这个系统由不同类型的传感器相互连接构成网络,包括图像传感器、雷达以及环境传感器。图像传感器是基于空间位置分布的,雷达是安装在飞机上的,环境传感器大多安装在地面上。由各种传感器组成的网络的运行速度也不一样,比如卫星和飞行物上的传感器构成的网络就是高速网络,而地面上的传感器构成的网络相对速度比较低。

加州大学伯克利分校计算机系 Intel 实验室和大西洋学院 (COA, The College of the Atlantic) 联合开展了一个名为“in-situ”的利用传感器网络监控海岛生态环境的项目,项目组在若干海岛上进行了实地考察并建立了完善的后勤系统,在大鸭岛 (Great Duck Island) 开展的对海燕栖息地的研究是其中一个典型的研究实例。2002 年夏天,“in-situ”研究组在大鸭岛上部署了由 43 个传感器节点组成的传感器网络。传感器节点使用了 Berkeley 的 Mote 节点<sup>[13]</sup>,节点上运行的软件是 Berkeley 开发的 TinyOS<sup>[14]</sup>,节点上装有多种传感器以监测海岛上不同类型的数据,使用光敏传感器、数字温湿度传感器和压力传感器监测海燕地下巢穴的微观环境;使用低能耗的被动红外传感器监测巢穴的使用情况。为了将节点放置在海燕的巢穴中,需要严格控制节点的体积,传感器都集成在传感器板上,从而大大减小节点的体积以满足监控需要。传感器板还包含一个 12 位的 A/D 转换器,以减少或消除模拟测量值中的噪声,得到精度更高的传感数据。部署在实际环境中的节点需要考虑封装问题,根据不同监控任务采用不同的封装形式,用来采集光照信息的传感器节点需要透明而密闭的封装,而采集温度、湿度信息的节点需要有缝隙以便温湿度传感器采集数据。

### 1.3.3 智能家居

无线传感器网络还能够应用在家居系统中,2004 年 3 月英特尔公司演示了家庭护理的无线传感器网络系统。该系统通过在鞋、家具以家用电器等家中道具和设备中嵌入半导体传感器,帮助老龄人士、以及残障人士的家庭生活,利用无线通信将各传感器联网可高效传递必要的信息从而方便接受护理。

智能家居网络系统是将家庭中各种与信息有关的通讯设备、家用电器和家庭保安装置通过家庭总线技术连接到一个家庭智能化系统上进行集中的或者异地的监视、控制和家庭事务性管理,并保持家庭设施与住宅环境的和谐与协调的系统。基于无线传感器网络的智能家居网络主要是由若干无线传感器节点、无线执行机构、家居无线控制中心组成,其中无线传感器节点分布于需要监测的区域内,执行数据采集、处理和通信等工作;无线执行机构负责启动声光报警、摄像监控、自动喷淋等功能;家居无线控制中心处理、转发来自无线传感器节点的信息,并且与 Internet 连接进行远程控制<sup>[15]</sup>。

### 1.3.4 交通控制

传感器网络在交通车辆控制领域已经有相当长的应用历程了。大多数十字路口都有空中的或者地面的传感器来检测车辆和进行交通灯控制,更进一步,视频摄像头经常用来监控路面情况,采集的视频图像传输到中心控制处的人工控制员处。然而,这种传感器和通信网络在造价方面比较昂贵,因此交通监控往往只用在一些比较重要的路段。低成本的无线 Ad Hoc 网络会彻底改变这种局面,廉价的传感器和嵌入式网络功能可以在任何一个十字路口安装,进行交通检测统计以及测速等等。这些传感器和邻居节点进行通信最终形成一个“全球性的交通大网”,人工操作员或者自动控制器可以通过网络查询信息并发出控制指令<sup>[16]</sup>。

另一个典型的应用是把每辆汽车上都装上传感器,当两辆汽车擦身而过时,可以相互交换一些各自知道的信息,信息包括:交通拥塞地点,以及各自的行车速度和目的地址。这些汇总信息可以通过车辆之间的交互进行传播,然后司机可以通过这些信息尽量选择其它的路径以避免交通拥塞路段。

#### 1.4 本文的主要贡献以及文章组织结构

本文的主要贡献在于:对无线传感器网络多路径路由协议进行归纳、分析及总结;在此基础上提出采用遗传算法对 WSN 中多路径路由进行优化,最后在多路径优化的基础上提出基于容载检测的可靠多路径路由机制,并通过 NS2 对所提出的算法的有效性进行验证。

本文的组织结构如下:

第二章:阐述无线传感器网络的相关概念,对路由协议进行归纳总结,同时就无线传感器网络的一些模糊概念进行澄清;

第三章:针对无线传感器网络研究的热点问题——节能研究进行探究,分析当前节能采用的常用手段以及如何设计路由协议达到延长网络生命周期的目的;同时针对多路径路由展开研究,分析利用多路径进行数据传输在均衡网络负载,平均消耗网络能量方面的优势;最后从多路径分类、构建等方面对 WSN 多路径路由进行概述;

第四章:采用遗传算法来进行多路径的优化,并进行算法的设计与实现;

第五章:在总结现有的提高路由可靠性手段的基础上,提出在无线传感器网络路由协议中引入容载检测因子对传感器节点的负载进行检测,而后根据检测的结果进行相应的处理,最后通过实验证明该策略的有效性;

第六章:进行归纳总结,指明论文的进一步研究方向。

## 2 无线传感器网络路由协议的综述

### 2.1 概述

路由协议解决的是数据传输规范性问题,路由协议的设计是无线传感器网络的核心技术之一,路由协议的性能和整个网络的性能密切相关。由于无线传感器网络节点能力的限制,Internet 网络协议并不适合它,且无线传感器网络与传统的无线网络(如 WLAN 和蜂窝移动电话网络)有着不同的设计目标<sup>[17]</sup>,后者需要在高度移动的环境中通过采用资源管理策略及优化路由等手段在最大程度上提高带宽利用率,同时为用户提供一定的服务质量保证;而在多数无线传感器网络中,除了少数节点需要移动外,大部分节点都是静止的,且很多无线传感器网络通常工作在观测人员无法接近的恶劣甚至危险的远程环境中,能源无替代,设计有效的策略延长网络的生命周期成为无线传感器网络的核心问题。

在无线传感器网络研究的初期,人们一度认为成熟的 Internet 技术加上 Ad Hoc 路由机制对传感器网络的设计是足够充分的,但深入的研究表明<sup>[18]</sup>传感器网络有着与传统网络明显不同的技术要求:前者以数据为中心,后者以数据传输为目的。为了适应广泛的应用程序,传统的设计遵循着“端到端”的边缘思想,强调将一切与功能相关的处理都放在网络的端系统上,中间节点仅仅负责数据分组的转发,对于传感器网络,这未必是符合传感器网络的特点和应用的要求。节点标识(如地址等)的作用在传感器网络中就显得不是十分重要,因为应用程序不怎么关心单节点上的信息;中间节点上与具体应用相关的数据处理、融合和缓存也显得很有必要。在密集性的传感器网络中,相邻节点间的距离非常短,低功耗的多跳通信模式节省功耗,同时增加了通信的隐蔽性,也避免了长距离的无线通信易受外界噪声干扰的影响,这些独特的要求和制约因素为传感器网络的研究提出了新的技术问题<sup>[19]</sup>。下面是无线传感器网络体系结构图:

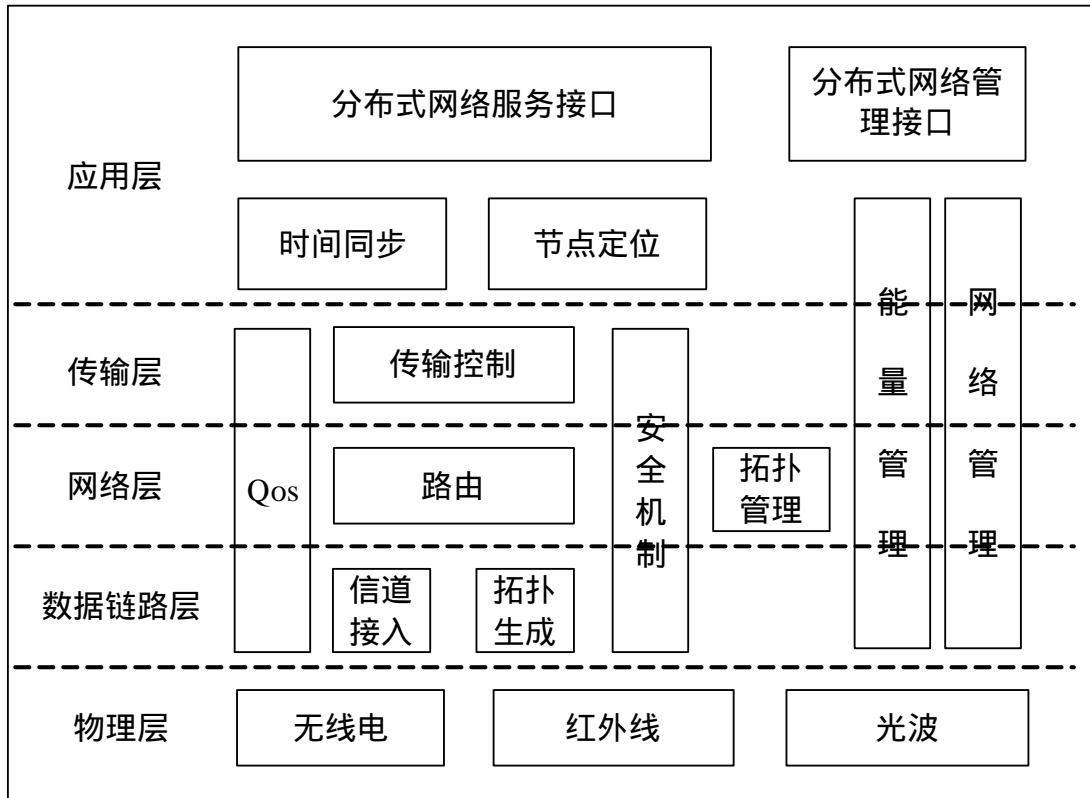


图2.1 传感器网络体系结构图

## 2.2 路由协议的特点及协议设计要求

路由协议负责将数据分组从源节点通过网络转发到目的节点,它主要包括两个方面的功能:寻找源节点和目的节点间的优化路径,将数据分组沿着优化路径正确转发。Ad Hoc、无线局域网等传统无线网络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,这些网络路由协议的主要任务是寻找源节点到目的节点间通信延迟小的路径,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这类网络考虑的重点。在无线传感器网络中,节点能量有限且一般得不到能量补充,因此路由协议必须要高效利用能量;同时传感器节点数目往往很大,节点只能获取局部拓扑结构信息,路由协议要能够在局部网络信息的基础上选择合适的路径。传感器网络具有很强的应用相关性,不同应用中的路由协议可能差别很大,没有一个通用的路由协议。此外,传感器网络的路由机制还经常与数据融合技术联系在一起,通过减少通信量而节省能量。因此,传统无线网络的路由协议并不适合无线传感器网络。

与传统网络的路由协议相比,无线传感器网络的路由协议具有以下特点:

1) 能量优先。传统路由协议在选择最优路径时,很少考虑节点的能量消耗问题。而无线传感器网络中节点的能量有限,延长整个网络的生存周期成为传感器网络路由协议设计的重要目标,因此需要考虑节点的能量消耗以及网络能量的均衡消耗的问题。



题。

2) 基于局部拓扑信息。无线传感器网络为了节省通信能量,通常采用多跳通信模式,而节点有限的存储空间和计算资源,使得节点不能存储大量的路由信息,不能进行太复杂的路由计算。在节点只能获取局部拓扑信息和资源有限的情况下,如何实现简单高效的路由机制是无线传感器网络的一个基本问题。

3) 以数据为核心。传统的路由协议通常以地址作为节点的标识和路由依据,而无线传感器网络中大量节点随机部署,所关注的是监测区域的感知数据,而非具体哪个节点获取的信息,不依赖于全网惟一的标识。传感器网络通常包含多个传感器节点到少数汇聚节点数据流,按照对感知数据的需求、数据通信模式和流向等,以数据为中心形成数据的转发路径。

4) 应用相关。传感器网络的应用环境千差万别,数据通信模式不同,没有一个路由机制适合所有的应用,这是传感器网络应用相关性的一个体现。设计者需要针对每一个具体应用的需求,设计与之适应的特定路由机制。

针对无线传感器网络路由机制的上述特点,在根据具体应用设计路由机制时,要满足下面传感器网络路由机制的要求:

1) 能量高效。传感器网络路由协议不仅要选择能量消耗最小的消息传输路径,而且要从整个网络的角度考虑,选择是整个网络能量均衡消耗的路由。传感器节点的资源有限,传感器网络的路由机制要能够简单而高效地实现信息传输。

2) 可扩展性。在无线传感器网络中,监测区域范围或节点密度不同,造成网络规模大小不同;节点失败、新节点加入以及节点移动等,都会使得网络拓扑结构动态发生变化,这就要求路由机制具有可扩展性,能够适应网络结构的变化。

3) 鲁棒性。能量用尽或环境因素造成传感器节点的失败,周围环境影响无线链路的通信质量以及无线链路本身的缺点等,这些无线传感器网络的不可靠性要求路由机制具有一定的容错能力。

4) 快速收敛性。传感器网络的拓扑结构动态变化,节点能量和通信带宽等资源有限,因此要求路由机制能够快速收敛,以适应网络拓扑的动态变化,减少通信协议的开销,提高信息传输的效率。

此外,关于无线传感器网络的拓扑结构在不同的文献里,对于该问题一直存在有不同的说法,李建中<sup>[8]</sup>最早在国内的有关文献中提到:WSN 的网络动态性很强,网络中的传感器、感知对象和观察者这三个要素都有可能具有移动性,并且经常有新节点或已有的节点的失效;而国内外不少科研人员也都提出相左的意见<sup>[18,20]</sup>。作者认为这个问题应该具体问题具体分析:无线传感器网络是一种应用相关的网络,因此也就存在移动传感器网络和非移动传感器网络;在无线移动传感器网络中,由于组成无线

传感器网络的三个部分都具有移动性,在这种情况下,无线传感器网络的拓扑结构较无线移动自组织显得更加不稳定,如在动物身上所携带的传感器节点所组成的无线传感器网络;而在另外的一些无线传感器网络中(如用于监测森林温度的传感器网络等),当节点通过某种方式被布置后,节点之间的相对位置一般不会发生变化,在这种情况下无线传感器网络的拓扑结构就比较稳定。

## 2.3 路由协议的分类

针对不同的传感器网络应用,研究人员提出了不同的路由协议,但到目前为止,仍没有一个完整和清晰的路由协议分类标准。国内有研究人员通过十种不同的标准对传感器进行分类<sup>[20]</sup>,其中有一标准是根据传输过程中采用路径的多少划分为单路径路由协议和多路径路由协议;但是综观近些年来国内外的文献,一般更倾向从路由的表现形式、与应用的相关程度等方面进行分类,具体分类情况如下:

### 2.3.1 平面多跳路由协议与层次路由协议

#### 2.3.1.1 平面多跳路由协议:

##### (1) 洪泛式路由协议

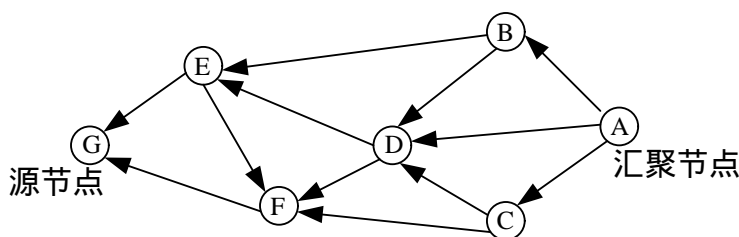


图2.2 Flooding网络拓扑图

洪泛式路由协议<sup>[21]</sup>中具有代表性的是 Flooding 与 Gossiping, 它们是传感器网络应用最早最简单的路由协议, 不需要任何路由算法, 也不需要维护网络拓扑结构。Flooding 是一种传统的路由技术, 不要求维护网络的拓扑结构。该协议规定, 每个节点接收来自其它节点信息, 并以广播形式转发给其邻居节; 如此继续下去, 最后数据将传送到目的节点。这个协议容易引起信息的“内爆”(implosion)和“重叠”(overlap)。所谓“内爆”是指将同一个数据包多次转发给同一个节点的现象(见下图 2.3); 而“重叠”是指不同的传感器节点在感知范围上发生了重叠(见下图 2.4), “内爆”和“重叠”会造成资源的浪费。因此对于自组织的传感器网络, 泛洪路由是一种较直接的实现方法, 但消息的“内爆”和“重叠”是其固有的缺陷, 而且它没有考虑能源方面的限制, 具有“资源盲点”(resource blindness)的缺点。为了克服这些缺陷, S. Hedetniemi 等人<sup>[21]</sup>提出了 Gossiping 策略, 节点随机选取一个相邻节点转发它接收到的分组, 而不是采用广播形式。这种方法在一定程度上避免了消息的“内爆”现象, 但仍存在信息重叠现象, 而且有可能增加端到端的传输延时。

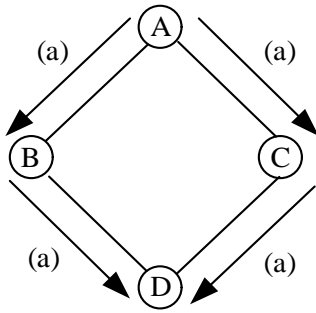


图2.3 信息内爆扑图

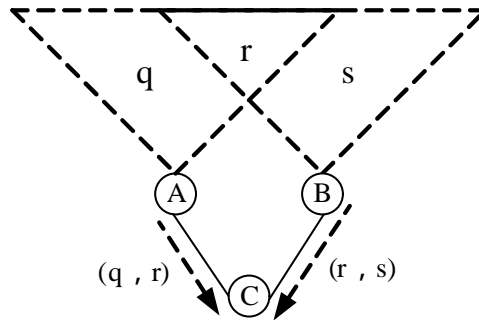


图2.4 信息重叠

## (2) SPIN (sensor protocol for information via negotiation)

SPIN<sup>[22]</sup>是以数据为中心的自适应路由协议，通过协商机制来解决泛洪算法中的“内爆”和“重叠”问题。传感器节点仅广播采集数据的描述信息，当有相应的请求时，才向目的地发送数据信息。SPIN 协议中有 3 种类型的消息，即 ADV，REQ 和 DATA。节点用 ADV 宣布有数据发送，用 REQ 请求希望接收数据，用 DATA 封装数据，这样小 ADV 消息减轻了内爆问题；通过数据命名解决了交叠问题；节点根据自身资源和应用信息决定是否进行 ADV 通告，避免了资源利用盲目问题。图 2.5 显示了利用 SPIN 协议路由的建立和数据的传输。

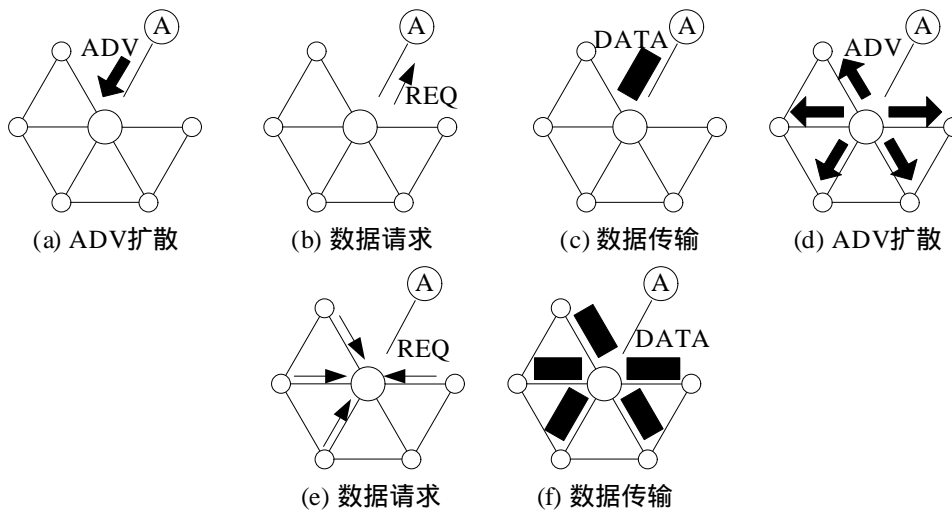


图2.5 SPIN协议路径的建立和数据传输

SPIN 协议有 4 种不同的形式：

1) SPIN-PP 采用点到点的通信模式，并假定两节点间的通信不受其他节点的干扰，分组不会丢失，功率没有任何限制。要发送数据的节点通过 ADV 向它的相邻节点广播消息，感兴趣的节点通过 REQ 发送请求，数据源向请求者发送数据。接收到数据的节点再向它的相邻节点广播 ADV 消息，如此重复，使所有节点都有机会接收到任何数据。

2) SPIN-EC 在 SPIN-PP 的基础上考虑了节点的功耗，只有能够顺利完成所有任

务且能量不低于设定阈值的节点才可参与数据交换。

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

4) SPIN-RL 它是对 SPIN-BC 的完善,主要考虑如何恢复无线链路引入的分组差错与丢失。记录 ADV 消息的相关状态,如果在确定时间间隔内接收不到请求数据,则发送重传请求,重传请求的次数有一定的限制。

与 Flooding 和 Gossiping 协议相比,SPIN 有效的节约了能量,其缺点是:当产生或受到数据的节点的所有邻节点都不需要该数据时,将导致数据不能继续转发,以致较远节点无法得到数据,当网络中大多节点都是潜在 sink 点时问题并不严重,但当 sink 节点较少时则是一个很严重的问题;且当某 sink 节点对任何数据都需要时,其周围节点的能量容易耗尽;虽然减轻了内爆,但在大规模网络中,ADV 内爆仍然存在。

### (3) SAR (sequential assignment routing)

在选择路径时,有序分配路由<sup>[23]</sup> (SAR) 策略充分考虑了功耗、QoS 和分组优先级等特殊要求,采用局部路径恢复和多路经备份策略,避免节点或链路失效时进行路由重计算需要的过量计算开销。为了在每个节点与 sink 节点间生成多条路径,需要维护多个树结构,每个树以落在 sink 节点有效传输半径内的节点为根向外生长,枝干的选择需满足一定 QoS 要求并要有一定的能量储备。这一处理使大多数传感器节点可能同时属于多个树,可任选其一将采集数据回传到 sink 节点。该协议在保证 QoS 的同时,由于引进了大量冗余路由信息,消耗了储存资源,且路由信息的维护、节点 QoS 参数与能耗信息的更新均需较大开销。

### (4) 定向扩散<sup>[24,25]</sup> (directed diffusion)

DD 算法是以数据为中心的路由算法发展过程中的一个里程碑,是以数据为中心的路由算法中的典范。该算法的主要思想是对网络中的数据用一组属性对命名,数据的传输路径由节点同其相邻节点交互决定,同时引入梯度变量的概念来处理对传感器网络的查询。它采用邻接点间通信的方式来避免维护全局网络拓扑,通过查询驱动数据传输模式和局部数据融合而减少网络数据流,降低了不必要的开销,从而延长网络生命周期。

定向扩散路由机制可以分为周期性的兴趣扩散、梯度建立以及路径加强三个阶段,图 2.6 显示了这三个阶段的数据传播路径和方向。

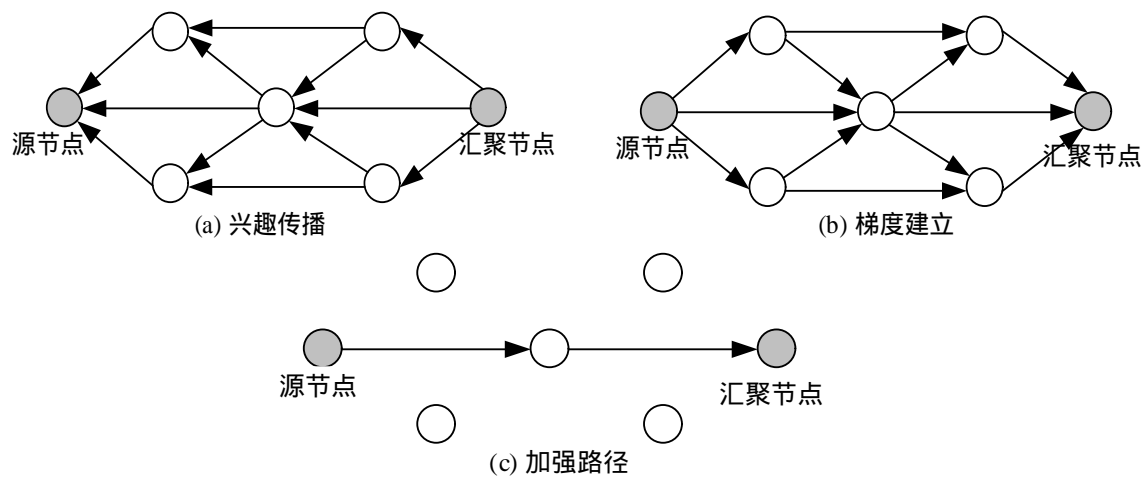


图 2.6 定向扩散路由机制

在兴趣扩散阶段，汇聚节点周期性地向邻居节点广播兴趣消息，每个节点通过在本地保存的一个兴趣列表以建立该节点向汇聚节点传递数据的梯度关系。在数据传播阶段，传感器节点采集到与兴趣匹配的数据时，把数据发送到梯度上的邻居节点，并按照梯度上的数据传输速率设定传感器模块采集数据的速率。定向扩散路由机制通过正向加强机制来建立优化路径，并根据网络拓扑结构变化修改数据转发的梯度关系，节点依据路由加强的标准生成一条优化的数据传输路径。同时为了动态适应节点失效、拓扑变化等情况，定向扩散路由周期性进行兴趣扩散、数据传播和路由加强三个阶段的操作以保证路由的畅通性。但是定向扩散路由在路由建立时需要一个兴趣洪泛的传播，能量和时间开销都比较大，尤其是当底层 MAC 协议采用的休眠机制时可能造成兴趣建立的不一致。

#### 2.3.1.2 层次路由协议

层次式路由协议<sup>[26,27]</sup>：它的基本思想是将传感节点分簇，簇内通讯由簇头节点来完成，簇头节点进行数据聚集和合成减少传输信息量，最后簇头节点把聚集的数据传送给终端节点。这种方式能满足传感器网络的可扩展性，有效的维持传感节点的能量消耗，从而延长网络生命周期。该类算法主要通过随机选择聚类首领，成为聚类首领的节点向周围广播信息，平均分担中继通信业务来实现。下图 2.7 是分簇路由协议拓扑结构图，从图中可以看出簇之间以及簇与基站之间的通信是由簇头完成的，同时簇头负责管理或控制簇内的成员节点，协调成员节点之间的工作，并负责簇内信息的收集和数据的融合。无线传感器网络中，层次路由协议主要包括 LEACH 协议、TEEN 协议、PEGAGIS 协议、TTDD 协议等。

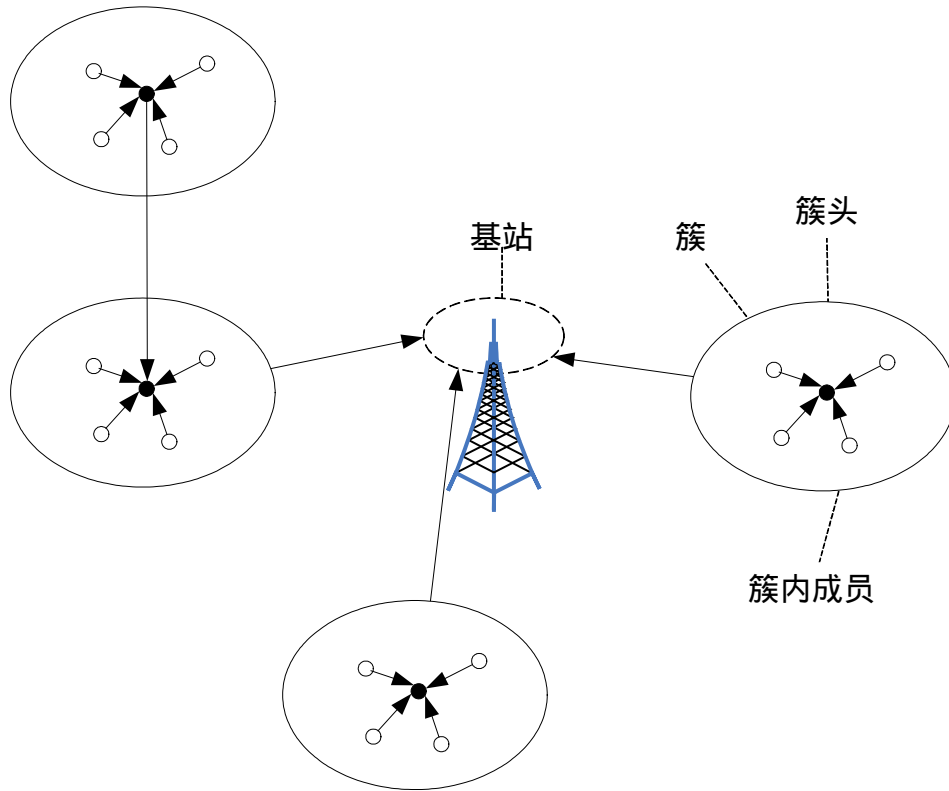


图 2.7 分簇路由协议拓扑结构图

(1) LEACH<sup>[26]</sup> (low energy adaptive clustering hierarchy)

LEACH 是第一个在无线传感器网络中提出的层次式路由协议，其后的大部分层次式路由协议都是在它的基础上发展而来的。该算法是 MIT 的 Chandrakasan 等人为无线传感器网络设计的低功耗自适应成簇路由算法。与一般的平面多跳路由协议和静态成簇算法相比，LEACH 可以将网络生命周期延长 15%，主要通过随机选择簇头，平均分担网络中的通信业务来实现。LEACH 定义了“轮”(round)的概念，一轮由初始化和稳定工作两个阶段组成。为了避免额外的处理开销，稳定态一般持续相对较长的时间。

在初始化阶段，簇头是通过下面的机制产生的：传感器节点生成  $(0, 1)$  之间的随机数，如果大于阈值  $T$ ，则该节点被选为簇头。 $T$  的计算方法如下：

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * (r \bmod \frac{1}{p})} & n \in G \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2.1)$$

其中  $p$  为网络中节点成为簇头的百分数， $r$  是当前的轮数， $G$  为在上一轮中没有成为簇头的节点的集合。

簇头被选定之后，它们便主动向所有节点广播这一消息；其它节点依据接收到簇头信号的强度，选择它所加入的簇，并告知相应的簇头，簇头按照时分复用的方式，

为其中的每个成员分配通信时隙。在稳定工作阶段，节点持续采集监测数据，传给簇头，进行必要的融合处理之后，发送到 sink 节点。持续一段时间以后，整个网络进入下一轮工作周期，重新选择簇头。

由于 LEACH 假设所有的节点都能直接与簇头节点和终端节点通讯，采用连续数据发送模式和单跳路径选择模式，因此在需要监测面积范围大的应用中不适用，而且动态分簇带来了拓扑变换和大量广播信息之类的额外开销。

#### (2) TEEN<sup>[28]</sup> (threshold sensitive energy efficient sensor network protocol)

TEEN 是一个层次路由协议，利用过滤方式来减少数据传输量。该协议采用与 LEACH 协议相同的聚簇方式，但簇头根据与 sink 点距离的不同形成层次结构。聚簇完成后，sink 点通过簇头向全网节点通告两个门限值（分别称为硬门限和软门限）来过滤数据发送。在节点第一次监测到数据超过硬门限时，节点向簇头上报数据，并将当前监测数据保存为监测值（sensed value,简称 SV）。此后只有在监测到的数据比硬门限大且其与 SV 之差的绝对值不小于软门限时，节点才向簇头上报数据，并将当前监测数据保存为 SV。该协议通过利用软、硬门限减少了数据传输量，且层次型簇头结构不要求节点具有大功率通信能力。但由于门限设置阻止了某些数据上报，不适合需周期性上报数据的应用。

#### (3) PEGASIS<sup>[29]</sup> (power-efficient gathering in sensor information system)

PEGASIS 是由 LEACH 发展而来，它假定组成网络的传感器节点是同构且静止的。节点发送能量递减的测试信号，通过检测应答来确定离自己最近的相邻节点并将其作为自己的下一节点，依次遍历网络中的所有节点最终形成一条链。通过这种方式，网络中的所有节点能够了解彼此的位置关系，进而每个节点依据自己的位置选择所属的聚类，聚类的首领（leader）参照位置关系优化出到 sink 节点的最佳链路。因为 PEGASIS 中每个节点都以最小功率发送数据分组，并有条件完成必要的的数据融合，减小业务流量，因此整个网络的功耗较小。研究表明，PEGASIS 支持的传感器网络的生命周期是 LEACH 的近两倍。PEGASIS 协议的不足之处在于节点维护位置信息（相当于传统网络中的拓扑信息）需要额外的资源。

#### (4) TTDD<sup>[30]</sup> (Two-Tier Data Dissemination)

TTDD 基于分布式架构，利用网格结构（grid structure）将网络分解成若干个小小区（cell），只有处在小区边界上的传感器节点负责转发和聚合数据，小区内部节点只负责数据的探测和提交，不转发其他小区内节点的传感数据。在算法实现过程中，应用端驱动在整个网络区域建立网格结构，并设定离网格边界最近的传感器节点为转发点（forwarding points）称为分发节点 DN（Dissemination Nodes），双层中其一指当前位置的小区，另一层即指小区边界的 DN 节点。应用端发出查询请求报文，该报文只

在小区内进行泛洪，当最近 DN 节点收到查询报文时，它则向相邻的 DN 节点转发，这个过程持续到发现匹配数据源端为止。在查询请求报文向整个网络进行广播的阶段，整个网络即可建立通向应用端的反向链路，使得能够传感数据能够顺利回传到应用端，图 2.8 描述了 TTDD 的网络结构。

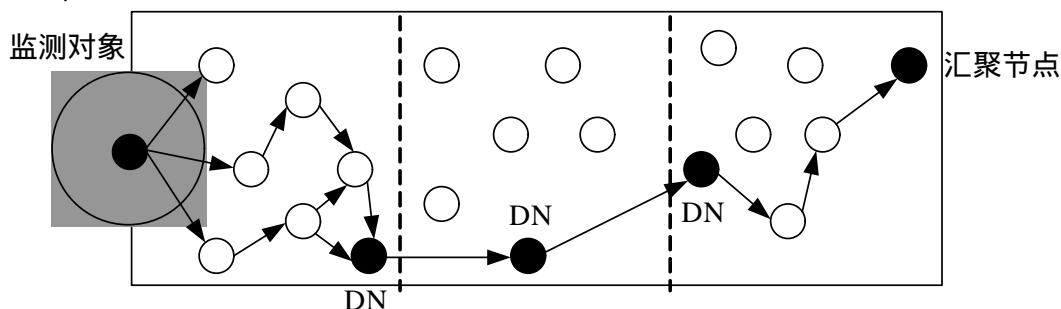


图2.8 TTDD协议拓扑图

同定向扩散协议相比，TTDD 协议采用单路径，能够提高网络的生存时间，但计算与维护网络的开销较大；同时要求节点必须知道自身位置，且非 sink 节点不能移动，此外要求节点部署密度较大。

#### （5）多层聚类算法<sup>[31]</sup>

多层聚类算法是 Estrin 为传感器网络设计的一种新的聚类实现机制，工作在网络中的传感器节点处于不同的层，所处层次越高，所覆盖面积越大；起初，所有节点均在最低层，通过竞争获得提升高层的机会，新的工作周期开始时，每一个节点都广播自己的状态信息，包括储备能量、所在层次和首领的 ID（如果有）等，然后进入等待状态以便相互了解信息，等待时间与所在层次成正比；处在最低层的节点如果没有首领，等待状态结束后，立刻启动一个“晋升定时器”，定时时间与自身能量以及接收到同层其他节点广播消息的数目成反比，目的是为能量较高且在密集区的节点获得较多的提升机会。一旦定时时间到，节点升入高层，将有发给自己广播消息的节点视为潜在的子节点，并广播自己新的状态信息，低层节点选择响应这些准首领的广播消息，最终确定惟一的通信关系。已选择了首领的节点，自己的“晋升定时器”将停止工作，也就意味着本轮放弃了晋升机会。在每一个工作周期结束以后，高层节点将视自己的状态信息（如有无子节点，功率是否充足）决定是否让出首领位置。上述的多层聚类算法具有递归性，Estrin 等人用两层模型验证了它在传感器网络中的有效性。

### 2.3.2 能量感知路由协议

能量路由是最早提出的传感器网络路由机制之一，它根据节点的可用能量或传输路径上的能量要求，选择数据的转发路径，节点的可用能量就是节点当前的剩余能量。具体过程如下所示：

能量路由根据节点的可用能量（PA）或传输路径上链路的能量需求，选择数据



的转发路径<sup>[9]</sup>。在图 2.9 所示的网络中大写字母表示节点，如节点 A，节点右侧括号内的数字表示节点的可用能量，图中的双向线表示节点之间的通信链路，链路上的数字表示在该链路上发送数据消耗的能量。源节点是一般功能的传感器节点，完成数据采集工作，汇聚节点是数据发送的目标节点。

在图 2.9 中，从源节点到汇聚节点的可能路径有：

路径 1：源节点—B—A—汇聚节点，路径上所有节点 PA 之和为 4，在该路径上发送分组需要的能量之和为 3；

路径 2：源节点—C—B—A—汇聚节点，路径上所有节点 PA 之和为 6，在该路径上发送分组需要的能量之和为 6；

路径 3：源节点—D—汇聚节点，路径上所有节点 PA 之和为 3，在该路径上发送分组需要的能量之和为 4；

路径 4：源节点—F—E—汇聚节点，路径上所有节点 PA 之和为 5，在该路径上发送分组需要的能量之和为 6；

能量路由策略主要有以下几种：

最大 PA 路由：从数据源到汇聚节点的所有路径中选取节点队之和最大的路径。

图 2.9 中路径 2 的 PA 之和最大，但路径 2 包含了路径 1，因此不是高效的从而被排除，选择路径 4。

最小能量消耗路由：从数据源到汇聚节点的所有路径中选取节点耗能之和最少的路径。在图 2.9 中选择路径 1。

最少跳数路由：选取从数据源到汇聚节点跳数最少的路径。在图 2.9 中选取路径 3。

最大最小 PA 节点路由：每条路径上有多个节点，且节点的可用能量不同，从中选取每条路径中可用能量最小的节点来表示这条路径的可用能量。最大最小 PA 节点路由策略就是选择路径可用能量最大的路径，在图 2.9 中选择路径 3。

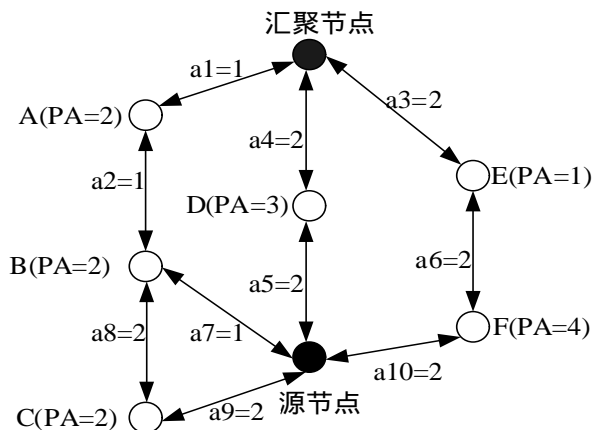


图2.10 能量路由算法示意图

上述能量路由算法需要节点知道整个网络的全局信息。由于传感器网络存在资源约束，节点只能获取局部信息，因此上述能量路由方法只是理想情况下的路由策略。

### 2.3.3 面向应用 WSN 路由协议与普通路由协议

所谓面向应用即是与应用模式紧密相连的路由协议，前面我们提到，应用模式主要有周期性传感数据汇报、传感事件通报，应用端查询等应用功能的组合，即传感器网络应用是集报告、查询为一体的多功能形式，面向应用的路由协议即是适合 WSN 以数据为中心的网络特性、响应网络应用特征的路由协议。其中定位和寻址，不再以节点标号为中心，而以所采集的数据属性为依据，定义路由相应行为，这样的路由协议主要有前面提到的定向扩散路由协议、SPIN 路由协议，以及下面的谣传路由协议。

谣传路由协议<sup>[32]</sup> (Rumor Routing)：在某些传感器网络的应用中，传感数据的传输量较少或者已知数据区域，如果采用前面所述的定向扩散路由，需要经过查询消息的泛洪传播和路径增强机制才能确定一条优化的数据传输路径。Boulis 等人提出了谣传路由协议，适用于数据传输量较小的传感器网络。谣传路由协议引入了查询消息的单播随机转发，克服了使用泛洪方式建立转发路径带来的开销过大的问题。它的基本思想是：事件区域的传感器节点产生代理 (agent) 消息，代理消息沿随机路径向外扩散传播，同时汇聚节点发送的查询消息也沿随机路径在网络中传播。当代理消息和查询消息的传输路径交叉到一起时，就会形成一条汇聚节点到事件区域的完整路径。

代理消息是一个包含生命期等事件相关信息的分组，用来将携带的时间信息通告给它传输经过的每个传感器节点，当传感器监测到事件发生时，产生代理消息，并设定相关事件特征，跳数设为零。期间，每个传感器节点维护一个邻居列表和一个事件列表，当某个传感器节点收到代理消息时，查找事件列表，确定是否有相关事件纪录，并比较跳数值，更新事件列表跳数或代理跳数值，并在邻居列表中记录邻居信息，同时节点将代理消息的生存值减 1，并在网络中随机选择邻居节点转发代理消息，直到其生存值减为零。通过代理消息在其有限生存的传输过程中，形成一段到达事件区域的路径。

同理，查询消息可以由网络中任何一个传感器节点产生，若节点保存该事件的相关表项，即说明该节点在到达事件区域的路径上。它会沿此路径转发查询消息。否则节点随机选择邻居节点转发查询消息，形成查询消息的路径。

如果查询消息和代理消息的路径交叉，交叉节点会沿查询消息的反向路径将事件信息传送到查询节点。与定向扩散路由相比，谣传路由协议可以有效的减少路由建立的开销。但其采用过于随机方式生成路径，所以数据传输路径不优化，并存在路由环路问题。

### 2.3.4 单路径路由协议与多路径路由协议

从路径的表现形式上角度考虑,路由协议可以简单的分为单路径和多路径两种形式,一些较为复杂的路由协议支持到 Sink 节点的多条路径。与单路径算法不同,这些多路径算法允许数据在多条线路上复用。多路径算法的优点很明显:它们可以提供更好的数据交付率和可靠性。在前面提到现有的无线传感器路由协议中,其中 GRAB<sup>[33]</sup>可以实现多路径形式,另外,后面分析的 GRAB 是传感器网络中比较典型的多路径路由协议。

### 2.3.5 传感器源路由驱动与 Sink 驱动

根据路由主导方的角度考虑,在无线传感器网络中,一些路由算法假定由传感器源节点来决定整个路径,这通常称为源路由;而其它的路由算法假定传感器源节点区域对路径一无所知,由 Sink 基于自己的计算决定通过网络的路径。这两种方式的折衷实际是最佳路由与额外开销的平衡。传感器智能系统通常能选择更佳的路径,因为它们在发送数据前探索了所有可能的路径,然后基于特定系统对“优化”的定义来选择最佳路径。然而确定所有路径的行为通常需要很多的探索通信量和很长的时间。

## 2.4 传统路由协议的对比分析及算法的分析

由于无线传感器网络与应用高度相关,使得其路由协议同样具有多样性特点,很难断定某一协议更为优越,下面分别通过列表的形式对本文所提到路由协议进行对比分析,对路由协议的应用范围进行比较,见表 2.1,表 2.2:

**表2.1 路由协议的分类比较表**

协 议	Optimal path	Critical node	Sink mobility	Normal node mobility	Computation overhead of routing establishment & maintenance	Computation overhead of routing establishment & maintenance	Storage overhead of routing establishment & maintenance
洪泛(Flooding)	Shortest path	×			Not needed	Flooding data	Not needed
Gossiping	×	×			Not needed	Transmitting data along random path	Not needed
SPIN	Possible	×			Not needed	Flooding ADV	Not needed
定向扩散(DD)	Possible	×	×	×	Computing & combining gradient	Flooding Interest	Storing Gradient & buffering Interest
谣传(Rumor)	×	×		×	combining Agent	Source sending agent & sink sending query along random paths	Storing source & event
TBF( Trajectory based)	×	×	×		computing neighbors' distance to curve	Getting neighbors' location	Not needed
Shah et al	Suboptimal cost	×	×	×	Assigning neighbors' probability	Measuring neighbors' cost	Storing forwarding table
LEACH	×	Cluster head	×	×	electing cluster head & comparing signal strength of cluster heads periodically	Clustering periodically	Storing cluster head
TTDD	×	Cross node		×	Computing cross node in grid	Constructing grid & sink flooding query locally	Cross node storing source & event
SAR	×	×	×	×	Not needed	Flooding routing request & measure Qos metrics	Storing parent nodes in spanning trees & Qos metrics

路由协议的分类比较表

协 议	Location-Based	Data-Based	Address-Based	Qos-Supported	Data-aggregation	Source	Query-Driven
洪泛(Flooding)	Possible	Possible	Possible				
Gossiping	Possible	Possible	Possible				
SPIN							
定向扩散(DD)				Possible			
谣传(Rumor)							
TBF( Trajectory based)							
Shah et al							
LEACH							
TTDD							
SAR							

表2.2 路由协议的应用范围比较

协 议	应 用 范 围
洪泛(Flooding)	Reporting emergent event, multiple sinks, high transmission reliability, node moving frequently, node fault frequently, low scalability
Gossiping	Multiple sinks, delay not aware, data loss tolerance, node moving, low scalability
SPIN	multiple sinks, middle nodes knowing information whether more distant nodes needing data, low scalability
定向扩散(DD)	Few sinks, query-driven WSN; one query with periodical response, Qos aware
谣传(Rumor)	Multiple sinks & Few events; delay not aware, query-driven WSN; one query with response, dense nodes
TBF( Trajectory based)	Needing multiple routing approaches, node moving frequently, dense nodes
Shah et al	Node knowing neighbor's transmission cost, high network survivability, query-driven WSN
LEACH	Delay aware, nodes with high power, low scalability
TTDD	Multiple sinks, sink moving, query-driven WSN; real-time not aware
SAR	Small-scale WSNs; Qos aware; low scalability

从上文分析过程中可以看出现有的无线传感器网络路由协议都具有下面几个特点：

- 1) 都具备一定程度的节能考虑；
- 2) 都具备需求响应式及本地协作的动态路由更新方法；

响应式路由协议 ( reactive routing protocol ) 即网络有需要时在快速建立路由，这种方式不需要向有线网络那样维持大规模的永久路由表信息，WSN 中有通信需求时，此时再执行路由发现过程，这样非常适合传感器网络动态拓扑的特征。

- 3) 都具备一定的聚合性的考虑。

## 2.5 路由协议自动切换

前面的章节分析到无线传感器网络是一个应用相关的网络，没有一个能够适应所有应用的路由协议；而传感器网络可能需要在相同监测区域内完成不同的任务，此时

如果对每种任务部署专门的传感器网络将增加传感器网络的成本。为了能够适应多种任务，传感器网络需要根据具体的应用环境和网络条件自主地选择适用的路由协议，并在各个路由协议之间自主切换。为此，引出了自主切换的路由协议。

路由协议自主切换机制是根据应用变化自主选择合适的路由协议，并将这一过程封装起来，向上层应用提供统一的可编程路由服务。下面是 Y. He 等人提出的可编程的传感器网络框架<sup>[34]</sup>，包括了目前主流路由协议。

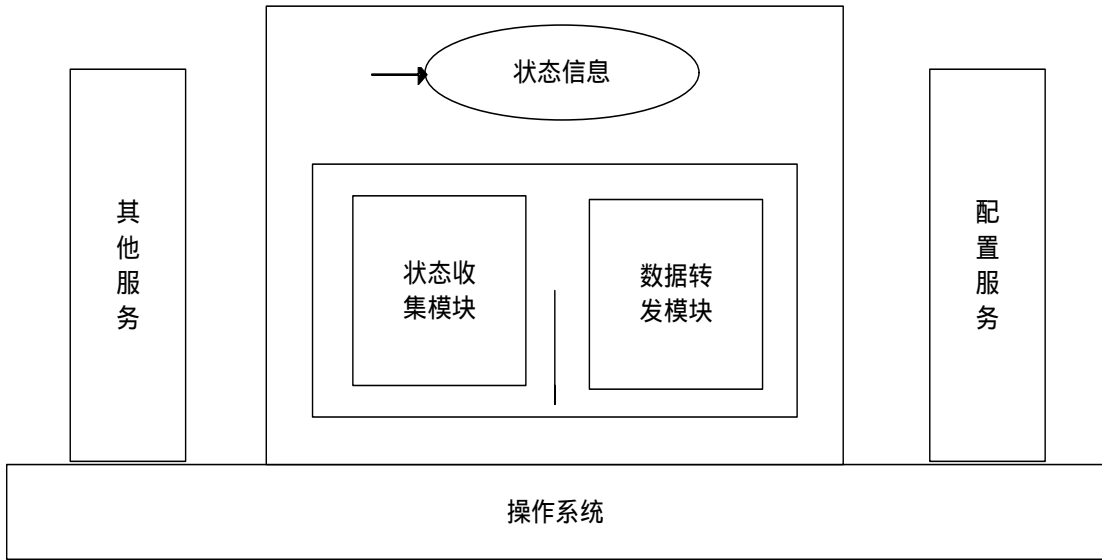


图 2.9 可编程路由体系结构

在这个框架中，路由服务将路由协议封装为状态收集模块和数据转发模块，并提供给上层一个统一的网络层接口。配置服务根据上层应用的要求为不同模块选择不同的路由协议，并将这些配置信息传达到整个网络，以保持路由协议在网络中的一致。

## 2.6 小结

WSN 中的路由协议是 WSN 的核心内容，本章主要对无线传感器网络中的路由协议路由特点及协议设计要求进行归纳和总结；通过对一些比较热点的路由协议进行进一步的梳理，对比分析出目前讨论较多的路由协议的特点，同时总结出这些路由协议的应用范围；在本章的最后就路由协议的自动切换进行阐述；此外还对 WSN 中有些模糊的概念进行进一步的澄清。

### 3 无线传感器网络节能及多路径路由技术

在无线传感器网络中,节点有限的能量且一般得不到能量补充的状况使得节能成为研究无线传感器网络一个重要的课题,同时整个网络能量的均衡消耗才能够在最大程度上延长网络的生命周期,这就要求在进行无线传感器网络 MAC 层及路由层的协议设计时要充分考虑到这些,而在无线传感器网络引入多路径路由机制可以有效地均衡网络负载,降低网络能量的整体消耗,有效地延长网络生命周期。本章首先对无线传感器网络能耗进行研究,通过分析传感器节点各部分能量消耗,归纳总结如何通过通信模块及处理器模块设计来有效减少节点在数据传输过程中的能耗;而后阐述在无线传感器网络通过流量规划以达到节能目的;最后在分析对比多路径与单路径的基础上,总结出多路径相对单路径在数据传输过程中及节能方面的优势,并对近些年无线传感器网络中多路径的研究进行了综述。

#### 3.1 无线传感器网络的节能技术

由于无线传感器网络组网的各个节点的能量是十分有限的,而且在大多数无线传感器网络中,各节点的能量是不能得到有效的补充的;节点能量耗尽,也就意味着该节点的失效。如果该节点是连接两个或更多网络的骨干节点,此节点的失效极有可能造成网络的分割,最终将导致该网络的崩溃或死亡。因此,在设计无线传感器网络路由协议时,在保证网络连通和数据的正常传输的情况下,保证各个节点能量消耗最少、网络能量的均衡消耗有着极其重要的意义。下面我们分别从传感器耗能分析、节点各模块的设计及流量规划的角度来对无线传感器网络节能进行论述。

##### 3.1.1 传感器网络耗能分析

由于传感器节点体积微小,能量有限,节点消耗能量的模块主要包括:传感器模块、处理器模块和无线通信模块<sup>[35]</sup>。随着集成电路工艺的进步,处理器和传感器模块的功耗变得很低,绝大部分能量消耗在无线通信模块上。下图 3.1 是 Deborah Estrin 在 Mobicom 2002 会议的特邀报告(Wireless Sensor Networks, Part IV: Sensor Networks Protocols)<sup>[36]</sup>中所述传感器节点各部分能量消耗的情况,从图 3.1 中可知,传感器节点的大部分能量消耗在无线通信模块,而且节点在进行数据发送、接收和等待过程中能量消耗最多,而当节点的处于休眠状态,也即关闭通信模块时,能量的消耗相对较少。传感器节点传输信息时要比执行计算时更消耗电能,传输 1 比特信息 100m 距离需要的能量大概相当于执行 3000 条计算指令消耗的能量。

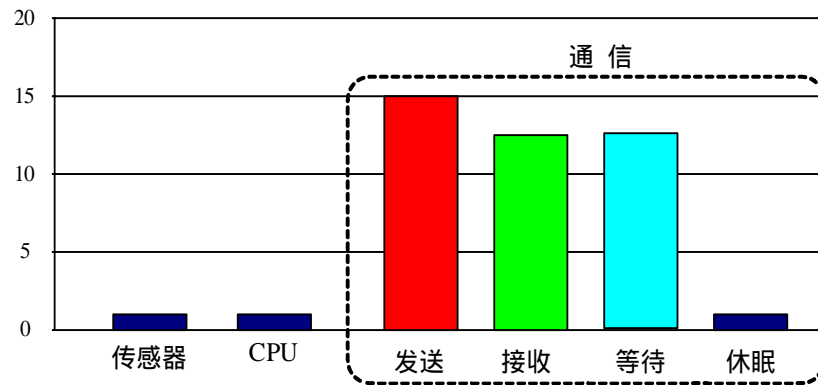


图3.1 传感器节点各部分能量消耗情况

### 3.1.2 传感器网络节能措施

#### 3.1.2.1 通信模块低功耗设计

从图 3.1 可以看出,无线通信能量消耗占据无线传感器网络能耗主要部分,因此,对无线收发系统的能耗管理非常重要,通常我们可以采取以下措施来减少通信模块的能量损耗。

##### (1) 减少通信流量

通过减少通信模块发送和接收的比特数,能降低通信模块的能耗。减少通信流量的方法有以下几种:

##### 1) 本地计算和数据融合<sup>[37]</sup>

对传感器节点采集的原始数据和各个节点汇集的相关数据进行处理,发送有用信息,可以有效减少通信量;

##### 2) 减少冲突

如果两帧同时发送,它们会相互重叠,结果导致接收到的信号难以辨认,需要重传才能把信息正确发送到目的地。冲突引起的重传造成很大的能量浪费,减少冲突可以有效节约能量;

##### 3) 增加错误检测和校正机制

增加错误检测可以尽早发现错误,校正机制可以校正少量比特错误的数据包。错误检测和校正机制可以在给定误码率( bit error rate, BER)的条件下有效减少数据包的重传,从而降低能耗;

##### 4) 减少控制包的开销和包头长度

网络协议需要控制包和包头来维护其正常运行,但控制包和包头并不是用户所需的数据,应尽量减少控制包的数量,减小包头长度,从而降低能耗。

##### (2) 增加休眠时间

无线通信模块存在发送、接收、空闲和睡眠 4 种状态。无线通信模块在空闲状态

一直监听无线信道的使用情况,检查是否有数据发送给自己,而在睡眠状态则关闭通信模块。从图 3.1 中可以看到:无线通信模块在发送状态的能量消耗最大,而在空闲状态和接收状态的能量消耗接近,略少于发送状态的能量消耗,在睡眠状态的能量消耗最少。如何让网络通信更有效率,减少不必要的转发和接收,不需要通信时,尽快进入睡眠状态是传感器网络协议设计需要重点考虑的问题。

### (3) 使用多跳短距离无线通信方式

无线传感器网络中传感器节点的通信能力有限,而且节点通信能量的消耗同节点间的距离成如下关系:

$$E = kd^n \quad n \in [2,4], \text{ 且为一整数,取值大小与通信距离及通信环境相关} \quad (3.1)$$

因此在无线传感器网络中采用多跳短距离无线通信方式在一定程度上可以降低网络能量损耗。

#### 3.1.2.2 处理器模块设计

处理器模块是无线传感器节点的计算核心,所有的设备控制、任务调度、能量计算和功能协调、通信协议、数据整合和数据转储程序都将在这个模块的支持下完成。低功耗设计中,传感器节点使用的处理器应该满足功耗低,且支持睡眠模式。处理器功耗主要由工作电压、运行时钟、内部逻辑复杂度以及制作工艺决定,工作电压越高、运行时钟越快,其功耗也越大;睡眠模式直接关系到节点的生命周期的长短。根据现在电池技术的发展水平,要使节点在正常工作状态下保持长时间工作是很困难的。目前使用 5 号电池供给单片机的无线传感器节点,满负荷工作只能持续十几个小时,为了让这样的系统工作一年的时间,系统需要在绝大多数时间内处在待机或者睡眠状态,这就要求处理器必须支持超低功耗的睡眠状态。随着低功耗电路和系统设计技术的提高,目前已经开发出很多超低功耗微处理器,除了降低处理器的绝对功耗以外,现代处理器还支持模块化供电和动态频率调节功能。利用这些处理器的特性,传感器节点的操作系统设计了动态能量管理(dynamic power management)和动态电压调节<sup>[38]</sup>(dynamic voltage scaling)模块,可以更有效地利用节点的各种资源。动态能量管理是当节点周围没有感兴趣的事件发生时,部分模块处于空闲状态,把这些组件关掉或调到更低能耗的睡眠状态。动态电压调节是当计算负载较低时,通过降低微处理器的工作电压和频率来降低处理能力,从而节约微处理器的能耗,很多处理器(如 Strong ARM)都支持电压频率调节。

#### 3.1.3 节能路由机制设计——流量规划节能

由于传感器的拓扑结构相对稳定,并且具有 sink 节点采集数据的特性,很适合用网络流规划理论来对进行描述,因此基于网络流规划的节能路由研究近年来逐渐引起了人们的重视,文献<sup>[39]</sup>详细讨论了各种网络流规划问题的求解算法,文献<sup>[40]</sup>将传感



器网络节能路由归结为一个最大网络并发流问题,张磊也在他的博士论文中提出基于网络流规划理论的节能路由算法<sup>[41]</sup>。在论文中,他将该问题描述如下:

给定网络拓扑结构  $G=(V,E)$ ,  $V$  代表网络中的节点集合(包括 Sink 节点),  $V-Sink$  代表网络中的传感器节点集合,  $E$  是  $V$  中所有节点之间有向边的集合。假设传感器节点均为同构节点且发送功率不可调,传感器节点的初始电源能量记为  $W$ ,发送单位流量的数据记为  $p$ , Sink 节点的电源能量没有限制,我们首先给出网络生存时间的定义。

定义 1: 网络中节点  $i$  的生存时间  $T_i$  定义为:

$$T_i = \frac{W}{p \sum_{(i,j) \in E} f_{i,j}} \quad (3.2)$$

其中  $f_{i,j}$  是有向边  $(i,j)$  上的流量。传感器网络的生存时间  $T$  定义为第一个节点失效时的时间,即网络所有节点生存时间的最小值:

$$T = \min_{i \in V} T_i = \min_{i \in V} \left( \frac{W}{p \sum_{(i,j) \in E} f_{i,j}} \right) \quad (3.3)$$

根据上述定义,传感器网络的节能路由问题可以描述为:已知节点的数据采集速率  $f_i$ ,确定网络中每条有向边的流量  $f_{i,j}$ ,使得网络的生存时间  $T$  达到最大值。我们将其记作 ECR 问题 (Energy Conserving Routing Problem),可以用下面的非线性规划来描述: Problem ECR。

$$\begin{aligned} & \text{Max} \quad T \\ & \sum_{(i,j) \in E} f_{i,j} - \sum_{(k,j) \in E} f_{k,j} = f_i \quad i \in V - Sink \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$pT \sum_{(i,j) \in E} f_{i,j} \leq W \quad i \in V - Sink \quad (3.5)$$

$$f_{i,j} \geq 0 \quad (i,j) \in E$$

非线性规划的目标是最大化  $T$ ,约束条件(3.4)表示进出一个节点的流量守恒,约束条件(3.5)是节点的电源能量限制,由于在无线传感器网络中,节点接收数据时的能量消耗相对于发送数据时的能量消耗可以说是微乎其微,所以在这里仅仅考虑发送数据时的能量消耗。

#### 算法设计

由于 ECR 问题中变量数目和约束条件众多,一般的非线性规划搜索算法很难得到最优解,往往陷入局部最优解。为此我们首先考虑一个与 ECR 对应的 ECR'问题:

已知网络的生存时间  $T$  , 节点的数据采集速率  $\lambda r_i$  ( $r_i = \theta f_i$  ,  $i \in V - Sink$  ,  $\theta$  为一待定常数 , 其具体取值将在后面谈论 ) , 确定网络中每条有向边的流量  $f_{i,j}$  , 使得  $\lambda$  达到最大值。

ECR' 问题的数学形式如下 :

Problem ECR' :

$$\begin{aligned} \max \quad & \lambda \\ \sum_{(i,j) \in E} f_{(i,j)} - \sum_{(k,i) \in E} f_{k,i} &= \lambda r_i \quad i \in V - Sink \\ pT \sum_{(i,j) \in E} f_{i,j} &\leq W \quad i \in V - Sink \\ f_{i,j} &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

尽管 ECR' 与 ECR 问题在表述形式上不同 , 但是定理(3.4)说明他们的最优解之间有着密切的联系。

给定网络生存时间  $T$  , 如果  $\lambda_{\max}$  ,  $f_{i,j}^{\max}$  是 ECR' 的最优解 , 且  $\lambda_{\max} r_i = f_i$  , 给定  $T$  ,  $f_{i,j}^{\max}$  也是 ECR 问题的最优解 , 从而求得到达目的节点的最优路径。通过算法的设计 , 可以有效达到节能的目的。

## 3.2 无线传感器网络多路径技术

所谓多路径路由是指通过一定的约束规则 , 在网络中找出到目的节点的多条路径 , 然后在这多条路径之间合理地分配负载 , 从而达到快速路由的目的<sup>[42]</sup>。在无线传感器网络中采用多路径路由可以有效地减少拥塞 , 保持路由的健壮性 , 均衡网络负载 , 增加网络的吞吐量 , 同时它的实现也有利于数据在中间节点的融合 , 在一定程度上对抗网络拓扑的动态变化。

### 3.2.1 单路径路由策略与多路径路由策略的比较

#### 3.2.1.1 最优路径与次优路径

最优路径在某一网络拓扑中一般存在以下三种最优路径形式<sup>[43]</sup> : 网络中从单一始点到另一指定节点的一对一的最优路径问题 , 网络中从单一始点到其他各个节点的一对多的最优路径问题 , 以及所有任意两节点间的多对多的最优路径问题。针对上述三种路由问题 , 目前已有很经典的路由算法进行应用 , 上述前两个问题都可以通过 Dijkstra 算法来实现 , 即第一个问题是第二个问题的一个特例 , Floyd 图示矩阵算法可以解决任意两节点间的最优路径问题 , 任意两点间的最优路径对于传感器网络来说不存在现实意义。传感器网络是一个应用相关的网络 , 所提到最优路径只是在某一标准衡量下的得到的 , 而这个标准是否合理以及这个标准是否会随着网络状态的变化而变化都会影响到这条所谓的最优路径 , 所以很多情况下讨论 WSN 最优路径并不总是很

有意义。

#### 3.2.1.2 单条路径与多条路径

网络状态信息的非精确性和不确定性是无线传感器网络的一个重要特征。路由技术的研究是离不开网络状态信息的<sup>[44]</sup>，如邻居节点可达性、链路剩余带宽、链路传输延时、节点排队延时等。随着网络规模和复杂度的增加，网络参数的所有信息一般是不可得到的，对于无线传感器网络来说而且是不必要全部得到的。事实上，网络中的每一个节点都不可能拥有整个网络瞬时和详细的节点链路信息。因此，路由算法只能依靠部分或近似的网络状态信息去进行路由选择，但在动态网络中全局状态信息本质上存在不精确性。造成网络状态信息非精确性的主要原因有：

（1）网络状态信息的传播延时。网络节点和链路状态信息的改变需通过网络传播到网络其它节点，由于到每个节点的传播距离是不一致的，因此每个节点不可能同时获得网络状态信息，由此而引起了网络状态信息的不精确性。随着网络规模的扩大，网络状态信息的不精确性程度将加大。

（2）网络状态更新策略。距离矢量（或链路状态）协议周期性地或依照某种策略更新网络状态信息，无线传感器网络中，网络状态的更新一般靠 Sink 节点驱动，这就存在着更新频率和网络开销之间的平衡。网络更新越频繁，网络状态越精确，而网络开销就越大。在大规模网络中。随时更新网络全局状态信息将会带来庞大的网络开销，直接影响网络性能，因而是不可行的。

（3）网络的分层结构。网络的层次聚合引起大量状态信息丢失是不能忽视的，网络高层在作决断时，缺乏底层具体物理网络状态信息的支持。随着网络规模的增大，这种层次聚合引起的网络状态信息不精确程度也越来越大。

因此，研究基于非精确网络状态下的路由算法在无线传感器网络中具有现实的意义，许多路由技术都是在源节点与目的节点寻求单一的优化路径，即使在源节点和目的节点之间存在可替换的、次优的路径，路由算法也会选择最优的路径，这一方法可能使单条路径上的资源耗尽并可能带来路由振荡。在多路径路由情况下，同一源节点与目的节点之间的流量可以被指定给不同的路径，从而能消除某些路径上的路由振荡问题，或者将同一源与目的之间的数据报文复制副本到不同的路径，通过冗余数据在一定程度上维持路由的健壮性，同时利用多路径进行数据传输可以解决由非精确链路状态信息所引起的问题。此外，由于网络状态信息的非精确性，使得按照传统路由算法在某一时刻依据某一条件建立起来的最佳路由往往不是最佳的，而且这条单一路径上容易出现局部拥塞，导致传输丢包率急剧上升。多路径路由设计可算出多条可行的路径，目的之一是保持路由的健壮性，其二，能有效的平衡网络负载。对于无线传感器网络来说，多路径路由实现方式也是研究的一个很重要的方面，这不仅有利于数据

在中间节点的融合，同时也在一定程度上对抗网络拓扑的动态变化。

单条路径和多条路径是路由具体算法的不同表现形式，在无线传感器网络中，单路径设计需要很大的路由重建开销，多路径设计不需要频繁的路由重建，但会占用更多的网络资源。

### 3.2.1.3 固定选路与概率选路

在无线传感器网络中，中间的传感器节点既是数据采集节点，同时也在扮演路由器的角色，数据转发在选路的过程中，转发的依据和传统的网络不大一样，传统的网络维持较复杂的路由表，可以依据路由表信息来方便的选择路径，传感器网络则不同，选路方面更多的体现在对邻居临时列表的相关信息的把握。

路由代价信息建立后，节点不管以静态方式还是动态方式都需要存储相关路由信息，固定选路即从该信息中以算法确定的方式选择下一跳节点，而概率选路则以一定的概率从可选择的集合中进行选取，两种方法不同点在于，固定选路即在网络运营的时间内，都几乎以一个规则使用路径信息，概率选路较灵活，它可根据网络当前状态信息变化以概率选择不同的路径，比较适合动态网络的特征。

### 3.2.2 多路径研究现状

在无线网络中，为保证数据传输的可靠性，有效均衡网络负载，多路径的研究日益引起科研人员的关注，其中 Rahul C. Shal<sup>[7]</sup>等人提出了一种能量多路径路由机制；Ganesan D<sup>[10]</sup>等人提出两种多路径——不相交路径（disjoint multi-path）和缠绕多路径（braid multi-path）的建立方法；S Ramasubramanian 等<sup>[45]</sup>提出采用 colored trees 来建立多条不相交路径；Lee S J<sup>[46, 47]</sup>提出在分离多路径路由（SMR: Split Multi-path Routing）中构建多条最大不相交路径进行数据的传输；Tom Goff<sup>[48]</sup>等提出一种建立预测路径进行数据的可靠传输，保证路径在失效后在最短时间内恢复数据的传输；Vasu Jolly 等提出基于标签转发的可靠多路径信息转发<sup>[49]</sup>（RM-IDLF）来实现源节点和汇聚节点间多路径的建立；Jinglun Shi 提出的能量高效多路径路由算法<sup>[50]</sup>通过构造中间节点的梯度数组来建立多条不相交路径，De S<sup>[51]</sup>等人提出网格多路径路由（Meshed multipath routing）来构建多路径；舒炎泰等人提出多径源路由<sup>[52]</sup>（MDSR）对 DSR 中的路由搜索及路由维护进行扩展；陈晋伦、周正等人提出一种具有能量感知的多路径 Ad hoc 路由算法<sup>[53]</sup>来保证数据的可靠传输，延长网络的生存周期，。这些研究通过构建多条路径在一定程度上可以很好地均衡网络负载，比较平均地消耗网络能量，延长网络生命周期。下面我们分别从多路径的分类、构建等方面展开论述。

#### 3.2.2.1 多路径分类

多路径在分类上主要分为不相交路径（也称非交叉路径 disjoint/split multi-path）与相交路径（也称为缠绕多路径），所谓不相交路径是指多条路径除了具有共同的目

的节点和源节点外，不会共享其它任何节点和链路的多条路径（见下图 3.2.(a)）；相交路径又分为共享链路的交叉路径和共享节点的交叉路径（见下图 3.2.(b), 3.2.(c)），共享链路的交叉路径是多条路径之间有共用的链路，而共享节点的交叉路径则是指多条路径间存在有共享节点，共享节点的路径未必共享链路，但共享链路的路径必共享节点。相交路径主要优点是路由发现的约束条件少，而不相交路径可提供更多的资源及更高的容错能力，但构建不易。

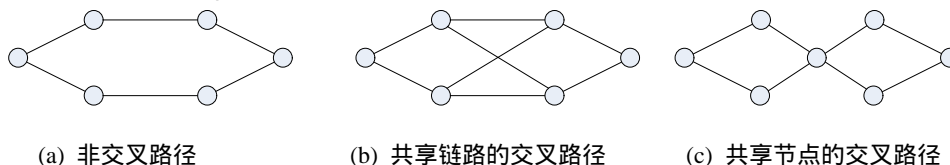


图 3.2 典型交叉/非交叉路径

### 3.2.2.2 多路径的构建

Ganesan D<sup>[10]</sup>提出一种基于 DD 机制的不相交路径建立方法：汇聚节点首先通过主路径增强消息后建立主路径；然后发送次优增强信息给次优节点 A，节点 A 再选择自己的次优节点 B，把次优增强信息传递下去；如果 B 在主路径上，则 B 发回否定增强信息给 A，A 向次优节点传递次优路径增强信息；如果 B 不在主路径上，则 B 继续传递次优路径增强信息，直到构造一条次优路径。按照同样的方法，可以继续构造下一条次优路径，整个建立过程如下图 3.3。由于不相交路径建立时的种种要求，所构造出来的不相交多路径在进行数据传输过程中所花费的代价的差异往往很大，备用路径往往比主路径长很多，为此提出缠绕多路径的概念，理想的缠绕多路径示意图如下图 3.4 (a)所示，图 3.4 (b)是一种局部缠绕多路径的示意图，其构建过程如下：在建立主路径后，主路径上的每一个节点（除了源端和靠近源端的节点）都要发送备用路径增强信息给自己的次优节点（记为 A），次优节点 A 再寻找其最优节点（记为 B）传播该备用路径增强消息。如果节点 B 不在主路径上，将继续向自己的最优节点传播，直到与主路径相交成一条新的备用路径。

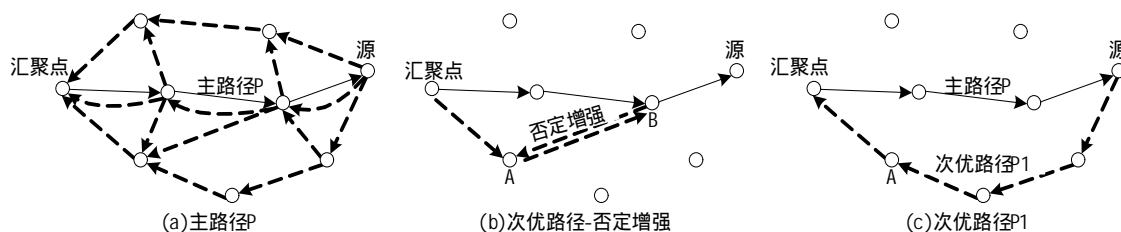


图3.3 局部不相交路径路径的构建

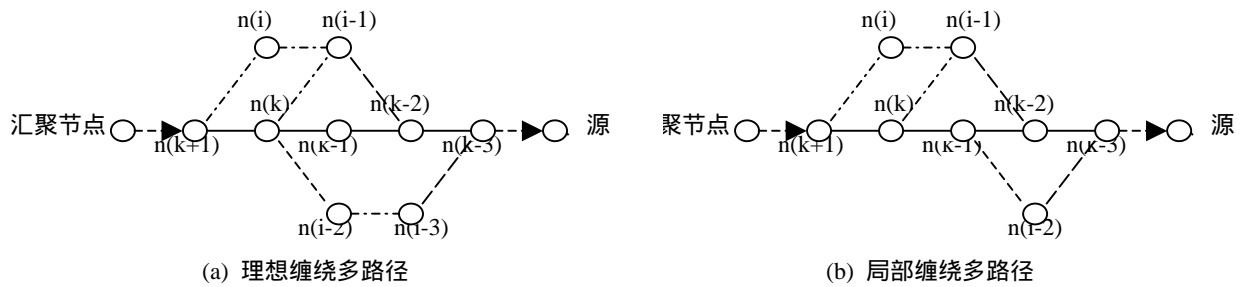


图 3.4 缠绕多路径

S Ramasubramanian 等<sup>[45]</sup>提出采用 colored trees 来建立多条不相交路径：每个节点将仅保存两个邻近节点 (preferred nodes)，而且对其赋予两种不同的“颜色” (red & blue)，这些中间节点将根据发送包的颜色决定将包交给哪一个邻近节点 (见下图)；这样通过颜色的不同在客观上构建了两条不相交路径。

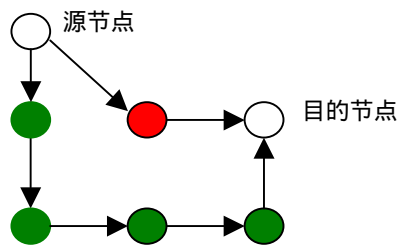


图 3.5 利用 colored tree 建立不相交多路径

Vasu Jolly 等提出基于标签转发的可靠多路径信息转发<sup>[49]</sup> (RM-IDLF)，其中将多路径的建立分为三个阶段：标签传播阶段、请求传播阶段及数据传送阶段。这里所谓的标签是指源节点监听事件后对所得到的数据进行描述的信息，它比真正的数据包要小很多。RM-IDLF 的路由建立过程是由源节点发起的，在标签传播阶段，源节点将标签广播到邻居节点，邻居节点收到标签后，检查自己的标签表，如果该标签在表中已有记录，则丢弃该标签，否则将该标签存储至标签表，且对其进行转发，通过这种洪泛的方式，标签传送到汇聚节点或转发节点不再有邻居节点方停止传播；汇聚节点收到标签后，若是对该事件感兴趣，则沿着最先收到该标签的路径返回一个数据传播请求要求进行数据的传输；在数据传输阶段，源节点将数据沿着 REQ 传输的路径进行数据的传播，同时源节点再次发送一个新的标签，启动一条新的不相交路径的建立过程，中间的节点若已在数据传输路径上，则拒绝转发这个标签，通过这种路由机制建立多条不相交路径。

Jinglun Shi 提出的能量高效多路径路由算法<sup>[50]</sup>也是基于 DD 机制，该算法通过构造中间节点的梯度数组来建立多条不相交路径：中间节点保存一个邻居节点表，该节点表反映了节点周围的拓扑状况，节点在收到路由发现信息后将其转发给具有最小时

间延迟的邻居节点。节点不转发来自不同邻居节点的同样路由发现信息，因此当有节点的邻居节点拒绝转发路由发现信息时，该节点根据自己的梯度数组把该信息转发给自己的具有次小时间延迟的邻居节点；若是节点收到从所有邻居节点返回的拒绝转发路由发现信息时，该节点就放弃转发路由发现信息，同时删除该梯度数组；最后通过不同的梯度加强信息来形成多路径。

### 3.2.2.3 多路径路由容错比较

在以上分析的多路径构建过程中，我们根据路径是否分主次对所构建的多路径的优缺点及需改进的地方进行小结，见下表 3.1：

**表 3.1 多路径路由容错比较**

类 型	优 点	缺 点	该 进
路径分主次	控制拥塞、节能	需要维护路由表	建立局部缠绕多路径
路径不分主次	不需要维护路由表	能量消耗大	定向洪泛

### 3.2.3 能量多路径路由及其评估

在无线传感器网络中，为了避免频繁使用同一条路径进行数据传输而造成该路径上的节点因能量消耗过快导致其早衰以及由此而引发的网络的分割和网络生命周期的缩短，Rahul C. Shah 等人提出了一种能量多路由机制<sup>[9]</sup>，该机制多核心是在源节点和目的节点之间建立多条路径，根据路径上节点的通信能量消耗以及节点的剩余能量情况，给每条路径赋予一定的选择概率，使得数据传输均衡地消耗整个网络的能量，延长整个网络的生存期。

能量多路径路由协议包括路径建立、数据传播和路由维护三个过程。路径建立过程是该协议的重点内容。每个节点需要知道到达目的节点的所有下一条节点，并计算选择每个下一跳节点传输数据的概率。概率的选择是根据节点到目的节点的通信代价来计算的，在下面的描述中用  $Cost(N_i)$  表示节点  $i$  到目的节点的通信代价。因为每个节点到达目的节点的路径很多，所以这个代价值是各个路径的加权平均值。能量多路径路由的主要过程描述如下：

目的节点向邻居节点广播路径建立消息，启动路径建立过程。路径建立消息中包括一个代价域，表示发出该消息的节点到目的节点路径上的能量信息，初始值设为零。

当节点收到邻居节点发送的路径建立消息时，相对发送该消息的邻居节点，只有当自己距源节点更近，而且距目的节点更远的环境下才需要转发该消息，否则将丢弃该消息。

如果节点决定转发路径建立消息，需要计算新的代价值来替换原来的代价值。当路径建立消息从节点  $N_i$  发送到节点  $N_j$  时，该路径的通信代价为节点  $i$  的代价值加上

两个节点间的通信能量消耗，即：

$$C_{N_j, N_i} = Cost(N_i) + Metric(N_j, N_i) \quad (3.7)$$

其中，表示  $C_{N_j, N_i}$  节点  $N_j$  发送数据经由节点  $N_i$  路径到达目的节点的代价， $Metric(N_j, N_i)$  表示节点  $N_j$  到节点  $N_i$  的通信能量消耗，计算公式如下：

$$Metric(N_j, N_i) = e_{ij}^\alpha R_i^\beta \quad (3.8)$$

这里  $e_{ij}^\alpha$  表示节点  $N_j$  和  $N_i$  直接通信能量消耗， $R_i^\beta$  表示节点  $N_i$  的剩余能量， $\alpha$ 、 $\beta$  是常量，这个度量标准综合考虑了节点的能量消耗以及节点的剩余能量。

节点要放弃代价太大的路径，节点  $j$  将节点  $i$  加入本地路由表  $FT_j$  中的条件是：

$$FT_j = \{i \mid C_{N_j, N_i} \leq \alpha(\min(C_{N_j, N_k}))\} \quad (3.9)$$

其中  $\alpha$  为大于 1 的系数参数。

节点为路由表中每个下一跳节点计算选择概率，节点选择概率与能量消耗成反比。

节点  $N_j$  使用如下公式计算选择节点  $N_i$  的概率：

$$P_{N_j, N_i} = \frac{1/C_{N_j, N_i}}{\sum_{k \in FT_j} 1/C_{N_j, N_k}} \quad (3.10)$$

节点根据路由表中每项的能量代价和下一跳节点选择概率计算本身到目的节点的代价  $Cost(N_j)$ 。 $Cost(N_j)$  定义为经由路由表中节点到达目的节点代价的平均值，即：

$$Cost(N_j) = \sum_{k \in FT_j} P_{N_j, N_k} C_{N_j, N_k} \quad (3.11)$$

节点  $N_j$  将用  $Cost(N_j)$  值替换消息中原有的代价值，然后向邻居节点广播该路由建立消息。

在数据传播阶段，对于接收的每个数据分组，节点根据概率从多个下一跳节点中选择一个节点，并将数据分组转发给该节点。路由的维护是通过周期性地从目的节点到源节点实施洪泛查询来维护所有路径的活动性。

Rahul C. Shah 提出的能量多路径路由综合考虑了通信路径上的消耗能量和剩余能量，节点根据概率在路由表中选择一个节点作为路由的下一跳节点。由于这个概率是与能量相关的，可以将通信能耗分散到多条路径上，从而可实现整个网络的能量平稳降级，最大限度地延长网络生存期。但是，协议是从网络能量的均衡消耗出发，因此对某些关键节点的保护存在着一些缺陷，此外对有些路径的利用也不够充分。

### 3.3 WSN 多路径路由机制的分析以及小结

本章针对无线传感器网络研究的热点问题之一——节能进行论述，分析网络节点



能量消耗状况，总结出当前节能所采用的主要措施；而后对无线传感器多路径研究的相关内容归纳总结，最后在分析能量多路径路由基础上，针对现存该机制不能很好地保护骨干节点这一弊端，提出采用优化的手段来消除；在接下来的下一章节我们围绕多路径的优化进行展开。

## 4 基于遗传算法的无线传感器网络多路径优化算法

无线传感器网络路由算法是 WSN 的核心，路由算法的性能直接关系到 WSN 的性能。评价一个路由算法优劣的主要标准是能否最大限度的延长 WSN 的生存时间，以及能够保证网络数据传输的稳定性、可靠性。LEACH 协议算法<sup>[54]</sup>以簇头自适应算法为中心保证了 WSN 的数据传输，但其节点能耗过大，且对网络的故障问题无法有效的进行处理，无法适应真实的 WSN 网络中故障多发的特点，多路径路由协议<sup>[55]</sup>通过建立备份路径的方式有效的对网络故障进行处理，但是维护多条路径过多的浪费了 WSN 的能量资源，而且多路径算法是在节点故障出现之后才进行处理。文献<sup>[56]</sup>提出一个有效的均衡负载算法，有效地利用节点能量资源，但其预测网络流量的算法采用马尔科夫预测算法，其预测精度很低，无法对网络故障进行及时处理。所以在此我们提出在 WSN 中采用多路径来进行数据的传输，而非在数据传输的过程中仅仅利用一条路径进行传输，其它路径仅仅作作为备用路径进行数据传输，这样一方面可以在保证数据可靠传输的同时，也可以均衡网络负载，另一方面，在一定程度上也可以降低维护路径所需要付出的代价。

经过前面的分析我们可以知道：以往提出的能量多路径路由机制没有很好地考虑到路径经过的那些节点剩余能量问题，尤其当某一条路径上的一些节点的能量已经消耗殆尽而这条路径在某一路由策略下被选为最优路径，按照那些协议的规定，此条路径仍然要进行数据的传输，这种情况下的传输将会是得不偿失的，文献<sup>[57]</sup>针对无线传感器网络中的瓶颈节点展开研究但没有提出切实可行的办法；另一种情况就是在考虑到节点剩余能量的基础上，按照每条路径上剩余能量的多少作为该路径被使用概率的参数，这种思想可以保护多路径上的一些节点，但是仍然不够充分；在此我们采用遗传算法来对路径进行优化，既可以对局部路径进行优化，充分考虑到 WSN 的分布式特性；也可以对全局的路径进行优化，从而达到下面两个目的：一是保证网络在数据传输时的可靠性；二是节能，延长网络的生命周期。

### 4.1 遗传算法与工程优化

最短路径问题是网络设计中遇到的最常见的问题之一：寻找指定两节点间总长度最短或费用最低的路径。在许多实际应用中，包括运输、路径、通信，这是一个基本的问题。然而在许多应用中，网络中的每条边都与一些评价原则有关，例如：费用和时间在运输网络中都很重要，正如在公路建设中的经济和生态因素一样。因此，很多研究都是求解双目标最短路径 (bicriteria shortest-path problem)，即寻找对于两个目标都是有效的路径。通常，不存在一条路径，能同时满足两个目标的最短路径。相反，只存在一组 Pareto 最优路径或有效路径<sup>[58]</sup>。

两目标的最短路径问题以 NP-难题著称，有效的路径集可能很庞大，可能与问题

规模成指数关系。因此，在最坏的情况下，求解问题所需要的计算量可能会随问题大小呈指数增长。当求解大规模问题时，额外难题的易处理性是十分重要的，这对于决策者而言，有效解集有十分重要的。

## 4.2 遗传算法简介

遗传算法<sup>[59]</sup>物种起源所提出的“物竞天择，适者生存”这一思想，在计算机中模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法，它和基于导数的解析方法和其他启发式搜索方法一样，都是一种迭代方法：从选定的初始解出发，通过不断迭代逐步改进当前解，直至最后搜索到最优解或者是满意解。遗传算法在步骤上主要可以分为下面几个步骤：

- 1) 将问题可行解的空间映射成染色体集合的搜索空间；
- 2) 确定适应值函数、杂交率和变异率等；
- 3) 进行选择、交叉和变异等操作；
- 4) 在新旧个体中选择优胜者形成新的种群，然后判断这些染色体是否满足要求，若没有则利用刚产生的染色体进行新一轮的选择、交叉和变异等操作.....

在这些操作进行完之后将种群中的最优染色体还原成为一个可行解作为问题的最优解。

遗传算法过程：

```
Begin
  t ← 0
  初始化 P(t)
  评 价 P(t)
  While(终止条件不满足)do
    Begin
      重组 P(t) 以产生 C(t)
      评价 C(t)
      从 P(t)和 C(t)中选择 P(t+1)
      t ← t+1
    End
  End
```

## 4.3 算法设计应用基础

由于无线传感器网络的特点之一就是网络拓扑结构不稳定，利用遗传算法在某时刻求解出到目的节点的 K 条路径，这样将实际上极不稳定的网络拓扑结构变成逻辑上相对稳定的拓扑结构，由于在节点存取了 k 条最优路径，所以在某一时刻当一条路径失效后其它路径仍然可以进行数据的传输，同时采用该路由算法对失效的路径进行局部修复和优化，然后将修复的结果返回给源节点。这样源节点就无需在路径出现故障后再次发出路由请求，从而在一定程度上可以减少路由开销，达到节能的目的。

## 4.4 算法实现

在设计之前，我们首先进行如下定义和声明：

设无向离散图  $G=(V, E)$ ， $V$  表示节点的集合， $E$  表示边的集合，各边赋予权值  $\text{cost}(i)$  以示这两点之间进行通信所要付出的代价， $V_0$  表示源节点， $V_t$  表示目的节点，对于中间节点  $V_i$  剩余能量的度量按照许力<sup>[60]</sup>提出的 Ad Hoc 网络能量感知协议中所定义的做如下声明：

$$R = \frac{\text{电池剩余能量}}{\text{电池初始能量}} \quad (4.1)$$

此外，定义了  $r_1$ ， $r_2$  两级阈值，其中  $r_1 < r_2$ 。当某个节点的  $R$  值小于  $r_2$  时，经过它的路径的概率降低，对该节点将对它所在的路径进行局部的优化，并允许该路径被其他的路由取代，在它的邻居节点查找符合条件的替代节点，并通知它的上下游节点实现本地路径的更新和替代；当某个节点的电池能量小于  $r_1$  时，该节点只为自己作为源节点或目的节点的路径服务。

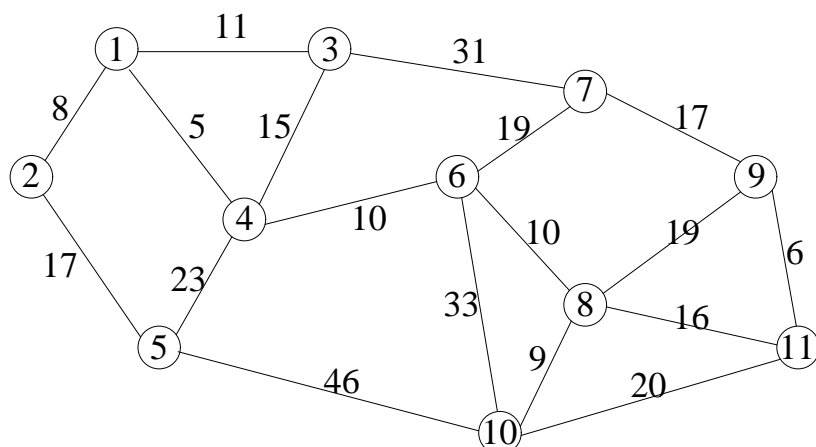


图 4.1 离散图

### 4.4.1 染色体编码

在设计中，我们采用源节点到目的节点或者是中间节点之间的路径作为染色体进行编码，由于在源节点和目的节点之间可能存在多条路径，这些路径的所经过的节点数目极有可能不等，所以我们采用可变长度的染色体编码，如在上图 5.1 中源节点 1 到目的节点 11 之间的两条路径

1 3 7 9 11

1 3 4 6 8 11

可以分别编码为

染色体  $P_1$ : 1 3 7 9 11

记为:  $a_1 a_2 a_3 a_4 a_5$

染色体  $P_2$ : 1 3 4 6 8 11

记为:  $b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 b_6$

在染色体选择的过程中，节点要先与阈值进行比较：当某一节点的  $R < r_1$  时，该

节点只有在作为源节点或目的节点才将其作为染色体的一部分；当  $r1 < R < r2$  时，我们尽量减少该节点的使用，这一点在下面适应值函数中进一步进行说明。

#### 4.4.2 适应函数的选取

由于在无线传感器网络中能量的消耗很重要，因此在算法的设计过程中，我们采用如下函数作为适应函数：

$$Fitness = \begin{cases} \alpha \times \frac{1}{\sum_{i=1}^s \cos t(i)} + \beta \times (1 - \alpha) \times \min(R_{vi}) & R > r2 \\ \alpha \times \frac{1}{\sum_{i=1}^s \cos t(i)} + (1 - \alpha) \times \min(R_{vi}) & r2 > R > r1 \\ \alpha \times \frac{1}{\sum_{i=1}^s \cos t(i)} - 1000 \times (1 - \alpha) \times \min(R_{vi}) & R < r1 \end{cases} \quad (4.1)$$

其中： $s$  表示从目的源节点（记为  $V_0$ ）到目的节点（记为  $V_t$ ）之间所经过的节点数目， $\cos t$  表示从节点  $(i-1)$  到节点  $i$  的代价，也就是两点间进行单位数据传输时的能量消耗。在同等条件下，能量消耗越少，适应值就越大。 $\alpha$  为该条路径能量消耗和该路径上剩余能量最小值的一个均衡值。 $\beta$  以及上面的 1000 都是一个奖惩系数， $\beta$  为大于 1 的一个奖励系数，可以由用户自己来进行设定，它表示对哪些能量值较高的路径赋予更高的适应值。1000 作为一个惩罚系数，这里用它是用来表明在一个节点的能量值很低的时候，只有在极其特殊的情况下才用它们作为路径上的一部分。适应函数值越大，表明该条路径的生存能力越强。

#### 4.4.3 交叉

交叉在遗传算法中起着核心作用，新路径的产生往往靠的就是交叉操作，交叉分为单点交叉、两点交叉、均匀交叉和多点交叉，设计中我们采用单点交叉，即根据长度挑选出来的染色体，随即产生一个交叉位置，比如在上面的两条染色体中我们假设随即产生的交叉位置为 2 则交叉后的结果为：

染色体  $P_1^{new}$  : 1 3 4 6 8 11      记为： $a_1$   $a_2$   $b_3$   $b_4$   $b_5$   $b_6$

染色体  $P_2^{new}$  : 1 3 7 9 11      记为： $b_1$   $b_2$   $a_3$   $a_4$   $a_5$

在交叉的过程有可能出现随即产生的交叉位置后，染色体  $P_1$  不能够与染色体  $P_2$  进行连接（如我们假设上面  $a_2$  和  $b_3$  无法进行连接），这种情况出现后，则依次向后查找，若是在这样一系列过程完成后没有形成一条新的染色体，则染色体  $P_1$  与染色体  $P_2$  交叉失败，再选择两条染色体进行交叉。

此外在交叉过程中可能会形成环路，如交叉后的一条新的染色体为

1 4 3 7 6 4 5 10 11

此时消除重复基因即可，如上面消除重复基因块后的结果为：

1 4 5 10 11

#### 4.4.4 变异

生物的基因产生变异后产生的适应环境的基因是促进生物更好适应环境的重要因素，对于路径表示的染色体，变异操作把连接点组成的路径作为基因块，实现染色体的基因块变异，也就是用两个节点之间的其他路径来代替当前路径，如有下面一段经过交叉后的染色体：1 3 7 6 8 11，不妨设（3 7 6 8）这段基因块发生了变异，变异后的结果形式如（3 X 8），其中（3 7 6 8）（3 4 6 8）就是此形式中的两种。在此过程中若产生环路才用前面同样的方法进行消除。

#### 4.4.5 新一代种群的选择

最后进行新的种群筛选：在源染色体、交叉后产生的染色体以及变异后的染色体中选择那些具有优良品性的染色体（即适应值 Fitness 最大的那些染色体）作为新一代的种群。在种群世代更新过程中有可能产生同样的染色体，此时要消除同样的染色体，这样经过若干代的进化后，即可以得到我们所要求的前 K 条最佳路径。

### 4.5 算法性能分析

我们采用实验的手段对优化后的性能进行分析，在实验中采用的算法各参数设计为：种群规模 50，变异率为 0.05，进化终止代数 100，所求多路径数目为 3，r1 取值为 0.2，r2 取值为 0.4。动态变化的试验场景是由 NS2（实验中所用版本为 ns2.29）下所带的场景生成器生成，该工具位于~ns/indep-utils/cmu-scen-gen/setdest/下。

#### 4.5.1 NS2 简介

NS2（Network Simulator, version 2）是由 UC Berkley 大学开发的一种针对网络技术的源代码公开的、免费的软件模拟平台，研究人员使用它可以很容易的进行网络技术的开发。而且发展到今天，它所包含的模块已经非常丰富，几乎涉及到了网络技术的所有方面，目前它已成为学术界广泛使用的一种网络模拟软件。同时，该仿真器支持用户添加个人定义的协议，便于科研人员模拟仿真个人所写的一些协议。NS 本质上是一个离散事件模拟器，它本身有一个虚拟时钟，所有的仿真都由离散事件驱动的。

在 NS 进行模拟前，首先要分析模拟涉及哪个层次。NS 模拟分为两个层次：一个是基于 Otcl 编程层次，利用 NS 已有的网络元素实现模拟，无需对 NS 本身进行任何修改，只要编写 Otcl 脚本；另一个层次是基于 C++和 Otcl 编程层次，如果 NS 中没有所需要的网络元素，首先要对 NS 进行扩展，添加所需的网络元素，也就是添加一

系列新的 C++类和 Otcl 类。整个模拟过程如下图：

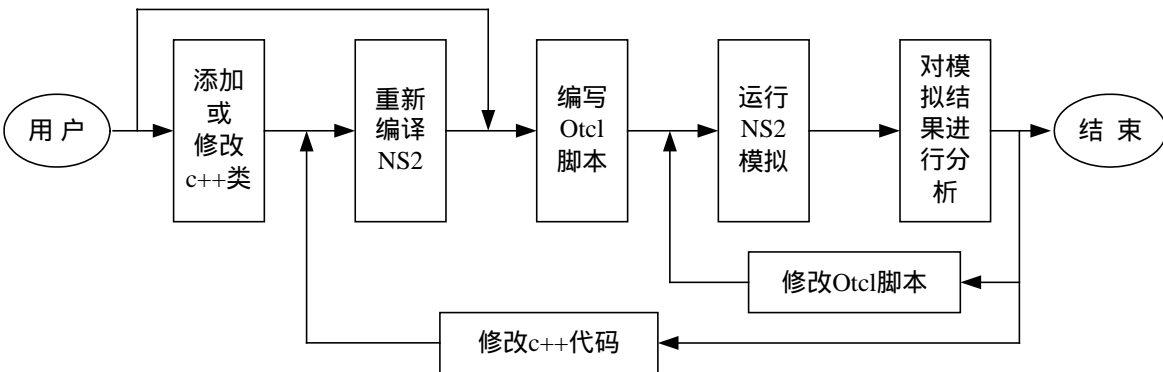


图 4.2 利用 NS 进行网络模拟的过程

4.5.2setdest 简介

setdest 是 CMU 大学在 NS 中提供的无线网络模拟模块是提供的一个工具，可以生成无线网所学要节点运动场景，即一定数量的节点在某个固定大小的矩形区域中随机朝某个目的节点运动，在达到该目的地后做一段时间的停留（也可以不停留）后选择另一个目的地随机选择一个速度继续运动。setdest 命令格式如下：

```
./setdest -v <1> -n <> -p <> -M <> -t <> -x <> -y <> <outdir>/<fileName>  
或  
./setdest -v <2> -n <> -s <> -m <> -M <> -t <> -P <> -p <> -x <> -y <>
```

表 4.1 setdest 命令参数及所代表含义

参 数	代 表 含 义 及 说 明
-v	版本号，其后面的参数可以填写 1 或 2，分别是 1999 年及 2003 年所出版本
-n	场景中节点数目
-p	指定节点在运动到一个目的地后停留的时间，若设为 0 表示节点不停留
-M	节点移动的最大速度
-m	版本 2 所有，节点移动的最小速度
-t	仿真持续时间
-x	指定节点运动区域的长度(x 轴方向，单位为 m)
-y	指定节点运动区域的宽度(y 轴方向，单位为 m)
-P	版本 2 所有，停留类型(pause type)
-s	版本 2 所有，速度类型(speed type)
Outdir/fileName	可选项，表示将所生成的场景输到 fileName 文件，并存放在 outdir 目录下面

无线传感器网络的拓扑结构相对比较稳定，其拓扑结构的变化主要源自节点工作状态的切换，因此在生成场景所设置的-M 参数不宜太大，节点停留时间要适中。

### 4.5.3 算法收敛性分析

实验中我们采用的网络拓扑结构图见下图 4.3，实验场景大小为  $1200\text{m} \times 1200\text{m}$ ，为更好地模拟算法性能，设定各节点的初始能量不相同。我们首先利用遗传算法搜索源节点 10(190, 1066)到目的节点 19(670, 397)的 3 条路径，而后通过与采用 Dijkstra 算法求得图 4.3 中节点 10 到节点 19 间的 3 条最优路径对比，实验结果显示两者所生成的路径是相同的。

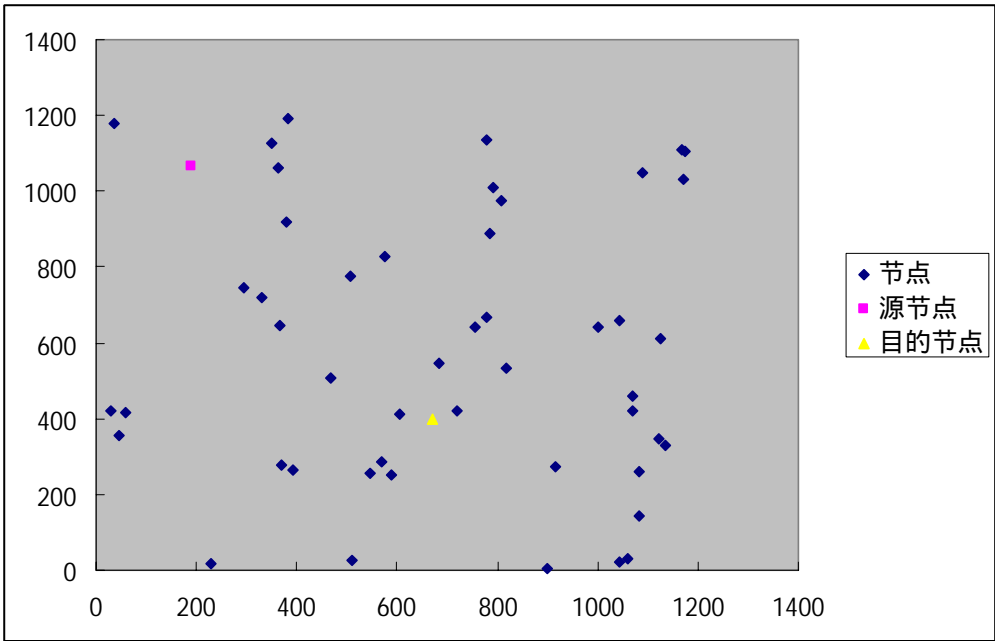


图 4.3 模拟网络拓扑结构图

为验证遗传算法在路径优化过程的收敛性，应用本算法求上面所生成的网络中两点间的 3 条最优路径，分别运行算法 20 次，搜索前三条最优路径迭代次数如下表 4.2 所示。由于这里节点源 10 和目的节点 19 的选择具有任意性，所以从实验结果可以看出该算法在 WSN 应用时其收敛性很好。

表 4.2 搜索前 3 条路径迭代次数

路径号	1	2	3
次 数	18	20	20

### 4.5.4 节点耗能分析

为检验算法在均衡消耗网络能量的性能，实验中对场景进行如下设置：各节点的初始化能量设为 10J，感知节点每次采集生成的数据量为 4096byte，分别用优化前后



的多路径路由进行数据的传输。实验结果着重分析存活节点数量与时间的关系（见图 4.4）及网络能量消耗与时间的关系（见图 4.5）。

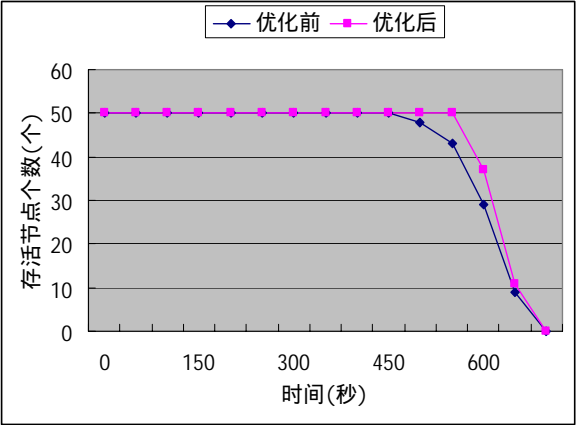


图 4.4 存活节点与时间关系图

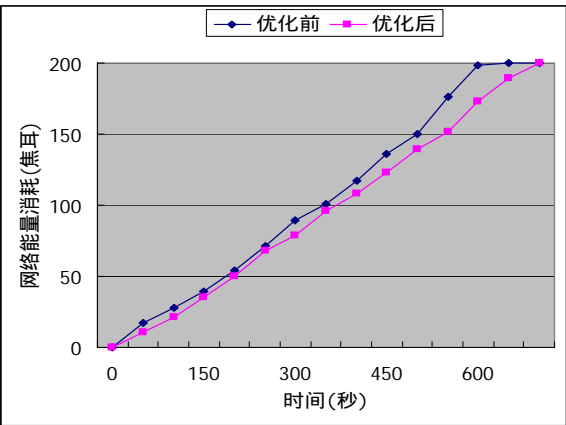


图 4.5 网络能耗与时间关系图

从图 4.4 实验统计结果可以看出：在 450s 以内，均未发生存活节点的减少，在 450s 以后，由于在优化过程中我们引入两级阈值对节点的能量进行感知，从而使得优化后存活节点的数量明显多于优化前；在 550s 以后，优化后存活节点的数量递减速率超过优化前；这个结果说明对路径的优化有效地均衡了网络能量的消耗。图 4.5 为优化前后网络能耗统计图。全网的初始化能量为 200J，从实验结果可以看出，优化后五十是同样时刻的能耗，还是全网的生命周期，都表现出较好的性能，网络的生命周期有所延长。

#### 4.5.5 性能分析小结

在传统的路由机制中，往往采用的是用一条路径来进行数据的传输，而这条路径的产生往往采用的是 Dijkstra 算法或者是这种算法的改进所得到，虽然此路径在以某一权值来进行衡量时是最优的，但是由于种种因素的制约，往往使得单条路径在数据传输的过程中显得力不从心。而在该算法中，阈值值的引入使得 WSN 中的节点最大程度地延长寿命，同时用遗传算法对源节点和目的节点之间的路径以及局部路径的优化，使得在不影响数据传输的同时，也保证了网络整体能量的均衡和最小消耗。对于遗传算法在求  $k$  条最优路径的收敛性，马炫<sup>[61]</sup>在他的论文中用做实验的方式进行说明，实验结果证明这种算法的收敛性很好。

#### 4.6 算法小结

在无线传感器网络中，当前的路由机制大多都采取利用单条路径来进行数据的传输，采用此路由机制很容易使得某些节点能量过度消耗而提前衰亡，一方面会造成无线传感器网络的分割，另一方面也使得网络在面对攻击或其他一些灾害时残存性较差，为此我们采用遗传算法来对源节点到目的节点以及不同的中间节点的多条路径进

行优化，一方面保证了网络能量的均衡消耗，延长网络生命周期；另一方面在部分程度上也保护网络的骨干节点。

## 5 基于容载检测的可靠多路径路由算法

在无线传感器网络中,如何保证数据传输的可靠性也是科研人员关心的一个热点问题,在某些特殊应用场合,数据的可靠传输甚至比网络能量的消耗更为重要。传感器节点由于有限的能量供应和工作环境的恶劣经常面临着失效的问题,这为研究适合于无线传感器网络的可靠路由协议增加了难度。无线传感器网络中数据传输的可靠性主要受三个因素的影响:1)无线信道的传输差错率;2)网络的拥塞情况以及中继节点的过载状况;3)接收机处理分组的效率;这三个因素综合作用,从不同方面影响数据包的丢弃率,最终影响数据传输的可靠性。本章节主要从均衡网络负载的角度进行考虑,建立一种新的路由机制来保证数据传输的可靠性,降低数据在传输过程中的丢包率,实现网络负载均衡,降低网络能量消耗。

目前,研究人员提出的可靠性路由协议主要从两个方面考虑:一是利用节点的冗余性提供多条路径以保证通信可靠性,即在数据传输过程中,一条路径失效后启用其它备用路径或者同时利用多路径进行数据的传输,均衡网络负载,降低丢包率;二是建立对传输可靠性的估计机制,从而保证每跳传输的可靠性。前者采用多路径保证数据传输的可靠性依靠的主要是多路径本身的特性,以前的WSN可靠性研究工作基本上也都集中在如何在源节点和汇聚节点之间建立多条路径,而采用不相交多路径来保证可靠性基本上都是以更多的能量耗费为代价的,这在节点无法得到能量补充的WSN中是不合算的,而采用相交多路径保证可靠性,效果往往又很差;至于后者提到的采用传输可靠性的估计机制来保证每跳传输的可靠性也是以牺牲能量为代价的,这在客观上就要求研究人员采用其它机制来保证数据传输的可靠性,同时减少节点能量消耗,均衡网络负载。

鉴于本文前面已对在源节点和汇聚节点建立多路径的方法已有论述,本章首先对可靠多路径路由技术进行概述,对比分析其在无线传感器网络中进行应用的优缺点;而后介绍一种典型的可靠多路径路由技术—ReInForM路由机制;最后提出基于容载检测的可靠多路径路由(RMR/LC: Reliable multiple paths routing based load-checked),并给出算法的设计思想、算法的实现及算法性能分析。

### 5.1 可靠多路径路由相关工作

#### 5.1.1 概述

无线网络中可靠多径路由已引起国内外学者的极大关注,文献<sup>[62]</sup>中作者结合校验容错技术,通过引入数据的冗余,得出多路径的失效率与数据冗余之间的关系;然而大量冗余数据的转发必然消耗更多的能量,大大缩短了网络的生命周期;文献<sup>[63,64,65,66]</sup>分别从不同的角度提出在MANET里面构建多路径来保证数据传输的可靠性,但WSN的特性使得这些方法不能直接适用来;文献<sup>[9]</sup>提出的能量多路径路由机制可以很好地

解决WSN能量的比较均衡消耗问题，但是它也存在着某些不足，如：对某些重负荷节点保护不够得力，在局部路径的优化方面考虑也不是很充分等，在前面的章节中我们提出采用遗传算法来对多路径进行优化<sup>[67]</sup>，通过优化可以使得网络的能量得到均衡的消耗；但是，路径的优化并不能够很好地保证数据在传输过程中的丢包问题，于此我们提出在多路径的路由协议设计过程中引入容载检测因子的概念，使得WSN中间节点在进行数据传输过程中，节点在无法处理大量数据的时候，向前驱节点发送否认信息，使得前面节点另外寻找到达目的节点的其它路径，从而实现降低丢包率，动态地调整网络流量，均衡网络负载，延长网络生命周期。

### 5.1.2 ReInForM 路由

Deb B 提出 ReInForM<sup>[17]</sup> (Reliable Information Forwarding using Multiple paths) 路由，多路径的建立过程是根据路由可靠性的需求、信道质量以及传感器节点到汇聚节点的跳数，决定需要的传输路径数目，以及下一跳节点数目和相应的节点，实现满足可靠要求的数据传输。

ReInForM 的基本过程是：首先，数据源节点根据传输的可靠性要求计算需要的传输路径数目；然后，在邻居节点中选择若干节点作为下一跳转发节点，并给每个节点按照一定的比例分配路径数目；最后，数据源节点将分配的路径数作为数据报头中的一个字段发给邻居节点。邻居节点在接收到源节点的数据后，将自己视作数据源节点，重复上述数据源节点的选路过程，下面是具体过程：

#### 1) 计算传输路径数

在 ReInForM 路由中，定义了一个可靠性参数，用小于 1 的正数  $r_s$  表示，该参数表示系统要求的数据源发送数据分组到汇聚节点的成功概率。每个节点都知道自己到邻居节点的信道质量，用信道差错率  $e_s$  表示， $e_s$  也是小于 1 的正数。假设每个节点到所有邻居节点的信道质量是相同的。

传感器节点通过如下的机制知道自己到汇聚节点的跳数  $h$ ：汇聚节点周期性广播路由更新消息，其中包括一个到汇聚节点跳数的域，节点收到路由更新消息后，将消息中到汇聚节点跳数加 1 并广播这个消息。这样，每个节点都能知道自己到汇聚节点的跳数以及它的邻居节点到汇聚节点的跳数。

数据源节点根据  $r$ 、 $e$  和  $h$  三个参数，决定需要多少条路径来转发数据分组才能保证可靠性要求。由于  $e_s$  为一条链路的错误率，对于数据源节点来说，经过  $h$  跳后数据包到达汇聚节点的概率为  $(1 - e_s)^{h_s}$ ，经过  $P$  条路径后数据包不能到达汇聚节点的概率为  $[1 - (1 - e_s)^{h_s}]^P$ ，因此源节点需要的成功传输路径  $P$  可以由下式计算得到：

$$P(r_s, e_s, h_s) = \frac{\log(1 - r_s)}{\log(1 - (1 - e_s)^{h_s})} \quad (5.1)$$

如果需要的成功传输路径数  $P$  大于源节点的邻居数目,则需要某些邻居节点发送多份书拷贝来满足可靠性要求。

## 2) 下一条节点选择和路径分配

数据源节点计算出需要的转发路径数后,在邻居节点中选择下一跳节点,并分配相应的转发路径。根据到汇聚节点的跳数,源节点把邻居节点分为三类:与自己到汇聚节点跳数相同的节点,比自己到汇聚节点跳数少 1 的节点,以及比自己到汇聚节点多 1 的节点。这三类节点分别用  $H^0$ ,  $H^-$ ,  $H^+$  表示。源节点首先在  $H^-$  中选择一个作为默认的下一跳点,默认的下一跳节点转发数据概率为 1。

由于源节点到默认下一跳节点的数据发送成功率为  $(1-e_s)$ , 这条路径相当于  $(1-e_s)$  条成功转发路径。如果  $(1-e_s)$  大于或等于按照上面公式计算得到的路径数,表明源节点只需要默认下一跳节点转发数据就能够满足可靠性要求。否则,还需要额外的转发节点,需要额外路径数为:

$$P = \frac{\log(1-r_s)}{\log(1-(1-e_s)^{h_s})} - (1-e_s) \quad (5.2)$$

额外路径优先从  $H^-$  中选取节点。只要按照上面公式 5.2 计算出的  $P$  值大于  $H^-$  中的节点数量时,才需要从  $H^0$  中选取节点;如果  $P$  值大于  $H^-$  和  $H^0$  的节点数量之和,才需要从  $H^+$  中选取节点。每个集合中被选中的节点都要为源节点创建一定的路径数,以保证所有选中节点能够提供的路径总和为  $P$ 。用  $P_{H^-}$ ,  $P_{H^0}$ ,  $P_{H^+}$  表示集合  $H^-$ ,  $H^0$ ,  $H^+$  中被选中作为下一跳的节点需要为源节点创建的路径数。设  $H^-$ ,  $H^0$ ,  $H^+$  中选择的节点数依次为  $N_{H^-}$ ,  $N_{H^0}$ ,  $N_{H^+}$ , 则有:

$$N_{H^-}P_{H^-} + N_{H^0}P_{H^0} + N_{H^+}P_{H^+} = P \quad (5.3)$$

$P_{H^-}$ ,  $P_{H^0}$ ,  $P_{H^+}$  按照如下比例分配:

$$P_{H^-} = \frac{P_{H^0}}{1-e_s} = \frac{P_{H^+}}{(1-e_s)^2} \quad (5.4)$$

这里选择  $H^0$ ,  $H^+$  中的节点作为下一跳节点,而非重复选择  $H^-$  中节点是为了保持网络负载的平衡。

例如,  $H^-$  中节点数为 6,  $H^0$  中节点数为 3, 源节点需要的额外路径数  $P=6$ 。假设信道的差错率  $e_s=1/2$ , 那么  $H^-$  中一个节点作为默认的下一跳节点, 剩余 5 个节点和  $H^0$  中的一个节点作为额外路径的下一跳节点。按照公式和公式可计算出:

$$P_{H^-}=12/11, P_{H^0}=6/11。$$

上述路径数将作为数据分组头部的一个参数发给下一跳节点。如果下一跳节点收到的路径数大于 1, 则总是转发数据;如果收到的路径数小于 1, 则按照和路径数相同的概率转发数据。

## 3) 邻居节点重新计算路径

源节点  $s$  在发送的数据分组头部加上  $P_H$ ,  $e_s$ ,  $h$ , 这三个参数。邻居节点  $i$  在收到分组后, 按照与路径数相同的概率决定是否转发分组。如果确定转发该分组, 则节点  $i$  将自己作为源节点, 并按照公式 5.1, 使用自己的  $r_i$ ,  $e_i$  和  $h_i$  重新计算传输所需的路径数。这里的  $r_i$  是节点  $i$  为了保证节点  $s$  指定的可靠性而重新计算出的可靠性值, 按照下面的公式得到:

$$r_s = 1 - (1 - (1 - e_s)^{h_s-1})^{P_H} \quad (5.5)$$

这里  $(1 - e_s)^{h_s-1}$  表示从节点  $i$  成功传送数据分组到汇聚节点的概率。

节点  $i$  采用与源节点  $s$  同样的方法选择自己的下一跳节点。这个过程持续下去, 一直到达汇聚节点为止。因为每一步传输都保证了源节点的可靠性要求, 所以整个传输过程保证了数据传输的可靠性要求。

ReInForM 尽管可以很好地保证数据传输的可靠性, 但是这种算法的前提是要求每个节点需要知道自己到达汇聚节点的跳数, 这在规模较大的无线传感器网络是需要付出更大的代价的; 同时, 这种路由构造多路径的过程将占用更多的网络资源, 必然要消耗更多的网络能量。

## 5.2 基于容载检测的可靠多路径路由 (RMR/LC)

### 5.2.1 网络能量模型及问题描述

无线传感器网络可以抽象为一个有向图模型  $G(V, E)$ , 其中  $V$  是传感器节点的有限集合;  $E$  是有向无线链路边上的有限集合, 这里  $i, j \in V$  是分配给传感器节点的全网唯一的地址标识符; 每个节点  $i$  根据无线信号传输模型具有大小为  $R_i$  的传播半径, 这个传输半径是可变的。如果节点  $j$  在节点  $i$  的传播半径  $R_i$  内, 则存在一条从节点  $i$  到节点  $j$  的有向无线链路  $E(i, j)$ , 节点  $j$  称为节点  $i$  的邻节点。令  $N_i$  为节点  $i$  的所有邻节点的集合, 则有  $j \in N_i$ 。令  $E_i$  为节点  $i$  的当前所具有能量, 节点之间的通信的能耗我们采用如下模型<sup>[68]</sup>:

$$\begin{aligned} E_{tr}(k, d) &= E_{elec}(k) + E_{amp}(k, d) \\ &= \begin{cases} kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}d^2 & d < d_0 \\ kE_{elec} + k\varepsilon_{mp}d^4 & d > d_0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5.6)$$

公式(5.6)表示节点  $i$  向距离  $d$  外地另一个节点  $j$  发送  $k$  字节的数据, 节点  $i$  的能量消耗, 其中  $E_{elec}$  表示无线收发电路所消耗的能量,  $E_{amp}$  表示放大器消耗的能量, 其大小取决于发送节点与接收节点间的距离以及可接受的位错误率。 $d_0$  为一给定的阈值 ( $d_0$  是常数, 数值取决于使用环境), 当发送节点与接收节点的距离小于  $d_0$  时, 发送方发送数据的能量损耗与距离的平方成正比, 否则与距离的四次方成正比。

节点  $j$  接收节点  $i$  发送过来的数据, 其无线接收装置的能耗为:

$$E_{Rx}(k) = kE_{elec} \quad (5.7)$$

中间节点在接收与发送  $k$  字节的过程中所消耗的能量为:

$$\begin{aligned}
E(k, d) &= E_{tr}(k, d) + E_{re}(k) \\
&= 2kE_{elec} + k\varepsilon_d d^n \quad n \text{的取值取决于发送节点与接收节点间的距离}
\end{aligned} \tag{5.8}$$

当节点能量一定时节点传输的数据量基本上也维持在一定的范围,为延长网络的生命周期,也就是要保证节点在更长的时间内传输一定的数据量。在数据传输过程中,由于传感器节点参与度的差异导致节点能量消耗的不同<sup>[69]</sup>,在前期工作中,我们引入两级阈值对节点剩余能量进行衡量并依此作为路径优化、节点选择的依据,本文在此基础上,通过对节点流量的监测实现节点数据传输可靠性的提高和网络流量的均衡,我们的思路如下:在利用多路径进行数据传输的过程中,当某一节点等待队列数据量达到某一限度时,即向它的前驱节点发送一个否认信息,要求前驱节点另外寻找到达目的节点的其它路径;若前驱节点没有到达目的节点的其它路径且在一定时间内再次收到后继节点发过来的否认信息,则将否认信息继续向前传送;当源节点收到否认信息,则启动路由,寻找到达目的节点的其它路径,同时降低数据传输速率。

## 5.2.2 算法的概述及实现

### 5.2.2.1 算法概述

依照我们在上文文献中提到多路径路由构建算法,假设在源节点和目的节点已经构建出多条路径,如下图,源节点S到目的节点D之间存在如下4条路径:

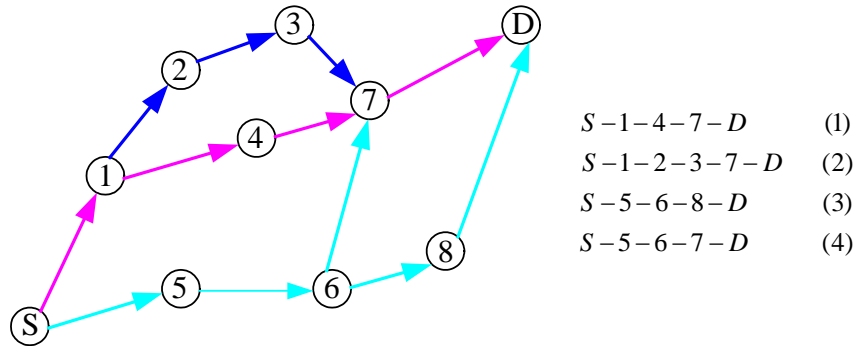


图 5.1 多路径结构示意图

图中节点7有三个直接前驱节点,为避免造成节点7过重的负荷而导致丢包,我们在每个节点中引入容载因子 $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ),用来对节点能够正常的处理数据量进行描述,同时定义 $\beta$ :

$$\beta = \frac{\text{当前转发过来数据包的数量}}{\text{节点能够处理最大数据量(QueueSize)}} \tag{5.9}$$

该变量用于对节点当前等待队列中的数据量进行描述,用 $\alpha$ 与 $\beta$ 之间的大小关系来对节点要进行转发的数据量进行监测,对于节点7:

1. if  $\alpha \geq \beta$ , 节点7正常转发由前驱节点转发过来的数据(见图5.2(a));
2. if  $\alpha < \beta \leq 1$ , 节点7在进行正常转发有前驱节点转发过来的数据的同时,向它的

前驱节点发送一个否认信息（否认信息里面包含有 $\alpha < \beta$ 的节点标识ID以及该节点与收到否认信息节点之间的跳数），要求前驱节点另寻路径到达汇聚节点，如下图5.2(b)：

3. if  $\beta > 1$ ，节点7开始丢包，同时继续向前驱节点发送否认信息；

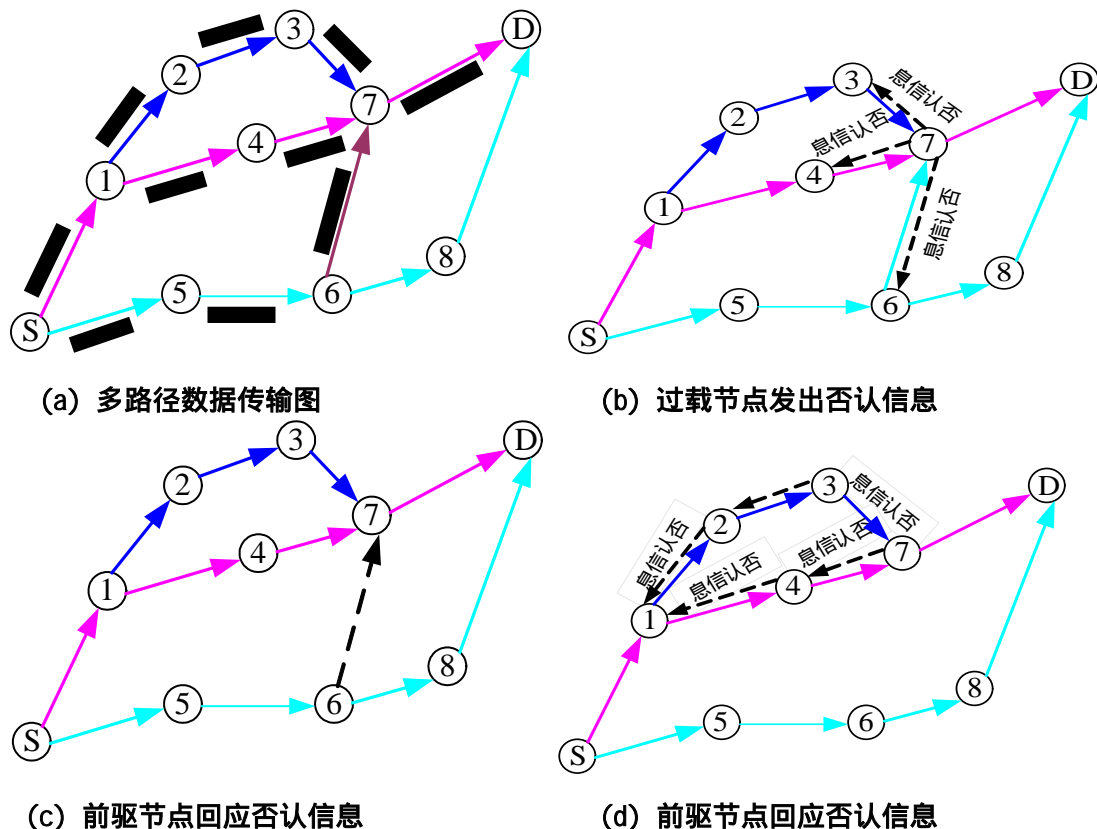


图 5.2 具有容载检测多路径数据传输

节点7的前驱节点收到否认信息后，查看当前的路由表，看是否存在有到达汇聚节点的其它路径，图中节点7的直接前驱节点6在收到由节点7发送过来的否认信息后，由于该节点存在有到达目的节点的其它路径，于是节点6就利用其它路径进行数据的传输（若存在多条到达目的节点的路径，则选择其中最短的），见图5.2(c)；而后节点7修改 $\beta$ 值继续比较 $\alpha$ 与 $\beta$ 之间的大小关系，做相应的处理；节点3和节点4没有到达目的节点的其它路径，在首次收到否认信息后不做处理，若是节点3和节点4在一定的时间间隔内仍不停收到来自节点7的否认信息，此时它们则向自己的前驱节点发送否认信息，同时丢弃由节点7发送过来的重复否认信息；节点1在收到否认信息后，尽管它存在达到目的节点的另一路径1-2-3-7-D，但此路径中的包含有否认信息里面也含有的节点7，此时节点1仍然根据后继节点发送否认信息的情况进行相应的处理。若是前驱节点一直没有到达目的节点的其它路径，当源节点收到否认信息后，它会降低数据采集以及发送的速度。

#### 5.2.2.2 算法实现



初始化：

count=0，count用于记录在一定时间内中间节点收到否认信息数目；

Time()用于计时；

$t_0$  设置一定值(该值大小与节点处理包的速度相关)，以此为标准来判断定时器是否超时；

算法中所用到的主要变量及函数代表的意义见下表5.1：

表 5.1 部分函数或变量及其表示意义

函数/变量	意 义
hid	节点标识
count	用于记录在一定时间内中间节点收到否认信息数目
$t_0$	用于判断定时器是否超时，其值为定值，大小与节点处理包速度相关
time()	计时函数

节点运行协议：

If ( $\alpha \leq \beta$ )

节点向直接前驱节点发送否认信息，同时计时器开始计时；若Time() >  $t_0$ ，则重新进行 $\alpha$ 与 $\beta$ 大小比较，进行对应的操作；

节点收到否认信息

If (本节点存在有达到目的节点的另外路径 && 该路径中不包含有”肇事”源节点)

Count = 0;

定时器清零；

本节点利用其它路径进行数据传输；

Else

Count=count+1；

If (count > 1)

向直接前驱节点发送否认信息；

计时器清零，开始重新计时；

If (time() >  $t_0$  && 在 $t_0$ 没有收到重复否认信息)

Count = 0;

计时器清零；

If (源节点收到否认信息)

降低数据发送率

End

### 5.2.3 算法性能分析

该算法在NS2上面进行模拟仿真，仿真场景为10，20，50，80，100个传感器节点在670×670范围内进行数据的传输，多路径的建立是以DD协议为基础的。仿真模拟两个场景：其一在只有一个源节点和汇聚节点间进行；其二在具有多个源节点和一个汇

聚节点间进行。每个节点初始化能量为1000J，节点每发送一个数据包所耗能量为1.0J，每接收一个节点的能量消耗为1.0J，节点处于空闲状态及休眠的能量消耗分别为1.0J、0.001J，节点从休眠状态进入工作状态所耗能量为0.2J，耗时为0.005秒，在仿真中进行设置的部分参数名及初始值见下表5.2，仿真中的实验截图如下图5.3，模拟网络拓扑图如下图5.4：

表 5.2 参数所示意义及初始值设定

参 数 名	数 值	注 解
idlePower	1.0	空闲状态功率，单位：瓦特
rxPower	1.0	接收功率，单位：瓦特
txPower	1.0	发射功率，单位：瓦特
sleepPower	0.001	休眠功率，单位：瓦特
transitionPower	0.2	唤醒(sleep active)功率，单位：瓦特
transitionTime	0.005	唤醒(sleep active)时间，单位：秒
macType	Mac/802_11	Mac 类型
antType	Antenna/OmniAntenna	天线类型
propType	Propagation/TwoRayGround	传输模型
channelType	Channel/WirelessChannel	链路类型
phyType	Phy/WirelessPhy	物理层类型
diffusionFilter	GradientFilter	过滤器

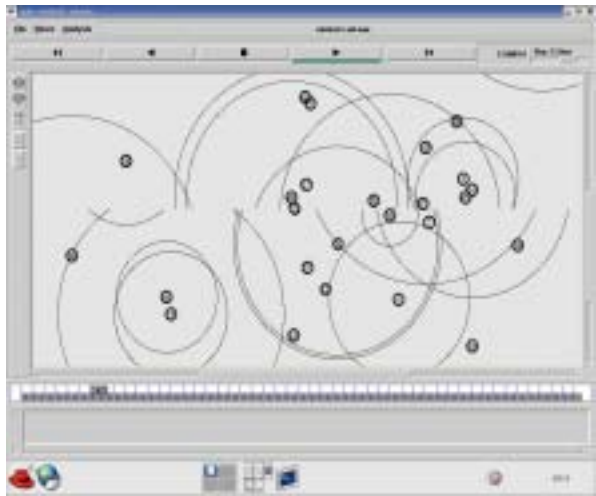


图 5.3 仿真实验截图

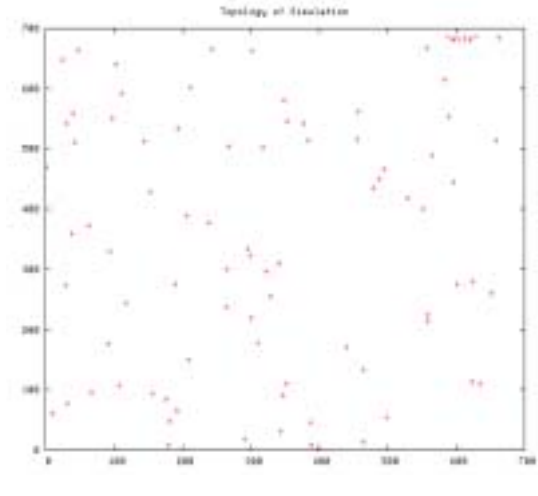


图 5.4 网络拓扑结构图

下图 5.5 与图 5.6 分别是丢包率及网络生命周期随传感器节点数目变化情况图，从图中可以看出，随着网络规模的增大，丢包率会有所增加，网络生命周期有所缩短，这主要是因为网络规模的增大会节点之间的相互干扰也加大；另一方面，RMR/LC 在整体上可以更加有效地降低数据传输的丢包率，提高数据传输的可靠性，延长网络生命周期。

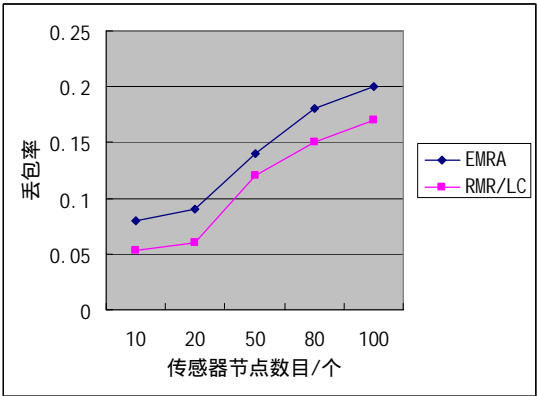


图 5.5 丢包率随传感器节点数目变化情况

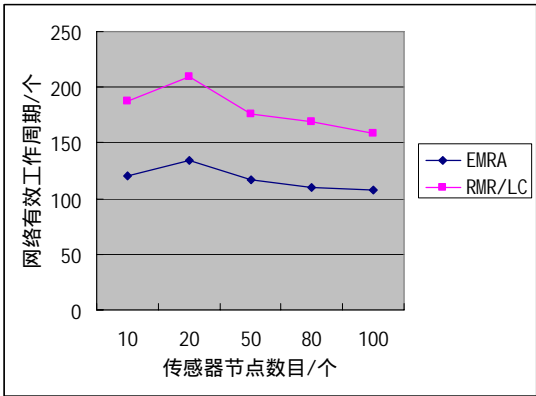


图 5.6 网络生命周期随传感器节点数目变化情况

#### 5.2.4 算法小结

本小节在分析研究无线传感器网络多路径的基础上，提出引入容载检测因子对传感器节点的负载进行检测，从而达到均衡网络负载，平均消耗网络能量，使得无线传感器网络的生命周期得以延长，实验证明这种策略的有效性。

#### 5.3 本章小结

本章概述了无线传感器网络多路径可靠性的现状，并在此基础上提出了基于容载检测的可靠多路径路由，实验证实这种算法在降低数据在传输过程中丢包率、有效延长网络生命周期过程中的有效性。

## 6 总结与展望

本论文在最开始阐述无线传感器网络的相关概念,对热点路由协议及其路由特点和使用范围进行归纳总结,同时就无线传感器网络的一些模糊概念进行澄清;针对无线传感器网络研究的热点问题之一——节能研究进行探究,分析当前节能采用的常用手段以及在路由协议设计过程中如何设计达到节能的目的;然后对多路径的研究现状进行分析、归纳和总结,阐述多路径路由在无线传感器网络中进行数据传输的重要意义;而后归纳总结路由协议的衡量标准,提出用遗传算法来进行多路径的优化,并进行算法的设计与实现;在接下来的章节我们针对无线传感器网络可靠多路径路由研究展开讨论,在分析归纳总结现有的提高路由可靠性手段的基础上,提出在无线传感器网络路由协议中引入容载检测因子对传感器节点的负载进行检测,而后根据检测的结果进行相应的处理,最后通过实验证明该策略的有效性。

本文不足在于对多路径路由进行优化时,未能采用其它的优化方法来进行,从而也就没有实现采用其它优化方法与采用遗传算法优化的性能比较。

无线传感器网络是一个具有广阔应用背景的研究领域,在对无线传感器网络多路径优化及提高数据传输可靠性的基础上,如何保证多路径路由的安全,将是我们下一步关注的重点。

## 参 考 文 献

- [1]孙利民等.无线传感器网络.清华大学出版社,2005.2:3-4
- [2]Misic, V.B. Jun Fang Misic, J. MAC layer security of 802.15.4-compliant networks, Mobile Ad-hoc and Sensor Systems Conference, 2005. IEEE International Conference on Nov. 7, 2005 Page (s):847—854
- [3]Akyildiz I.F., Su. W, Sankarasubramaniam. Y, Cayirci, E; Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks 38(2002) (4), Page (s):393–422
- [4]Akyildiz I.F., Su. W, Sankarasubramaniam. Y, Cayirci, E. “A survey on sensor networks” Communications Magazine, IEEE , Volume: 40 , Issue:8 , Aug.2002 Pages:102 – 114.
- [5]N.B S.Tilak. Abu-Ghazaleh, W. Heinzelman. Infrastructure Tradeoffs for Sensor Networks. In Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications, September 28, 2002, Atlanta, Georgia. Pages: 49-58
- [6]Tarik Arici, Yucel Altunbasak, “Adaptive Sensing for Environment Monitoring using Wireless Sensor Networks” in Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Atlanta, GA, March 2004. Volume: 4, Pages: 2347-2352
- [7]A Mainwaring, D Culler, J Polastre, R Szewczyk, John Anderson. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring. In Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications (September 2002). Pages: 88-97
- [8]李建中,李金宝,石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题和进展. 软件学报. 2003. 14(10):1717-1727
- [9]Rahul C.Shah and Jan M.Rabaey Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks. In: Proc IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'02), IEEE, March 2002, Volume: 1, Pages:17-21
- [10]Ganesan D, Govindan R, Shenker S, Estrin D. Highly-Resilient, Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review. 2002,1(2). Volume: 5, Issue 4. Pages: 11-25.
- [11]Deb B, Bhatnagar S, Nath B. ReInForM: Reliable Information Forwarding using Multiple paths in sensor networks. In: Proc 28th Annual IEEE Conf on Local Computer Networks(LCN), October 2003, Pages:406-415
- [12]Y. Xu, S. Bien, Y Mori, Topology control protocols to conserve energy in wireless ad hoc networks,CENS, Tech Rep:Janu 23,2004
- [13]J.M.Kahn, R.H.Katz, K.S.J.Piste. Next Century Challenges: Mobile Networking for "Smart Dust".

In: Proceedings of ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM'99). Washington: ACM Press, 1999. Pages: 271-278

[14]<http://www.tinyos.net/scoop/special/software/.com>

[15]郑君刚,吴成东,文茅龙,彭宇. 无线传感器网络在智能家居中的应用. 智能建筑, 2005.8,23-26

[16]Wendi Heinzelman et al. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. Mobile Computing and Communications Review. April 2002. Pages: 28-36

[17]任丰原, 黄海宁, 林闯 无线传感器网络. 软件学报, 2003, 14(7):1282-1291

[18]K.Akkaya, M.Younis. A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks. Elsevier Ad Hoc Network Journal, 2005, Volume: 3. Pages: 325-349.

[19]Al-Karaki J N, Kamal A E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey J.IEEE Wireless Communications, 2004, Volume: 11(6). Pages: 6-28

[20]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

[21]S. Hedetniemi, A. Liestman. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks . IEEE Networks, 1988, Volume: 18, No. 4, Pages: 319-349.

[22]WR. Heinzelman, J. Kulik, H. Balakrishnan. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In: Proc of the 5th Ann. Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. 2001. Pages: 174-185

[23]K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, GJ. Pottie. Protocols for self- organization of a wireless sensor network.. IEEE Personal Communications, 2000, Volume:7(5), Pages: 16-27.

[24]I Chalermek, G Ramesh, D Estrin. Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking. IEEE/ACM transactions on networking, 2003.2, Volume:1(11), Pages: 2-16

[25]C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In: Proc 6th Annual Int'l Conf on Mobile Computing and Networks(MobiCOM 2000), Boston, MA. August 2000. Pages: 56-67

[26]Wendi Rabiner Heinzelman et al. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks .In: Proceeding of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. 2000.1. Volume: 2. Page: 10

[27]Gaurav Gupta, Mohamed Younis. Load-Balanced Clustering of Wireless Sensor Networks. In: Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing. 2003.5. Volume.3. Pages: 1848-1852

[28]Arati Manjeshwar, P Dharma. Agrawal. TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in

- Wireless Sensor Networks. In Proc 15th Int'l Parallel and Distributed Processing Symp(IPDPS'01), San Francisco, CA, April, 2001. Pages: 2009-2015
- [29] Lindsey S. Raghavendra, C.S. PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems. In: Aerospace Conference Proceedings, 2002. IEEE. Volume:3, Pages: 1125-1130
- [30] F. Ye, H. Luo, J. Cheng, S. Lu, and L. Zhang, "Two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensors networks, ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2002), Atlanta, Georgia, USA, September 2002, Pages: 148-159.
- [31] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, S. Kumar. Next century challenges: Scalable coordinate in sensor network. In: Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. Seattle: IEEE Computer Society, 1999, Pages: 263-270
- [32] David Braginsky, Deborah Estrin. Rumor Routing Algorithm for Sensor networks. In: Proc. of the 1st workshop on sensor networks and applications. Atlanta: ACM Press, 2002. Pages: 22-31.
- [33] Fan Ye, Alvin Chen, Songwu Lu, Lixia Zhang. Gradient Broadcast: A Robust, Long-lived Large Sensor Network.. Wireless sensor networks. Pages: 109-128
- [34] He Y, Raghavendra C S, Berson S, Braden B. A programmable routing framework for autonomic sensor networks. In: Proc Autonomic Computing Workshop, 5<sup>th</sup> Annual Int'l Workshop on Active Middleware Services (AMS'03), Seattle, WA. 25 June 2003. Pages: 60-68
- [35] 张大踪. 无线传感器网络低功耗设计综述. 传感器与微系统, 2006.25.5:10-14
- [36] Deborah E. Wireless Sensor Networks Tutorial Part IV: Sensor Network Protocols. Atlanta, Georgia, USA: Westin Peachtree Plaza, 2002. Pages: 23-28
- [37] Haugen E D, Selvig A, Holmes J A. Simulation of Independent Reservoirs Coupled by Global Production and Injection Constraints. In: 13th SPE Reservoir Simulation Symp San Antonio, 1995. Pages: 111-123.
- [38] R F. Heinemann, S L. Lyons, S. Vasantharajan. Next Generation Reservoir Optimization. J. World Oil, 1998, Volume :219(1), Pages: 47 -50.
- [39] N. Garg, J. Konemann. Faster and Simpler Algorithms for Multi-commodity Flow and Other Fractional Packing Problems. In: 39th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science. October, 1998. Pages: 253-259.
- [40] Zhang Lei, Wang Xuehui, Dou Wenhua. A k-connected Energy-saving Topology Control Algorithm for Wireless Sensor Networks. The 6th International Workshop on Distributed Computing (IWDC 2004), in Springer Lecture Notes of Computer Science, 2004, Volume: 3326, Pages: 520-525.
- [41] 张磊. 移动自组网络协议关键技术研究. 国防科学技术大学博士生论文. 2006-09-22

- [42]史景伦. Ad hoc 网络中的一种独立多路径路由算法. 计算机工程, 2003.12, 21(29): 14-15
- [43]刘晓芳. 无线传感器网络路由协议比较研究. 北京邮电大学硕士生论文. 2006-9-26
- [44]闫化海,徐寅峰,刘明. 不确定情形下通信网络最短路径关键点问题. 系统工程, 2006.9(24): 1-5.
- [45]S Ramasubramanian, H Krishnamoorthy, M Krunz. Disjoint multipath routing using colored trees. Computer Networks 2007.1. Volume.51, Issue 8. Pages: 2163-2180.
- [46]S J Lee, M Gerla. AODV-BR: Backup routing in ad hoc networks. In: Wireless Communications and Networking Conference, 2000. WCNC. Volume.3. Pages: 1311-1316
- [47]S J Lee, M Gerla. Split multi-path routing in the presence of frequent topological changes J, IEEE CommuMag, 2001,Volume: 39(11). Pages:132-138
- [48]Tom Goff, N Abu-Ghazaleh, D Phatak. Preemptive Routing in Ad Hoc Networks. Parallel and Distributed Computing. Volume: 63(2003), Pages: 123-140.
- [49]J Vasu, K Natto. Reliable Multipath Information Dissemination via Label Forwarding in Wireless Sensor Networks. In: Information Technology: New Generations, 2006. ITNG 2006. Third International Conference on. April 2006. Pages: 285-293
- [50]Jinglun Shi. A multipath Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks. UIC 2006, LNCS, Pages: 438-446
- [51]De S, Qiao C, Wu H. Meshed multipath routing: An efficient strategy in sensor networks. In: Wireless Communication and Networking, 2003. IEEE Int'l Conf on Communication(ICC 2003), Anchorage, Alaska, May 2003. Volume:3. Pages: 1912-1917
- [52]舒炎泰,高德云,王雷. 无线 ad hoc 网络中的多径源路由.电子学报 2002.2(30): 279-282
- [53]陈晋伦, 蒋挺, 周正. 一种具有能量感知的多路径 Ad hoc 路由算法. 电子与信息学报. 2006.7. 7(28): 1298-1302
- [54]W R Heinzelman, A Chandrakasan, H Balakrishnan. An application-specific protocol architecture for wireless micro-sensor network. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2002, Volume: 1(4). Pages: 660-670
- [55]R Kumar, M Wolenetz, B Agarwalla, J Shin, P Hutto, A Paul, U Ramachandran. DFuse: A framework for distributed data fusionC. In: Proc.of the 1st ACM Conf.on Embedded Networked Sensor Systems (SENSYS'03), 2003, Pages: 114-125
- [56].Y Ma, J H Ayor, System lifetime optimization for heterogeneous sensor network with a hub-spoke



topologyJ,IEEE Trans on Mobile Computing,Volume:3(3). Pages: 286-294

[57] 田乐, 谢东亮, 韩冰等. 无线传感器网络中瓶颈节点的研究. 软件学报. 2006.17(4):830-837

[58] 玄光男, 程润伟 著 于歆杰 周根贵 译. 遗传算法与工程优化. 清华大学出版社, 2005.4, 76-78

[59] 李敏强. 遗传算法的基本理论与应用. 科学出版社 2002

[60] 许力等. 自组网环境下具有能量和移动感知的自适应路由协议. 计算机应用, 2004.10. 24(10): 46-49

[61] 马炫. 求 K 条最优路径问题的遗传算法. 计算机工程与应用. 2006.12, Pages: 100-101

[62] 夏戈明, 任浩, 黄遵国. 基于多路径路由的移动自组网可靠数据传输. 计算机应用与软件. 2006. 23(7): 16-17

[63] L. Reddeppa Reddy, S. V. Raghavan. SMORT: Scalable multipath on-demand routing for mobile ad hoc networks, Ad Hoc Networks, volume.5, pages: 162-188, March 2007

[64] L Zhang, Z Zhao, Y Shu, et al. Load balancing of multi-path source routing in ad hoc networks A. IEEE International Conference on Communications (vol. 5) C. ICC 2002. pages: 3197 ~ 3201

[65] 安耀辉, 卢锡城等. MANET 中基于动态拓扑的多路径自适应流量分配算法. 通信学报. 2006. 7(27): 20-26

[66] 蒋廷耀, 杨景华. 一种 Ad Hoc 网络的容错安全路由协议.

[67] 朱鹏飞, 蒋廷耀. 遗传算法在 WSN 路由协议设计中的研究与应用. 计算机与数字工程. 2007.8(35):20-22.

[68] 刘明, 龚海刚, 毛莹池, 陈立军, 谢立. 高效节能的传感器网络数据收集和聚合协议. 软件学报. 2005.12(16): 2106-2116

[69] 赵保华, 张炜, 李婧等. 传感器网络中节点参与度模型. 电子学报. 2006.11(34): 1194-1198

[70] 杨俊丽, 刘明. 移动自组网基于相关因子的多路径节能路由算法. 计算机应用. 2006.7(26): 1542-545

[71] A Boulis, S Ganeriwal, M B Srivastava. Aggregation in sensor networks: An energy-accuracy trade-off. In: Proc 1st IEEE Int'l Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA'03). 11 May. 2003. Pages:128-138

[72] Y Yu, D Estrin, R Govindan. Geographical and energy-aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. UCLA -CSD TR-01-0023, Los Angeles: University of California, 2001. Pages: 1-11

[73]<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

[74]<http://www.tinyos.net/scoop/>

[75]<http://www.baisi.net>

## 后 记

完成此学位论文之际，深切感受到三年的硕士学习阶段即将结束，想起老师们孜孜不倦的教诲，想起真诚的帮助和支持，感激之情充满心间！

首先，谨向我的导师蒋廷耀副教授致以深深的谢意！导师肩负教学和科研的重任，但仍对我的学习和成长倾注了大量的时间和心血，特别是对论文进行了仔细的审阅和修改！在硕士学习期间，导师严谨的治学作风、开拓的科研能力和高尚的敬业精神给我留下了极其深刻的印象！我的每一份进步和成长都离不开导师的谆谆教诲与精心指导！

衷心感谢学院刘勇博士，徐守志博士，谢谢你们在我们研究生学习过程中的无私帮助！

特别感谢师弟关国翔、王训宇、康维，师妹闵洁、王敏、乐文静及室友谢飞，他们在生活和学习中给予我很多关心和帮助！

衷心感谢我的父母及其他家人，感谢他们给予我无限的关怀、理解和支持！

最后，向所有曾经鼓励和支持我的老师、同学和朋友们道一声：谢谢！

## 附录：攻读硕士学位期间的研究成果

### 学术论文：

1. 朱鹏飞，蒋廷耀. 遗传算法在 WSN 路由协议设计中的研究与应用. 计算机与数字工程. 2007. 8(35): 20-22
2. 朱鹏飞，蒋廷耀. 基于容载检测可靠多路径路由(已投稿)

### 参与项目：

1. 参与湖北省自然科学基金支持项目——面向移动 Ad Hoc 网络入侵检测的数据挖掘技术的研究(批准号：2007ABA327)
2. 参与宜昌市科技攻关计划——基于无线传感器网络的磷矿安监系统应用开发
3. 参与湖北省宜化集团远程销售系统的研发工作
4. 参与长江航道工程局协同办公自动化系统研发工作
5. 参与中船重工 712 研究所信息资源规划项目