

摘 要

无线传感器网络由于其无需基础设施、自组网、自管理等特点决定这种传感器网络可以应用于军事、环境、健康、家庭和其他商业领域。

无线传感器网络中的路由技术则是关系到网络结构、服务质量和应用场景的一个关键技术。由于无线传感器节点是能源受限的节点，如何利用无线传感器网络有限的资源而尽可能长的延长网络的生存时间，一直是被广泛关注的研究热点也是衡量无线传感器网络中路由算法的重要指标。本文讨论了如何在研究网络生存时间的同时最大限度的保证了传感器网络的节点之间的耗能的均衡，从而避免由于能量集中消耗，个别节点的失败导致网络的整体性能的下降。

本文不仅阐述了计算机网络仿真技术在无线传感器网络的上的应用和核心技术和常用仿真平台，也介绍了常用的无线传感器网络中的节点模型、网络模型、能量消耗模型和性能衡量模型等。计算机仿真技术是衡量设计的路由算法性能的一个重要手段。

在深入分析无线传感器的特点的基础上给出了无线传感器网络设计中需要考虑的因素，也给出了典型的无线传感器网络的路由算法，并对这些算法的给出适当的分析。

在仔细学习和分析前人研究成果的基础上，文中给出了为了解决不均衡耗能而到网络性能下降问题的两个路由算法，基于资源调度的静态路由算法（SCIRS）和低耗能静态分簇路由算法（LESCS）。并在相关章节给出了这两个能量均衡消耗的路由算法的设计出发点，应用环境、运作机制和细节分析等内容。应用前面介绍的计算机网络仿真的相关技术，也给出了这两个均衡耗能的路由算法在不同应用场景中的仿真统计数据 and 仿真结果分析。

最后本文给出了研究工作的总结并提出了下一步工作的展望。

关键字：无线传感器网络；路由算法；能量均衡消耗；资源调度

Balanced Energy Consumption Routing Schemes in WSN

Abstract

Benefited for advantages of infrastructureless, self-organize, self-management, wireless sensor network (WSN) is capable for military task, environment monitor, health service, home network and other commercial applications.

The routing scheme is an essential technology of WSN which is related to the structure of network, the quality of service (QOS) and application of scene technology. Since the wireless sensor node is always energy and resource limited system, the use of limited energy and resource as long as possible to maximum the lifetime of WSN, has been widespread concerned and become a criterion to evaluate the routing scheme. This paper devotes to finding a solution which can provide a maximal lifetime of the network with balanced energy consumption among all sensor nodes. What's more, it also avoids the energy consumption and the deterioration of the network's property which is resulted from the failures of certain nodes.

This paper is not only describing the principle of WSN simulation by using computer network simulation technology and some popular simulation platform, but also introducing some common models, such as node model, network model, energy consumption model and performance evaluation model. Computer network simulation technology is a primary method to evaluate the performance of designed routing scheme in this paper.

After deeply analysis of WSN, this paper delivers some factors to design a reasonable network and some typical routing schemes for WSN with proper comments. After imbibing the results of the previous research, this paper proposes two routing schemes, which are Static Clustering with Intra-cluster Resources Scheduling (SCIRS) and Low-Energy Static Clustering Scheme (LESCS), to solve performance deterioration caused by unbalanced energy consumption. The starting point for design, application, operation mechanism and analysis details of these two schemes are also elaborated in relevant sections of the paper. Based on the above-described computer network simulation technologies, the statistical data abstracted from different simulation scenarios and analysis of simulation results are also appropriately analyzed in this paper.

Finally, this paper ends with a conclusion of summarization and work prospects in the next step.

Key Words: WSN; Routing Scheme; Balanced Energy Consumption; Resource Scheduling

独创性说明

作者郑重声明：本硕士学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得大连理工大学或者其他单位的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

作者签名： 郝飞 日期： 2007.5.30

大连理工大学学位论文授权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解“大连理工大学硕士、博士学位论文版权使用规定”，同意大连理工大学保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连理工大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。

作者签名： 郝飞

导师签名： 孙怡

2007年6月20日

1 绪论

1.1 前言

无线传感器网络由于其无需基础设施、自组网、自管理等特点决定了广泛的应用前景，例如环境监测、洪水预报、动物栖息的监控、温度照明、安全控制、城市交通管理、库存和物流管理等领域都可以大展身手。

典型的无线传感器网络可能包含数百到几千个传感器节点，这些节点可以互相通信或者和外部的一个基站通信。大量的传感器节点可以较精确的检测大范围内的目标。在传感器节点被散布在被检测区域后，它们可以自组织形成一个传感器网络。传感器节点之间通过相互合作可以产生关于被检测目标的高质量的数据。每个节点根据它被分配到的任务、存储的数据、数据处理经验、通信经验和拥有的资源来决定执行什么活动。每一个传感器节点都有能力发送数据或作为中间路由器中继别的节点传来的数据到目的节点或外部的基站。基站可能是一个固定的或移动的可以和外部已存在的网络通信的节点。基站拥有比普通传感器节点更强的计算能力和更多的资源。基站可以提供通过外部网远端检索传感器采集数据的服务。

由于无线传感器网络 and 传统传感器网络有着很多本质上的不同之处，有效降低节点的能量消耗，最大限度的延长网络生存时间，节点之间合作模式，网络内角色的划分，高性能的路由算法等都是被深入研究的课题。

1.2 无线传感器网络当前研究状况

在过去数年人们对无线传感器网络的研究中，如何降低节点的能量消耗和有效的利用有限的能量延长网络生存时间一直是被人们研究的热点。为了延长网络的生存时间，从网络的路由机制到节点的合作等面都提出了各种新的算法。网络内数据处理、数据融合和数据中心存储等方法被提出并被广泛研究。无线传感器网络的各个方面的问题在研究时都被抽象为某一或几个假设模型。各种理论研究都在这些假设模型条件下进行，模型与实际的吻合性和正确性还有待于进一步研究。由于无线传感器网络本身与应用密切相关的相关性，各种新的算法的性能到底能否满足应用要求还没有一个统一的衡量标准。各种路由算法也缺乏在一个统一的仿真平台下的性能比较。如何利用有限的能量是无线传感器网络研究中最活跃的一个领域。各种关于无线传感器网络的研究都是围绕这一问题展开的。

1.3 无线传感器网络与传统网络的不同

无线传感器网络与现有网络在很多方面都有着不同^[1-2]。首先，无线传感器网络规模比 MANET 或传统蜂窝网络大，节点数可能从几百到数十万。给这样大的规模中每一个节

点分配一个地址，例如 IP 地址，浪费很多资源。很多节点分布在一个特定区域使得无线传感器网络的节点密度很大。无线传感器网络的节点在散步到被检测目标区域后，要求在不依赖外界设施就可以自组织成为一个有效通信网络。其次，无线传感器网络中一般会存在一个基站，网络中的数据一般会有采集数据的节点开始流向这个基站，形成多对一的信息流。第三，无线传感器网络中的节点在能量，处理能力和存储能力上都受到很大限制。节点需要有效的资源管理机制来分配这些有效的资源。第四，在大多数情况下，节点在散布出去后一般会以静止在某一区域的采集数据，可能会有很少的节点以较低的速度移动。第五，不同应用的无线传感器网络在数据采集、数据处理、信息存储和信息传输等方面具有很大区别。第六，很多情况下要求采集到的数据能和位置信息联系在一起。定位系统必须简单而且准确^[9]。第七，在数据集中存储的无线传感器网络中要求可以提供按信息来检索目标。

本文接下来的内容结构如下。第二章节会介绍基于计算机软件的网络仿真技术。计算机软件仿真技术是基于数学建模和计算机计算技术的网络仿真方法，由于其能够为网络的规划设计提供客观和可靠的定量依据，缩短网络建设周期，提高决策科学性，降低网络建设投资风险等特点，正在成为一种流行的网络性能、网络协议和一些算法等评价方法。计算机网络仿真的一些核心原理和技术也正是本文后面要对比分析设计的路由算法的主要手段。第三章节将会讨论无线传感器网络设计中需要考虑的一些因素，然后会介绍一些无线传感器网络中典型的路由算法并给出分析。第四章节将会系统的介绍两个均衡能量消耗的无线传感器路由算法的应用环境、设计思路、运行机制和设计中一些细节的分析。第五章节会给出在第四章节中介绍的路由算法在不同应用环境中的仿真分析，并用仿真分析得到的统计数据来分析这两个能量均衡消耗路由算法的性能。在本文的最后结论部分将会对全文的内容作出总结和对本研究的未来作出展望。

2 基于计算机软件的网络仿真技术

2.1 计算机仿真原理

计算机仿真，是在研究和分析系统的过程中，根据计算机相似原理，利用计算机来逼真模仿研究对象。研究对象可以是真实存在的系统，也可以是设计中尚未实现的系统。网络仿真是一种利用数学建模和统计分析模拟网络行为，获取特定网络性能参数的技术，是计算机仿真(模拟)的一项重要分支。数学建模包括网络建模和场景建模两个部分。模拟网络流量在实际网络中传输、交换和复用的过程，获取包括网络全局性能统计量、节点性能统计量、网络链路流量与延迟等在内的网络特性参数，由此可以得到某些业务层的统计数据，也可以得到协议内部的某些特殊参数的统计结果。

当今由于网络迅速膨胀，网络研究人员一方面要不断思考新的网络协议和算法，为网络发展做基础性研究；另一方面又要研究如何利用和整合现有网络资源，使网络达到最高性能。以前，网络的规划与设计主要依靠经验，但这只适用于规模小、拓扑简单、流量不大的情况。随着网络规模的不断扩大，网络复杂性迅速增加，传统网络设计技术已不再适用于现代通信网络设计，必须有更好的设计手段和性能分析技术。而网络仿真技术以其独有的方法能够为网络的规划设计提供客观和可靠的定量依据，缩短网络建设周期，提高决策科学性，降低网络建设投资风险^[4]。

计算机仿真的三个基本要素是：系统、模型、仿真计算机(软件与硬件)，与之对应的仿真系统的三个基本活动是：系统建模、仿真建模、仿真试验。它们的关系如图2.1所示。

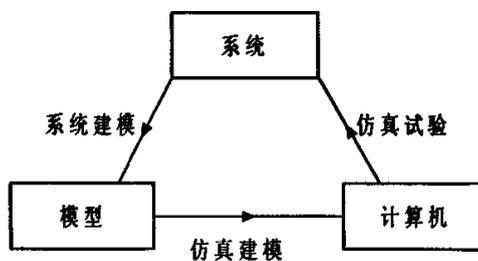


图2.1 计算机仿真三要素及三个基本活动

Fig. 2.1 Elements and activities of computer simulation

网络仿真技术具有两个显著的特点：

(1) 为网络的规划设计提供可靠的定量依据：能够迅速建立起现有网络的模型，而且能够方便的修改模型并进行仿真，这使得网络仿真非常适用于预测网络的性能。

(2) 能够验证设计方案或比较多个不同的设计方案：在网络规划设计中，不同的设

设计方案往往各有优缺点，使用单一的方法很难做出正确判断。网络仿真通过为不同的设计方案建立模型，进行模拟，获取定量的网络性能预测数据，为方案的验证提供可靠的依据。

经验、试验和计算作为三种传统的网络设计方法，都具有局限性，网络仿真技术与传统设计方法相结合，可以确保网络规划设计的正确性。网络仿真是一种介于试验和计算之间的技术，它通过建立实际系统的数学模型并按照相同的运行机理模拟物理系统的动态行为，可以说网络仿真是一种基于统计计算的模拟试验方法。在实际的网络设计中，可以遵循以下的基本原则来综合使用这几种设计方法：

(1) 依据经验和计算进行初步的网络规划和设计；

(2) 对于经验计算难以确定的问题，建立网络的仿真模型，通过仿真获取必要的设计依据；

(3) 如果需要且条件许可的话，可以搭建小型实验网络进行试验，对设计或仿真结果作进一步验证；

(4) 对于多个不同的设计方案，建立各自的网络模型进行必要的仿真，为方案的比较和选择提供依据；

(5) 最后还可以利用网络仿真手段对完整的设计方案进行验证，检查其是否能够达到预定的技术指标和其他实际目的。

表 2.1 网络仿真技术与传统的网络设计方法的关系

Tab. 2.1 Comparison between simulation and traditional design of networks

	经验方法	试验方法	计算方法	网络仿真方法
可靠性	不确定	高	低	较高
成本	不确定	高	低	中等
可实现性	高	低	高	中等
系统规模	中小型网络	小型网络	中小型网络	大中型网络

表2.1给出了经验方法、试验方法、理论计算和网络仿真四种方法在可靠性、实现成本、可实现性和使用的网络规模四个方面的比较。可以发现，网络仿真在以上四个方面基本上是经验方法、试验方法、理论计算三种方法比较理想的折衷，特别是在大型的网络规划和设计方面有明显优势^[5-6]。

网络仿真技术的主要应用，从应用层可以分为两个方面：开发或评价新的网络协议和设备 and 网络的规划和设计。从网络模型来分则包括以下六个方面：

(1) 局域网 / 广域网；

(2) 蜂窝技术；

- (3) 无线分组信息服务;
- (4) 无线局域网技术;
- (5) 战术战场通信网络;
- (6) 卫星通信。

2.2 无线传感器网络在计算机仿真中的研究模型

2.2.1 节点模型

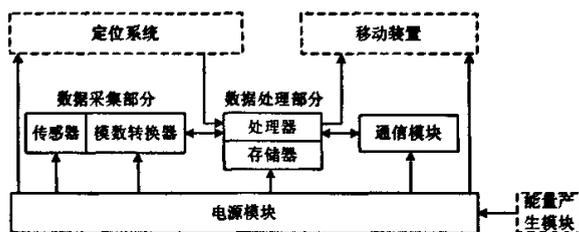


图 2.2 传感器节点模型

Fig 2.2 Model of wireless sensor node

功能模块：无线传感器网络中的节点一般包括：数据采集模块，数据处理模块，通信模块和电源模块四个基本功能模块，如图 2.2 所示。数据采集模块一般由传感器进行数据采集，然后由模数转换装置转换为数字信号提交给数据处理模块。数据处理模块一般由处理器和数据存储器组成。存储器一般用来存储自身采集到的数据和来自网络中其它节点中的数据。存储大量的数据可以提供好的数据融合功能。传感器采集到的数据一般和位置信息联系，单独的数据很可能没有意义。所以每个节点很可能需要一个有效的定位系统来提供位置信息。在少数情况下，很可能要求一些节点移动到特定目标区域采集一些特定数据。这需要一个移动装置来支持整个节点完成这个功能。一个能量产生模块，例如太阳能电池，可以持续不断的提供给节点电源，这对于需要网络长时间工作的场合很有意义。

节点失败模型：当传感器节点由于能量耗尽等原因引起的节点不能正常工作，定义为节点失败。无线传感器网络中的节点很容易受外界影响或自身的脆弱性导致节点失败。节点失败可能引起网络拓扑结构的巨大变化。网络中节点的失败概率可以用 Poisson 分布模型来模拟。在时间范围 $(0, t)$ 内节点 k 的稳定性概率如下：

$$R_k(t) = e^{-\lambda_k t} \quad (2.1)$$

λ_k 是节点 k 的失败率。

节点分布密度模型：根据应用场景的不同，无线传感器网络在直径 10m 左右的区域可能分布几个到几百个节点。节点的密度模型可以表述为下式：

$$\mu(R) = (N \cdot \pi R^2) / A \quad (2.2)$$

式中 N 为区域 A 中的传感器节点总数。 R 是每个节点的通信距离。 $\mu(R)$ 则给出了区域 A 中每个节点的通信距离内的节点密度。使用节点的通信距离内的节点密度比使用单纯的节点密度来刻画无线传感器网络的节点分布更有效。

2.2.2 网络模型

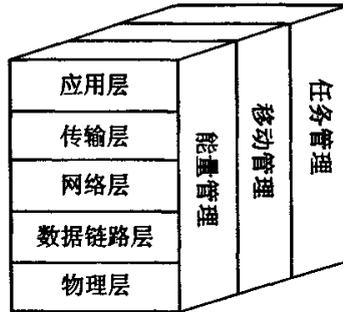


图 2.3 WSN 协议栈

Fig. 2.3 Protocol stack of WSN

路由协议模型：无线传感器网络的协议栈包括物理层，数据链路层，网络层，传输层，应用层，能量管理，移动管理和任务管理。由于无线传感器网络的特殊性，在其协议栈的某一层单独实现能量管理、移动管理和任务管理都不能取得满意的效果。所以一般在设计无线传感器网络时使用跨层设计来实现能量管理、移动管理和任务管理。跨层设计的优点就是使路由算法与能量管理和信息传输等联合，增强了无线传感器网络节点之间的合作性。

物理层需要有简单且能满足有效的调制，解调，发送和接收技术。与FSK相比，OOK或ASK都是简单有效的调制措施，但是需要采用自适应算法来设置最佳的判决门限来改善通信质量^[7]。媒体控制层要求联合能量控制和最小化冲突。与CSMA相比，TDMA可以很好的解决信道访问冲突。在使用TDMA的解决方案里，由于Bluetooth技术的成熟和成本的低廉，使得使用Bluetooth的方案是一种很具有吸引力的方案。网络层负责将来自传输层的数据选路传输到目的地。传输层来保证传输数据的可靠性和在必要时维持链路持续存在。取决于无线传感器网络所执行任务的不同，不同的应用任务可以嵌入到应用层。能量管理、移动管理和任务管理分别负责整个监视节点的能量、管理节点的移动性并将一个任务划分为不同的小任务分配给不同的节点来提高网络的效率。

检测目标模型：按照无线传感器网络检测目标的类型的不同可以分为静态目标和移动目标。静态目标可以使用事件驱动方式来采集需要的数据指标。即当检测目标的某一特性参数改变时，检测到这一变化的传感器向基站汇报这一变化。这样可以有效减少网

络通信量。而移动目标一般使用时间驱动方式来采集需要的数据指标。由于目标移动的不确定性，所以每次检测目标的传感器节点也可能不同。事件驱动和查询驱动对移动目标的检测都不是很有效的数据采集方式。时间周期的长短可以根据应用需要的数据精度来决定。

信源节点分布模型：无线传感器网络检测的某一事件可能发生在某一个区域，如温度采集，或者零散分布在整個被检测区域。所以将数据采集源节点可以描述为 ER (event-radius) 模型和 RS(random sources) 模型。ER 模型中指产生数据信息的节点分布在以某一事件为中心并在一定半径内。RS 模型指产生数据信息的节点均匀分布在整個被检测区域内^[8]。

网络通信模型：与传统网络多对多通信模式不同，在大多数情况下，无线传感器网络中通信属于多对一模式，即多个节点产生数据信息传输到一个目的节点基站。数据从传感器节点传送到基站时。无线传感器网络这一特殊网络通信模式可以被利用达到降低通信量和实施数据融合。比较典型的网络通信模型有，将无线传感器网络中所有节点构成一链状链路结构。距基站最远的节点的信息在向基站传输过程中可以做很好的信息融合来达到降低通信量^[9]。将基站作为根节点开始以最小二乘树方式将整个网络构造为一个树状拓扑结构，并利用信息在树状拓扑网络中传输做信息融合，从而减少通信量可以达到延长网络生存时间^[8]。

信息提取模型：从网络中提取信息的模型一般可能是非线性模型。例如给定最大能量，寻求最佳网络而使从网络中可以提取最大信息的模型。给定需要从网络中提取信息时，从而寻找耗费最少能量的网络也是一种典型的信息提取模型。这两个模型的求解给出了理论上从无线传感器网络中提取信息的一个描述，可以作为各种无线传感器网络路由机制性能衡量的一个比较标准^[10]。

信息融合模型：信息融合是指将来自不同源节点的数据利用其相关性去除冗余，在保证信息量不变的前途下使网络中传输的数据量最小。根据应用场合不同，使用的方法有数据复制压缩，求均值，取最大值或最小值等。信息融合的程度根据具体应用的不同和数据格式特定的不同有很大区别。通常简化研究复杂度，研究协议的通信量时，假定网络中传输的数据包大小一样，即某一节点将自己的数据和接受到的数据作融合后数据的大小和从其前一节点传输过来的数据包大小一样^[9]。

2.2.3 能量消耗模型

节电能量消耗：节电能量消耗一般由节点通信能量消耗和计算能量消耗两部分组成。节点的通信能量又由数据发送能量和数据接受能量两部分组成。在这两部分能量消耗中节点的数据发送能量占主要地位。节点的计算能力包括采集的原始数据处理消耗能量、执行信息融合和选路等功能的计算能量。与节点的通信能力相比，节点的计算能量一般要低二到三个数量级。所以在衡量一种无线传感器网络协议的节能指标时可以只考

虑节点的通信能量，忽略节点的计算能量消耗。节点的通信能力消耗又可以近似等效考虑为节点的数据发射能量消耗。当无线传感器网络中的传输的数据包大小一定时，无线传感器网络消耗的所有能量等效于网络中所有节点发送数据包的多少。

通信传播能量的衰落模型：无线电信号在空间传播时经历快衰落和慢衰落。在假设节点发射功率可以根据需要自动调节的前提下研究无线传感器网络的通信时，可以将无线电信号在空间传播的衰落模型简化为按平方律衰减，即接受到的信号的强度与通信节点之间距离的平方成反比。

2.2.4 协议性能衡量模型

时延：在要求数据的时效性时，数据的传播时延就必须考虑。可是使用数据传播到目的节点经过多少中间节点来衡量。网络中有数据融合时，一般数据包会在每个节点都被延时某一固定时间再发送向下一跳的节点，这时总的的传播时延就应该为数据在每一中间节点的延时加上数据在空间的传播时延。减少时延的有效方法是在网络中实施并行传输或并行计算。

能量消耗：由于节点的能量消耗主要取决于发送数据包的能量。所以在假设每发送一个数据包消耗的能量一定时，网络的能量消耗可以等效于网络通信量或网络发送的数据包的多少。在给节点分配一定能量时，可以在这个节点发送数据包的数量和消耗能量之间建立线性关系。这样的假设在网络仿真时可以作为计算能量消耗的模式。

能量和时延的乘积：使用了能量和时延的乘积可以用来衡量路由算法的性能^[11]。单纯使用能量消耗时延的大小作为衡量路由算法性能的准备都具有一定的弊端。例如有效的节能措施一般会带来额外的时延。例如 PEGASIS 可达到很好的节能，但是在考虑时延时就不是一个很有效的路由机制^[9, 11]。自适应路由机制更有可能在节点剩余不同能量时调整时延指标。在许多提供 QoS 的网络中都对传播时延有一个限定要求。这时就应该综合考虑能量消耗和数据传播时延来衡量路由算法的性能。综合考虑能量消耗和传播时延可以使路由算法在能量消耗和传播时延之间做出折衷，使路由算法兼顾能量消耗和传播时延两方面性能。

节点失败率：当网络正常运行一段时间后，网络中某一节点可能比网络中其它节点由于消耗了更多的能量而提前失败。例如，在网络的拓扑结构为树状结构时，靠近基站的节点可能比距基站较远的节点更频繁的与基站通信，承担了较多的通信任务。在无线传感器网络中节点之间与基站通信时，距基站较远的节点需要较大的发射功率来保证信息的正常传输。这些节点的能力消耗比网络中其它的节点能力消耗更快，所以可能会在网络中其它节点失败前就不能正常工作。网络中那些节点提前失败与具体协议的运行机制的不同而不同。当无线传感器网络中有一部分节点不能正常工作或脱离网络时，网络的拓扑结构就会变得不可预测，这时被考察协议的性能也会相应的改变。节点失败率可以作为衡量路由算法在运行一定时间后是否仍可以维持网络的状态的一个标准，反映的

是网络的生存时间。

2.3 网络仿真方法

目前, 通信网络规模日趋庞大, 技术日趋复杂, 网络的性能也变得越来越不可预测, 有效评估和研究网络技术、协议、性能成了迫切的需求。一般研究使用现场实验、数学分析、仿真模拟3种方法。相比较而言, 仿真模拟在网络研究中可以节省资金, 容易操作, 结果可靠, 接近实际。因此, 仿真模拟在网络研究中用得越来越多。

网络仿真面向具体的网络应用, 在特定条件下, 通过计算机仿真进行网络性能评估、业务流量分析和可靠性分析等, 进而实现不同设计准则下的网络结构设计 with 配置优化。进行仿真前, 要对仿真对象有彻底全面的认识, 有的放矢地选择仿真内容, 并兼顾实现的复杂度和软件功能; 然后对仿真过程进行细致规划和设计, 建立仿真流程框图, 定义输入输出, 在仿真软件提供的编辑器中建立仿真的系统模型, 并设立统计数据收集点; 最后运行仿真, 收集结果进行分析, 以决定是否再次进行修改和仿真, 模拟仿真工作的过程如图2.4所示。

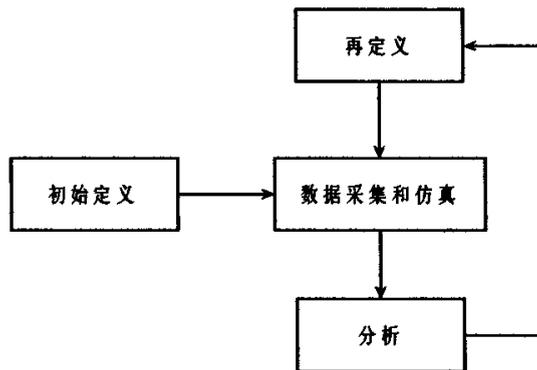


图2.4 模拟仿真工作的过程

Fig. 2.4 Procedure of Simulation

网络仿真方法研究在网络仿真研究中要遵循一般的仿真研究方法, 同时考虑到网络仿真中需要针对特殊的问题和目标, 一般网络仿真要经历4个阶段: 网络仿真研究准备阶段, 网络仿真模型设计阶段, 网络仿真分析阶段和网络仿真结束阶段。

2.3.1 网络仿真准备阶段

首先需要确认、规范化课题和问题研究要仿真的网络对象和课题, 准备要研究网络、技术、协议、业务的基本资料 and 知识。明确和规范化网络仿真所要研究的问题和目标(例如MPLS网络负载平衡和队列丢弃算法问题等)。提出明确的网络仿真描述性能参数, 一般性能参数包括网络通信吞吐量、链路利用率、设备利用率、频带利用率、端到端延迟、

丢失概率、阻塞概率、队列长度、满意用户数等。

其次是制订研究计划。针对研究课题和问题制定详细的仿真研究计划，提出参考对比研究方案和计划。

2.3.2 网络仿真模型设计阶段

第一步建立模型。建立网络仿真研究的网络、技术、协议的概念模型和数学模型。包括网络和设备以及链路往仿真模型转化过程中的模型模拟原理、实现方式、结构组成、模型模块以及业务和流量的数学描述模型(分布函数)等。它的实现和具体采用的仿真软件有关。

第二步是搜集数据。搜集用于仿真模型实现和验证的相关数据。包括网络环境(大气、地理、电磁等)、网络拓扑、通信节点技术和结构以及配置、链路参数(延迟、误码、干扰等)、网络应用特征、网络流量和负载状况。数据尽量详尽准确。

第三步是模型代码实现。通过仿真建模工具具体实现网络仿真模型。具体使用的方法和工具由仿真软件工具决定。

第四步是检查模型。检查代码实现的仿真模型是否有误，是否和概念以及数学模型相符合。可以使用跟踪、在一定范围内变化输入参数检查输出结果、常量输入观察结果、动画等手段。

最后是验证模型。验证代码实现的仿真模型是否和相应确定条件下实际网络、技术、协议与实际情况的性能相符合。确保模型的正确性、完整性、一致性。评估模型的可靠性，建立一定的模型置信度。

2.3.3 网络仿真和分析阶段

仿真设计是利用仿真模型完成具体仿真场景，同时设计仿真实验序列。包括设计适当的模型输入参数，仿真统计内容，仿真运行时间长度，仿真随机种子数个数，仿真独立运行次数，仿真启动条件，仿真终止条件，仿真的准备周期等。

仿真运行是利用仿真软件工具进行仿真实验。

仿真分析是利用分析工具和数学知识进行仿真结果分析。利用平均、方差、最大值、最小值等数学方法和数据过滤技术处理仿真数据，分析仿真结果，在必要时将多次独立运行的仿真结果进行统计分析以解决网络的随机统计问题。

2.3.4 网络仿真结束阶段

仿真报告是完成网络仿真的研究报告。

网络仿真研究时，一般经过上述四个阶段的相应仿真工作来完成。网络仿真的一般工作流程如图2.5所示。

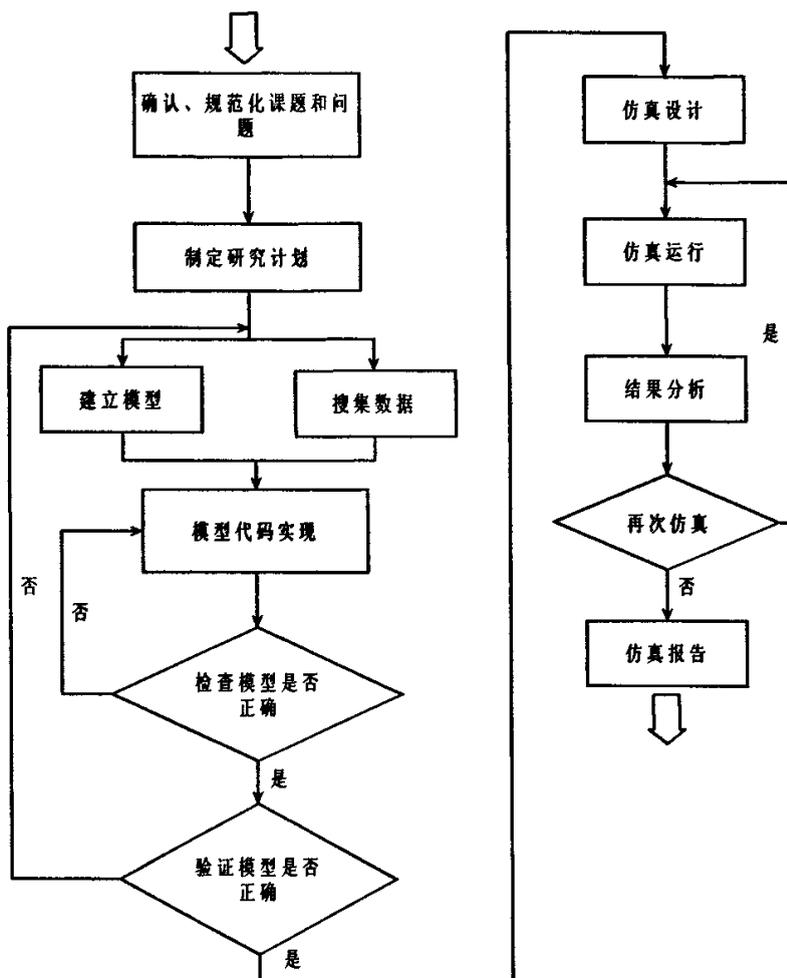


图 2.5 网络仿真的一般工作流程

Fig. 2.5 General procedure of network simulation

2.4 网络仿真平台

目前有多种专用网络仿真软件，其中既有软件公司开发的商用软件，也有大学和科研机构自行开发的科研软件。商用软件提供了全面的建模和协议支持，但价格昂贵，且不具有开放性；科研软件虽然在功能方面不如商用软件完善，但具有开放性，作为网络研究的共享资源，为网络研究者提供了研究的平台和工具。以下主要介绍几种常用的仿真软件，其中包括目前应用最为广泛的 OPNET 与 NS2，以及 BONES、COMNETIII 和 SSFNet 等。

2.4.1 OPNET 仿真软件

MIT(麻省理工学院)于1987年发布了其第一个商业化的网络性能仿真软件OPNET

Modeler, 使得具有预测性的网络性能管理和仿真成为可能。OPNET是一种优秀的网络仿真和建模工具, 支持面向对象的建模方式, 并提供图形化的编辑界面, 更便于用户使用。它强大的功能和全面性几乎可以模拟任何网络设备, 支持各种网络技术, 除了能够模拟固定通信模型外, OPNET的无线建模器还可用于建立分组无线网和卫星通信网的模型。同时, OPNET在新网络的设计以及对现有网络的分析方面都有卓越的表现。它为通信协议和路由算法的研究提供与真实网络相同的环境。此外, 功能完善的结果分析器为网络性能的分析提供了有效又直观的工具。OPNET的Modeler是专门用于可视化原型设计的软件, 它的使用既方便了网络模型的建立, 又减少了编程的工作量。Modeler中提供多种编辑器帮助用户完成网络建模和仿真运行, 包括网络编辑器(Network Editor)、节点编辑器(Node Editor)、进程编辑器(Process Editor)和分组格式编辑器(Packet Format Editor)。此外, OPNET还提供了交互式的运行调试工具、功能强大的结果分析器和能够实时观察模型动态行为的动态观察器。用户可以在运行前设定运行中使用的参数, 并且能随时中断运行。结果分析器用图形的方式显示仿真软件过程中得到的统计数据, 还能将多次仿真的结果进行比较, 为用户的决策提供有力的依据。

2.4.2 OPNET 概述

OPNET 网络仿真软件是 MIL3 公司的产品, MIL3 公司起源于美国麻省理工学院(MIT), 创建于 1986 年, 并于 1987 年发布了第一个商业化的网络仿真软件。目前, OPNET 产品包括 Modeler, ITGuru, SPGuru, WDMGuru, ODK 等。不同的产品面向的客户群也不一样。Modeler 主要面向网络的研发; ITGuru 可以用于大中型企业, 作智能化的网络设计, 规划和管理; SPGuru 相对于 ITGuru 在功能上更强大, 增加了许多功能模块, 包括流分析模块(Flow Analysis), 网络医生模块(NetDoctor), 多提供商导入模块(Multi-Vendor Import), MPLS(Multiprotocol Label Switch, 多协议标签交换)模块等, 使之称为电信运营商首选的智能化网络管理, 规划和优化的平台。WDMGuru 面向光纤网络的运营商和设备制造商, 提供了管理 WDM(Wavelength Division Multiplexing, 波分复用)光纤网络, 并为测试产品提供了一个虚拟的光网络环境。ODK(OPNET Development Kit, OPNET 开发包)和 NetBizODK 是一个更底层的开发平台, 其中 ODK 为开发时环境, NetBiz 为运行时环境, 可以用于设计用户自定制的解决方案, 定制用户的界面, 并且 ODK 提供了大量的函数, 用于网络优化和规划。

OPNET作为一种优秀的网络仿真软件, 它支持面向对象的建模方式, 并提供图形化的编辑界面, 以便于用户使用。在网络规划与设计以及对现有网络的分析方面都有很好的表现, 同时也为通信协议和路由算法的研究提供了与真实网络相似的环境。OPNET Modeler具体有以下主要特点:

(1) 层次化的网络模型和建模机制。使用无限嵌套的子网来建立复杂的网络拓扑结构。Modeler 建模过程分为 3 个层次: 进程(process)层次, 节点(node)层次和网络

(network)层次。在 process 层次中用有限状态机来模拟单个对象模块的行为；在 node 层次中将 process 对象模块互联成设备；在 network 层次将设备互连成网络。几个不同的网络场景组成工程(project)，用以比较不同的设计方案。

(2) 有限状态机。在过程层次使用有限状态机来对协议和其它过程进行建模。在有限状态机的状态和转移条件中使用C / C++语言对任何过程进行模拟。用户可以随心所欲地控制仿真的详细程度。有限状态机加上标准的C/C++以及OPNET本身提供的400多个库函数构成了Modeler编程的核心。OPNET称这个集合为ProtoC语言。

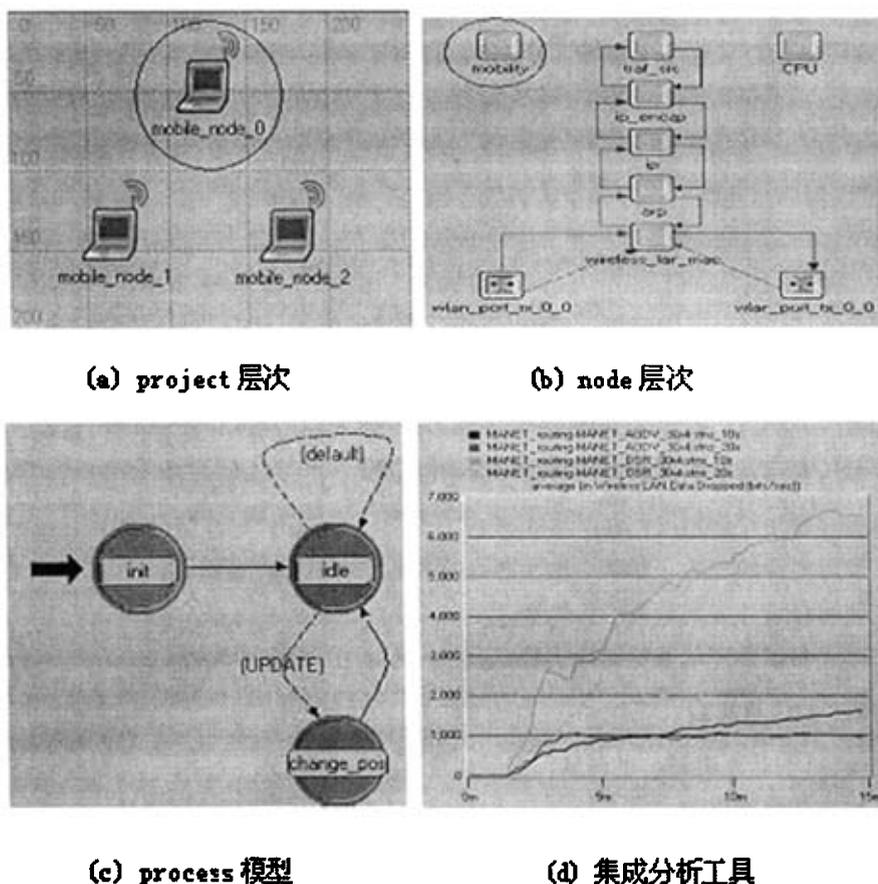


图 2.6 OPNET 建模机制和分析工具 (a) (b) (c) (d)
 Fig.2.6 Modeling Mechanism and analysis tools in OPNET (a)(b)(c)(d)

(3) 集成的分析工具。Modeler 仿真结果的显示界面十分友好，可以轻松的刻画曲线，也可以将曲线导出到电子表格 excel 中。

OPNET层次化的建模机制和集成的分析工具如图2.6所示。

(4) 对协议编程的全面支持。支持400多个库函数以及书写风格简洁的协议模型，

OPNET 的核心已经嵌入了众多协议, 因此对于很多协议, 无需进行额外的编程。OPNET 几乎预定义了所有常用的业务模型, 如均匀分布、泊松分布、欧兰分布等, 同时还集成了Email、HTTP、FTP、远程终端、电视会议和数据库等常用的客户服务器 (CS) 应用业务模式。

(5) 系统的完全开放型。Modeler 中的源代码全部开放, 用户可以根据自己的需要添加, 修改已有的源代码来进行研究。

(6) 动画显示。Modeler 可以在仿真中或仿真后显示模型行为的动画。

(7) 集成的调试器 ODB。OPNET 有自己的调试工具 OPNET Debugger (ODB), 可以快速验证仿真和发现仿真中存在的问题; 另外, OPNET 在 Windows 平台下还支持与 VC 联合调试。

Modeler 还提供了十几个编辑器大大加快了建模的过程。每个编辑器均可完成一定的功能。Modeler 提供的编辑器有: 项目 (project) 编辑器, 节点 (node) 编辑器, 进程 (process) 编辑器, 链路 (link) 模型编辑器, 路径 (path) 编辑器, 包 (packet) 格式编辑器, 天线 (antenna) 模式编辑器, 接口控制信息 (ICI, Interface Control Information) 编辑器, 调制曲线 (modulation curve) 编辑器, 概率分布函数 (PDF, Probability Distribution Function) 编辑器, 探针 (probe) 模型编辑器, 图标 (icon) 编辑器, 源程序编辑器等。

OPNET 的用途主要包括:

- (1) 定位关键事务, 比如分析出极限情况下的 end-to-end 性能;
- (2) 确定增加应用和用户对环境的影响;
- (3) 使用定量的方法, 对环境做出准确的规划和可伸缩性分析;
- (4) 使网络设计得到最优的性价比;
- (5) 对主要设备完成基线预算调整。

2.4.3 OPNET 的仿真机制

对于 OPNET 的仿真机制, 可以从三个层次进行概括和描述:

(1) 层次化建模机制

计算机和通信网络一般包括3个方面的模型: 网络拓扑, 节点内部结构和通信行为。OPNET 基于面向对象软件技术将设计域分为网络域、节点域和进程域, 提供了网络层、节点层和进程层的三层建模机制, 使得建模更加有条理, 大大加快了研发速度。

网络域中完成网络拓扑和配置模型的设计, 网络模型支持无限多重的子网模型; 节点域中完成网元节点结构和数据流模型的设计; 进程域完成网元节点模型中每个模块的进程模型的设计。进程模型通过ProtoC语言实现, 它是一种基于有限状态机 (FSM) 的C语言, 进程状态机不同状态执行不同的C描述的通信行为程序来实现, 进程模型是通信协议功能模拟以及与仿真有关控制流行为的实现的具体位置。

(2) 离散事件驱动机制

OPNET采用离散事件驱动的仿真机制(如图2.7所示),仿真时间的推进是靠事件来驱动的,有事件的时候进行处理,没有事件的时候则推进仿真时间线。其中“事件”是指网络状态的变化。只有网络状态变化时,模拟机才进行仿真;状态不发生变化的时间段不进行仿真,即被跳过。仿真中的各个模块之间通过事件中断方式传递事件信息。每当出现一个事件中断时都会触发一个描述通信网络系统行为或者系统处理的进程模型的运行。OPNET采用的离散事件驱动的仿真机制决定了其时间的推进机制,即时间是跳跃着前进的。当离散事件驱动的事件调度器,又称仿真核心,完成当前事件的处理A后,会把它从事件列表中删除,并且获得下一事件B。此时事件B中断,只有被仿真核心获取的事件才能变成中断。如果事件B发生的时间 t_2 大于当前仿真时间 t_1 ,则OPNET将仿真时间推进到 t_2 ,并触发中断B;如果 t_2 等于 t_1 ,仿真时间将不推进,直接触发中断B。这就是说,一个仿真时间点上可同时出现多个事件,事件的发生也可有不同间隔的区别。离散事件驱动的仿真机制实现了在进程级描述通信的并发性和顺序性,再加上事件发生时刻的任意性,决定了可以仿真计算机和通信网络中的任何情况下的网络状态和行为。

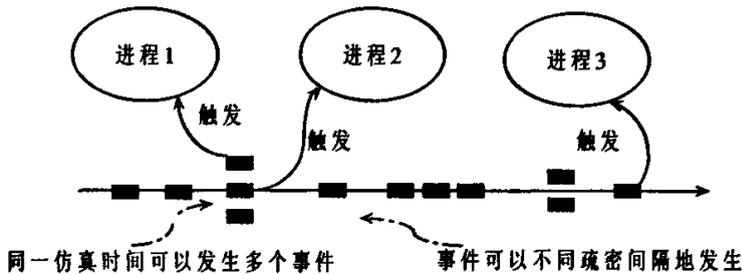


图 2.7 离散事件驱动机制

Fig. 2.7 Discrete events drive scheme

在OPNET中使用基于事件列表的调度机制,合理安排调度事件,以便执行合理的进程来仿真网络系统的行为。调度的完成通过仿真软件的仿真核和仿真工具模块以及模型模块来实现。离散事件列表的调度机制如图2.8所示。

① 每个OPNET仿真都维持一个单独的全局时间表,其中的每个项目和执行都受到全局仿真时钟的控制,仿真中以时间顺序调度事件列表中的事件,需要先执行的事件位于表的头部,当一个事件执行后将从事务列表中删除该事件。

② 仿真核作为仿真的核心管理机构,采用高效的办法管理维护事件列表。并且按顺序通过中断将在队列头的事件交给指定模块。同时接收各个模块送来的中断,并把相应事件插入事件列表中间。仿真控制权伴随中断不断地在仿真核与模块之间转移。

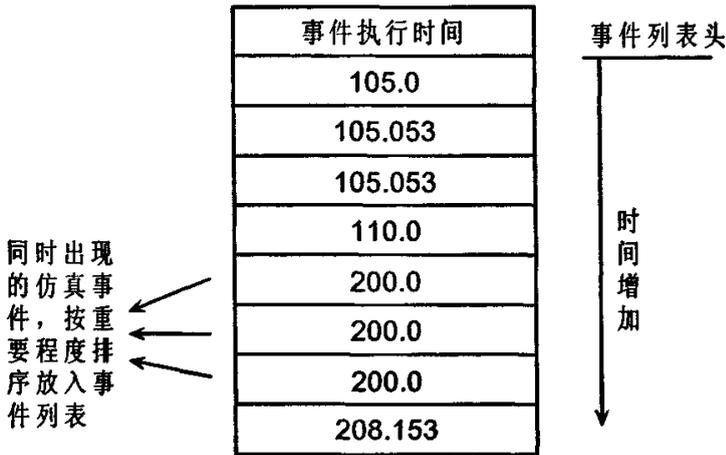


图2.8 离散事件列表的调度机制

Fig. 2.8 Schedule scheme of discrete events table

③ 当事件同时发生时，仿真核按照下面两种办法来安排事件在事件列表中的位置：

a) 按照事件到达仿真核的时间先后顺序； b) 按照事件的重要程度。

(3) 基于包的通信机制

OPNET采用基于包的建模机制来仿真实际物理网络中包的流动，包括在网络设备间的流动和网络设备内部的处理过程，仿真实际网络协议中的组包和拆包的过程。另外，在建模和仿真中，OPNET还可以根据需要生成、编辑或自定义包及查看包头和数据区等。在OPNET中，包被看作是对象，可以创建和对其进行编辑。同时，OPNET还可以用类似于包的通信机制的接口控制信息的描述方法。接口控制信息比包结构简单，它以事件为载体，且适用于任何事件，广泛用在有关事件调度的场合，如同一节点模型的不同模块之间、不同节点模型之间以及同一节点模型的相同模块内。

2.4.4 OPNET 的通信链路模型

OPNET支持三种链路形式：点对点链路、总线链路和无线链路。为了描述在不同物理特性上的特点，OPNET采用一系列管道阶段去仿真。

对于有线点对点链路需4个管道阶段，分别是传输延时、传播延时、错误分配和纠错阶段；而对于总线链路，则需传输延时、链路闭锁、传播延时、冲突检测、错误分配和纠错6个阶段。与点对点链路相比，总线最大的特点是可供多个收信机同时接收信号，而发信机端的传输延时计算一次。

鉴于无线信道的广播、时变特性以及节点的移动性，在OPNET的无线仿真中用14个首尾相接的管道阶段(如图2.9所示)，来尽量接近真实地模拟数据帧在信道中的传输。分别是：接收主询、传输延时、链路闭锁、信道匹配、发射机天线增益、传播延时、收信机天线增益、接收功率、干扰噪声功率、背景噪声功率、信噪比、误比特率、错误分

布和纠错。这些传输阶段是仿真无线链路所涉及的一系列参数计算。由于时间上的先后顺序和参数上的互为因果，故传输阶段的排列顺序应按照实际传输的先后来定。

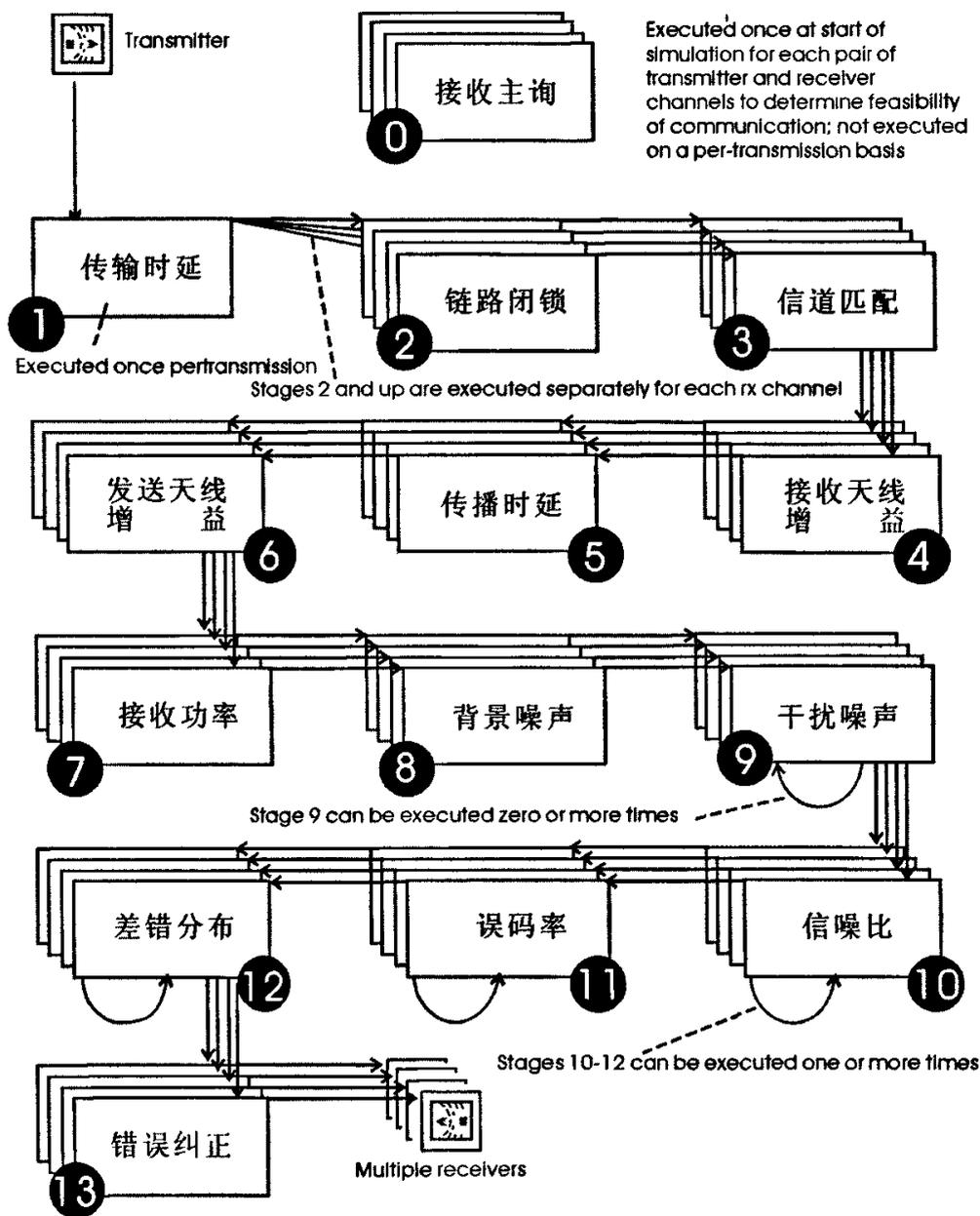


图 2.9 OPNET无线链路的管道模型

Fig. 2.9 Pipe model of wireless link in OPNET

首先在整个传输过程还没有进行之前，把肯定不能被接收的物件圈定出来；在计算传输延时后接着复制封包，对每一个接收主询中的物件都复制一份；然后计算接收闭锁，

检查信道是否完全吻合,如果完全匹配当作有效信号,如果部分吻合当作噪声处理;对于接收器来说,在经历传播时延后,内部产生一个中断,对每一个可能接收的信道进行6-13管道阶段,由于包的每段可能存在不同程度的干扰,因此对每一段需要单独计算,如果是有效包则计算误码率,如果是噪声则考虑对有效包的影响;之后得到包的总误码数多少,最后决定是否丢包。

发信机方管道有:接收主询(receive group),传输时延(transmission delay),链路闭锁(link closure),信道匹配(channel match),发送天线增益(transmit antenna gain),传播时延(propagation delay)。

接收机方管道有:接收天线增益(receive antenna gain),接收功率(received power),背景噪声(background noise),干扰噪声(interference noise),信噪比(signal to noise ratio),误码率(bit error rate),差错分布(error allocation),错误纠正(error correction)。

(1) 第一阶段:接收主询(收信机组)

确定候选的收信机对象,排除肯定不能被接收的物件,减少包的复制,加快仿真速度。

(2) 第二阶段:传输时延

传输时延是数据包的第一个比特开始发送时间和最后一个比特发送时间之差,即是发射电台处理数据包所用的仿真时间。

传输时延可以通过数据包长度和数据传输速率的商得到。

(3) 第三阶段:物理可达性(链路闭锁)

无线链路的物理可达性计算依据视通性来决定,测试连接发射电台与接收电台之间的连线是否被障碍物遮挡,没有则认为可以连接。

(4) 第四阶段:信道匹配

根据发射电台和接收电台的频率,带宽,数据速率,传输编码和调制方式等5个属性来判断信道是否匹配,为正在传输的数据包分成三类。

有效数据包:接收电台和发射电台属性完全匹配,接收电台能够正确接收并解码当前传输的数据包。

干扰数据包:带内干扰,发射电台和接收电台的频率和带宽等属性有重叠部分,该数据包不但不能被正确解码和利用,而且对其他数据包的接收产生干扰。

可忽略的数据包:带外数据包,频带不交叉。即接收器的频率和带宽等属性和发射电台完全不一致,该数据包虽然不能被正确解码和利用,但是不会对其他数据包的接收产生干扰。

(5) 第五阶段:发射机天线增益

发射天线增益刻画了发射信号能量被放大或衰减的现象。由于天线在各个方向上的

功率衰减程度不一样，因此直接影响了包的接收功率，进而影响信噪比和误码数目。实际仿真中可以将发射电台与接收电台的连通向量投影到天线模型的坐标系上，查表获得该链路方向上的天线增益值。

(6) 第六阶段：传播延时

采用以下方法计算传播延时：

$$\text{传播开始时延} = \text{传输开始时收发机间距离} / \text{电磁波传播速率} \quad (2.3)$$

$$\text{传播结束时延} = \text{传输结束时收发机间距离} / \text{电磁波传播速率} \quad (2.4)$$

传播时延为传播开始时延和传播结束时延的折中。

该阶段的数据也用来计算多普勒频移，如公式2.6和公式2.7所示。

$$V_{relative} = \frac{d_{end} - d_{start}}{D_{tx}} \quad (2.5)$$

$$F_{shifted} = \left(\frac{V_{relative} + V_{propagation}}{V_{propagation}} \right) \times F_{unshifted} \quad (2.6)$$

$V_{relative}$ 和 $F_{shifted}$ 分别是相对速度和多普勒频移。

(7) 第七阶段：收信机天线增益

和发射机天线增益的计算方法完全相同

(8) 第八阶段：接收功率

接收功率是有效的数据包到达接收电台的有效功率。接收功率仿真通过以下步骤：首先根据发射电台和接收电台的基准频率和带宽，得到收发电台互相重叠的带宽；其次由频率计算发送波长，再根据无线传播的距离，计算自由空间的电磁波功率传播损耗。

基于地形建模的传播损耗包括两种计算模型，分别是自由空间模型和Longley-Rice模型。

自由空间模型：天线处在真空之中，不考虑任何大气的影晌。如果不被遮挡，则按下面的公式计算路径损耗。

$$\lambda = \frac{C}{\text{Bandwidth}} \quad (2.7)$$

$$\text{传输损耗} = \frac{1}{4\pi \times \text{距离}^2} \times \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2.8)$$

Longley-Rice模型：是基于Longley和Rice两个学者发表的论文。在此模型下，首先获取传输电台和接收电台天线间的地形规格（离地面的海拔），地面海拔来估计天线

的实际高度。根据天线高度和地形参数计算无线电波的衍射、地面反射。基于上面的自由空间传播损耗公式，综合考虑、地面反射和地形衍射，计算路径损耗。在模型中有些限制：无线频率必须在20MHz - 20GHz之间；天线高度必须在0.5m-3000m之间；天线的仰角必须小于0.2弧度。接收功率 P_{rx} 可以用下面一组公式计算。

$$L_p = \left(\frac{\lambda}{4\pi D}\right)^2 \quad (2.9)$$

$$\lambda = \frac{C}{f_c} \quad (2.10)$$

$$P_i = \frac{P_{tx}(f_{max} - f_{min})}{B} \quad (2.11)$$

$$P_{rx} = P_i G_{tx} L_p G_{rx} \quad (2.12)$$

参数说明： L_p = Pathloss, λ = Wavelength, D = Distance, C = Speed of Light, f_c = Center Frequency, P_i = Inband Frequency, P_{tx} = Transmitted Power(watts), f_{max} = Maximum Frequency(Hz), f_{min} = Minimum Frequency(Hz), B = Bandwidth, P_{rx} = Received Power(watts), G_{tx} = Transmitter Antenna Gain(watts), G_{rx} = Receiver Antenna Gain(watts)。

(9) 第九阶段：干扰噪声功率

干扰噪声功率描述了同时到达接收信道的各个数据包间的互相影响。干扰噪声的产生有3种情况：接收有效包时来了另一个有效包；接收有效包时来了一个噪声包；接收噪声包时来了一个有效包。虽然背景噪声功率对于每个包的传输来说，只估算一次，但是干扰噪声功率却可能要计算多次。如果有多个数据包互相干扰，则干扰功率需进行累加，结果施加至接收数据包。

(10) 第十阶段：背景噪声功率

典型的背景噪声源包括了从临近电子元件或者无线电发射的热噪声或射电噪声（例如，车载无线电台，干扰电台等），背景噪声功率建模如下面的公组式描述。

$$T_{rx} = (NF - 1.0) \times 290.0 \quad (2.13)$$

$$T_{bk} = 290.0 \quad (2.14)$$

$$k = 1.379E^{-23} \quad (2.15)$$

$$N_b = (T_{rx} + T_{bk}) B_{rx} k \quad (2.16)$$

$$N_a = B_{rx} (1.0E^{-26}) \quad (2.17)$$

$$N = N_b + N_a \quad (2.18)$$

参数说明: NF = Noise Figure, T_{rx} = Receiver Temperature, T_{bk} = Background Temperature, k = Boltzmann's Constant, B_{rx} = Receiver Bandwidth, N_b = Background Noise, N_a = Ambient Noise, N = Noise.

(11) 第十一阶段: 信噪比

根据前面计算获得的接收功率、背景噪声和干扰噪声等参数来计算SNR。数据包的SNR值用来判断接收电台是否正确接收到包的内容。在一个数据包的整个接收过程当中,可能有多次的其它包的到达,形成了新的干扰功率,每形成一次干扰,都要重新对SNR评估一次。一个包在两次评估信噪比的时间间隔里传输的那一段数据(segment)的SNR是相同的。另外还要加上处理机增益来计算有效的信噪比。

$$SNR_{actual} = 10 \log_{10} \left[\frac{P_r}{P_b + P_i} \right] \quad (2.19)$$

$$SNR_{effective} = SNR_{actual} + G_p \quad (2.20)$$

参数说明: P_r = Received Power(watts), P_b = Background Noise(watts), G_p = Processing Gain, P_i = Interference Noise(watts)。

(12) 第十二阶段: 误比特率

目的是根据SNR的值得到比特错误概率。为了精确仿真无线链路的误比特率特性,BER的计算不是基于整个数据包的,而是基于数据包中的一个一个小段来计算的。因为在数据包的传输过程中,SNR不是固定不变的,从而导致BER也不是固定不变的。

根据调制曲线模型参数和前面传输阶段得到的SNR,再加上信道处理增益(Processing gain)得到有效信噪比,进而查找调制函数表可以得到BER。因为包的每段SNR可能不同,对每一段找出BER之后,最后叠加上总的误码率。

(13) 第十三阶段: 错误分布

根据前一阶段得到的数据包的每一段的误码率,即可计算出数据包每一段数据中的误码数目。然后将它们累积起来即可得到总的误码数目。

根据前面得到的BER,计算有k个比特数错误的概率,再和(0,1)间的随机数比较,如果大于这个随机数,则给分组分配k个比特错误。

$$P_k = p^k (1-p)^{N-k} \binom{N}{k} \quad (2.21)$$

$$\sum_{k=0}^N P_k \geq r \quad (2.22)$$

参数说明: P_k = Probability of k Errors, p = Probability of Error, N = Packet

Length(bits), $r = \text{random}(0, 1)$, $k = \text{Number of Errors}$.

(14) 第十四阶段：错误纠正

该结果描述数据包经历了碰撞和背景噪声干扰后的纠错能力。如果判断能够接收当前数据包，则允许其被继续发送到高层。此阶段的判断直接影响接收信道的数据包丢弃率和吞吐量结果。

基于仿真中考虑到无线电台设备可能被关闭或摧毁，数据包是否可以接收的判断标准有两个：一个是信源端是否完整发送数据包；另一个是比较误比特数是否小于接收器的纠错门限值。如果设备被关闭或摧毁则数据包接收失败；进一步根据误码数目和纠错门限来判断，如果误码数目小于纠错门限则数据可以接收。

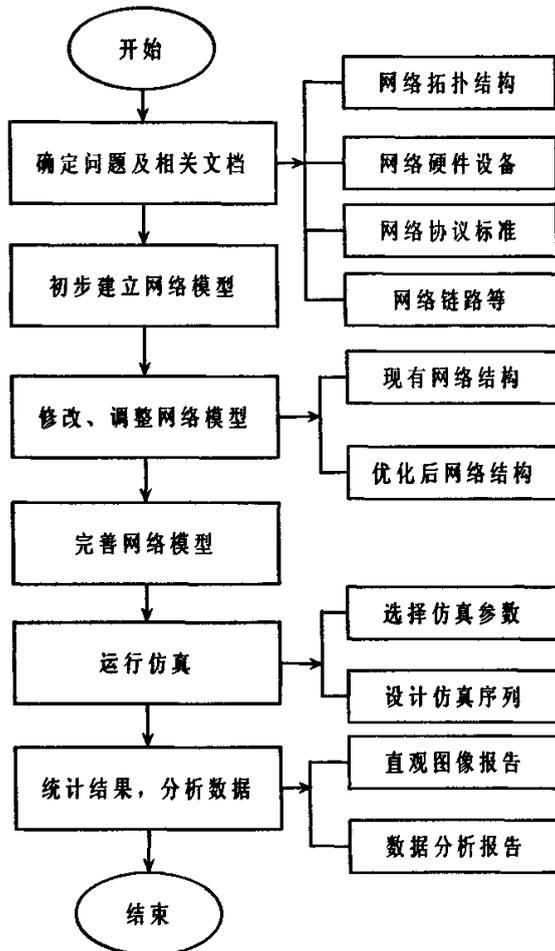


图 2.10 OPNET的仿真流程

Fig. 2.10 Simulation process of OPNET

2.4.5 OPNET 的仿真流程

使用OPNET进行网络仿真的步骤如下：

- (1) 首先确定需要处理的问题和对象，并对网络的拓扑结构、网络硬件设备、所用协议标准、网络链路等作一定了解；
- (2) 根据问题和对象建立网络拓扑结构模型，能够回答要处理的问题；
- (3) 验证模型，对模型进行修改，对现有网络与优化后的网络进行前后比较，最后完善模型；
- (4) 设置仿真参数以及要收集的统计量，如延时(Delay sec)和负载(Load bits/sec)等；
- (5) 运行仿真；
- (6) 系统结果是否准确，结果的容错性和精确性都需要进行验证，结果是否足够详细，结果是否统计可用；
- (7) 统计结果，得出结论并提交仿真报告，既可使用数据分析的形式，也可使用图像处理的方法。

OPNET的仿真流程如图2.10所示。

2.4.6 NS2 仿真软件

NS2是一个开放和免费使用的软件，是美国南加州大学，施乐PARC实验室和加州大学伯克利大学共同合作的一个项目，并鼓励用户对其进行扩展。在当前版本NS2中已经实现了许多常用的网络构件。例如，网络传输协议TCP和UDP，信息源模型FTP、Telnet、web、CBR和VBR，路由器队列管理机制Drop Tail、RED和CBQ，路由计算法Dijkstra等等。

NS2支持各种常用的业务模型，包括邱业务模型、CBR业务模型、On/Off业务模型等。同时它还支持TCP和UDP两种传输协议以及多种路由算法，包括分级路由算法，包括分级路由、广播路由、多播路由、动态路由等，这极大方便了用户的使用。另外支持通过C++二次开发用户自己需要的协议。

NS2采用事件驱动的方式，事件调度是它的一个重要部件。事件是一种包(Packet)，包中有独特的标号、启动时间和一个指针指向处理事件的对象。时间调度器负责监视仿真时间，在事件队列中的时间定义和响应时间启动这个事件，调用负责处理该时间的对象。

NS2采用面向对象技术，这就保证了软件的可扩充性和重用性，提高了程序开发的效率。对象的属性能够很容易地配置，每个对象属于相应的行为和功能和类。类也可以继承其他类，也可以通过C++来定义新的类来满足用户自己特定的需求。

NS2的模拟也分为两个层次：一个是基于Otc1编程层次，利用NS已有的网络元素实现模拟，无需对NS本身进行修改，只要编写Otc1脚本；另一个层基于C++和Otc1编程的层次，如果没有所需的网络元素，就需要首先对NS进行扩展，添加所需要的网络元素，

然后再编写Otc1脚本，整个模拟过程图2.11所示。

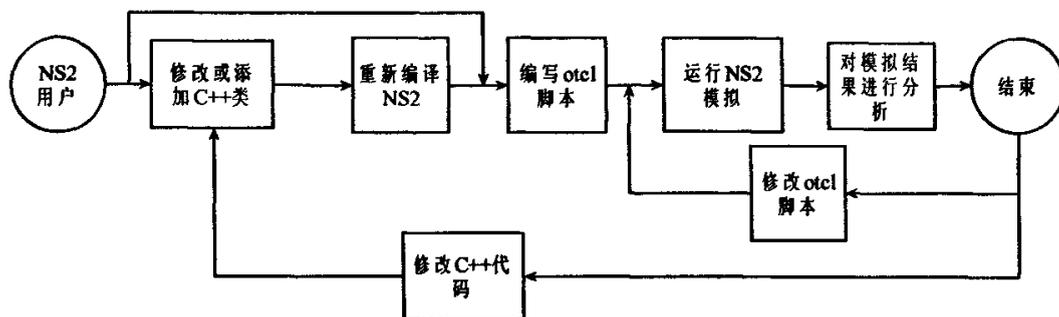


图 2.11 NS2网络仿真过程

Fig. 2.11 Network simulation procedure in NS2

为了分析仿真结果，NS2提供了两种基本数据追踪能力：跟踪和监控。跟踪能够将每个数据包在任何时刻的状态到指定文件中，例如包在队列或链路中丢弃、到达、离开的行为都可以记录下来。而监视则可有选择记录自己需要的数据，例如统计发送包、接收包、丢弃包的总数量。同时NS2还提供了动态显示仿真过程的Ram观察器。

2.4.7 BONEs

BONEs面向模块的网络仿真软件，由Cadence Design System公司下属的Alta小组开发，是一种通用的面向图形的仿真语言，包括若干用于建立通信网络模型的功能，适用于无线通信、多媒体、网络、计算机体系结构以及其他电子系统。BONEs软件采用模块化结构设计方法，提供一个交互式的图形环境，为设计、仿真和分析通信网络系统的结构和协议提供灵活有力的手段。BONEs软件包括两个软件包：BONEsDESIGNER和BONEs Satlab。BONEsDESIGNER面向网络设计，BONEs Satlab面向卫星通信设计。

2.4.8 COMNETIII

COMNETIII由CACI公司开发，是一种面向目标的局域网和广域网仿真器。适用于从简单局域网到复杂企业级网络系统的性能分析和评估。建立网络模型时用户可以通过简单的拖放操作构筑网络拓扑，然后将适当的信息量发生器连接到相关的网络节点上。COMNETIII提供可视化的模型编辑器，并且拥有一个可以扩充的对象库，对象库中的模型可以修改，用户也可以创建新的模型。仿真运行期间用户可以看见仿真的实时显示和动态的图表。用户能中断仿真并改变网络拓扑结构或参数，这些改变所导致的结果将立即显示出来。另外，COMNETIII能产生标准的输出报告。

2.4.9 SSFNet

SSFNet是一个Internet网络及其协议的模拟和建模环境，由基于JAVASSF(Scalable

Simulation Framework)的组件构成,主要支持IP包级别上的细粒度模拟,其中链路层和物理层的协议模型以独立的组件方式提供。SSFNet模型具有自配置的特点,每一个SSFNet类的实例可以通过查询一个已配置的数据库自动的进行自我配置,自我配置可以在本地或Web上完成。网络配置文件以DML(Domain Modeling Language)的形式给出,用于配置一个完整的网络模型。SSFNet分为两个部分:SSF.OS和SSF.NET。SSF.OS用于主机和操作系统组件的建模,SSF.NET用于网络连接、节点创建和链路配置建模。

表2.2对各仿真软件进行了比较和分析^[5, 6, 12-14]。

表 2.2 各仿真软件的特性分析
Tab. 2.2 Properties of Simulation Software

项目	OPNET	NS2	BONeS	COMNETIII	SSFNet
建模方式	面向对象	面向对象	面向对象	面向对象	面向对象
驱动方式	事件驱动	事件驱动	事件驱动	事件驱动	事件驱动
建模环境	图形化	命令行	图形化	图形化	命令行
模型扩展	修改已有模型 或使用 C/C++ 语言编制	使用 C/C++ 语言编制新 模型	使用 C/C++ 语言编制新 模型	修改已有模型或 购买新模型	使用 DML 配 置
动态观察 模拟过程	支持	支持	支持	支持	不支持
结果输出	结果分析器输 出	图形显示器 输出和标准 输出报告	使用后处理 器输出	产生标准输出报 告	图形显示
适用范围	几乎所有网络 和网络技术	主要面向网 络协议	无线通信/ 多媒体/网 络/计算机 体系结构	从简单的局域网 到复杂的企业级 网络系统	主要支持 IP 分组级别上 的细粒度模 拟
运行环境	Windows Unix/Solaris HP-UX	Windows Unix/Linux	HP-UX SUN OS	Windows Solaris	Windows Solaris Unix/Linux
共享性	价格昂贵	免费	价格昂贵	价格昂贵	免费

3 无线传感器网络的设计因素和典型路由算法

3.1 无线传感器网络设计需考虑的问题

设计无线传感器网络的需要考虑的问题有网络的容错性、扩展性、生产成本、工作环境、网络拓扑结构、硬件技术的限制和能量消耗。这些问题即为无线传感器网络的设计提出了要求也可以作为研究的无线传感器网络中各种算法和策略的性能比较的基础 [1, 2, 16]。

3.1.1 能量消耗

无线传感器网络中节点的能量消耗包括计算能力和通信能量。降低节点能量消耗或有效提高能量利用是无线传感器网络中一个非常关键的技术。较低节点的能量消耗就意味着延长网络的生存时间，执行更多地任务，所以无线传感器网络中的节点必须是低功耗的微系统。由于无线传感器网络对能量耗费要求的苛刻性使得无线传感器网络在设计时必需充分考虑能量问题。包括节能措施的跨层设计，有效的可再生能源，大规模、低功耗的集成电路的硬件实现。

如何在无线传感器网络的传感器节点之中均衡能量消耗也是一个重要的问题。网络中由于角色，传感器节点执行的任务也不同，从而导致不同传感器节点消耗的能量也不同。消耗能量过大过快的节点容易由于能量耗尽而导致不能正常工作。使能量在传感器节点之间均衡的、高效的利用可以不仅增加网络的信息传输稳定度，也可以延长整个网络的生存时间。本文将在后面的章节中介绍一个在节点之间通过资源调度从而使节点均衡耗能的路由算法。

3.1.2 节点分布

无线传感器网络中的节点分布是根据应用的不同，分布也不同。可以是随机分布或者分布在固定位置。当节点分布在固定位置时，网络拓扑状态已知，可以沿着特定路径（可能为最近路径）转发信息到基站。在大部分情况下，节点的分布可能是随机的，整个无线传感器网络形成一个无基础设施的 Ad hoc 网络。如果这时网络的节点分布不是均匀分布，最佳的分簇机制可以提供好的网络连通性和能量有效的通信。

3.1.3 路由策略

无线传感器网络中的路由策略的不同是根据数据的实时性而不同的。数据传输策略可以分为：时间驱动方式，事件驱动方式，查询驱动方式和几种策略的混合方式。时间驱动方式可以提供对目标的状态的周期信息。节点可以周期地启动传感器和通信设备，探测数据，处理数据然后发送数据。事件驱动方式可以提供在检测目标发生大的变化时迅速、及时地反馈信息。查询方式可以在基站或者其他节点需要信息时提供迅速的响应。

上述几种策略也可以联合起来使用。信息传递能量的耗费在很大程度上依赖于路由策略的不同^[16]。

3.1.4 网络的容错性

无线传感器网络中的节点与传统有线网络或 MANET 中的节点相比更为脆弱。无线传感器网络中的节点可能因为缺乏能量、受到物理损坏或环境影响等导致节点失败。网络中个别节点或网络中小部分节点的失败不应该影响整个网络的运行或执行任务的失败。无线传感器网络容错性是指：网络中个别节点或小部分节点的失败不应该导致网络运作的中断且能继续整个无线传感器网络的功能。当有节点出现失败时，MAC 和路由算法必须可以形成新的链路来支持由新的路由将信息发送到基站。这可能要求动态调整发送功率和信息率来降低能量消耗或有别的能量充足的区域传送信息。

3.1.5 伸缩性

为了研究特定现象或获得需要的数据，无线传感器网络的传感器节点在一定区域内可能被分布成千上百个，极端时可能分布数十万节点。无线传感器网络中的新的路由机制、节点间合作策略等需要满足这些运行环境对无线传感器网络提出的要求。

3.1.6 传输媒介

无线传感器网络中的通信是通过无线通信方式来进行的。所以无线传感器网络中的通信不仅受到无线通信的限制，如衰落、高错误率、有环境影响大等因素，也受到无线传感器网络中节点的计算能力和通信能力的限制。一般来说，无线传感器网络中的数据传输率较低，在 1—100kb/s 之间。可以选择的无线传输媒介有：激光、红外和无线电等。

使用激光作为传输媒介具有较好的安全性和消耗较少的能量，也不需要天线等优点。然而使用激光通信必须满足视距传播。其次激光对大气环境敏感。激光通信的方向性也限制了它的应用范围。

使用红外线通信一般来说也需要满足方向性。在 PushPin 工程中使用特殊材料将红外线衍射后使红外通信的方向性限制大大降低了。红外通信的另一个缺点就是其通信距离很短。其优点是不需要天线。

无线电 (RF) 通信具有很多优点，技术成熟，使用简单，可以使用大规模集成电路和现代数字信号处理技术等。然而无线电通信的天线尺寸对于传感器的体积来说是一个难题。无线电通信的天线理想尺寸为其通信波长的 1/4。假定使用的通信天线长度为 1mm，则需要使用的发射载波约在 75GHz 左右。这样的高频段通信在低耗能器件上很难实现。

3.1.7 连通性

节点的高密度一般可以保证无线传感器网络中的任何节点都和他的邻居节点有连

接而不被孤立。然而即使在这种网络的高度连通性下，由于传感器节点自身的脆弱性也使网络的拓扑结构和规模在节点失败时变得不可预测。

3.1.8 网络覆盖性

无线传感器网络中每个节点只能采集到被检测目标的一部分特性。部分节点观测到的数据只能反映被检测目标的部分特性，这些数据在数据的全面性和准确性上都不够完善。因此无线传感器网络应被设计为可以覆盖所有被观测目标的所有特性。

3.1.9 数据融合

由于无线传感器网络节点的高密度和检测到的数据自身的特性使得无线传感器网络中传输的原始数据具有很大程度上的冗余。具有相关性的数据从多个节点传输的目的节点的路径中可以通过利用其相关性将这些数据融合来达到减少传输数据的目的。数据融合被定义为将不同的数据源的数据通过一定的融合函数后形成一个可以代表这些数据的联合数据表达。数据融合可以达到减少信息传播的通信量，从而减少能量消耗延长网络的生存时间^[17-21]。

3.1.10 服务质量

在一些应用中会要求信息的时延不超过一个阈值，否则信息就失去价值。这就要求在设计路由算法时需充分考虑信息传输时延。然而在很多情况下信息传递的延时和能量消耗是一对矛盾。在设计无线传感器网络时，仅考虑传输时延和能量消耗都不能取得满意的效果。特别是在网络节点能量不足可能要求降低网络的服务质量来达到延长整个网络的生存时间。从这方面出发应该考虑跨层设计据能量调整服务质量的路由算法。

3.1.11 生产成本

由于无线传感器网络是大规模网络，所以节点的生产成本在很大程度上决定了整个无线传感器网络运作成本。大规模集成电路、信号处理技术和嵌入式技术的不断发展，都降低了嵌入式应用系统等成本。而通信技术的发展也进一步降低了节点的生产成本。使用蓝牙技术的无线传感器网络节点是普遍认为比较廉价的一种解决方案。但是目前使用蓝牙技术的无线传感器网络节点成本约十美元左右，仍然和工业应用普遍期望的 1 美元的成本相差较大。所以无线传感器网络的大规模工业生产还需要更先进、廉价的硬件设施来支持。

3.1.12 网络拓扑结构

在大部分环境下，无线传感器网络中节点和基站都是静态的，而在一些特殊情况下它们可能具有一定的移动性。鉴于节点的计算能力和通信能力的有限性，在节点移动的环境下维持网络的拓扑结构是一个复杂的问题。

无线传感器网络在网络层需要有高效的通信机制来满足最小化能量耗费的要求。这

些问题包括调制技术、信道分配技术、信息编码和路由策略。有效的跨层设计可以较好的满足苛刻的节能要求。

3.1.13 无线传感器网络对硬件平台的设计挑战

每个传感器节点包含了数据采集、信号处理、复杂的通信设备和电源等必要子系统,还可能有一个支持节点本身低速移动的子系统。大部分场景下,传感器采集的数据和位置信息联系在一起才有意义。所以在特定场合下一个定位子系统也可能是必需的。而传感器体积必须足够小,有类似火柴盒大小的体积或几立方厘米大小。这样可以高密度分布在被采集数据区域或在必要时在空中采集数据,例如一些特定应用的气体传感器。除了体积的因素外,传感器节点在硬件实现时还考虑消耗极低的能量,可以工作在恶劣环境下。

3.2 无线传感器网络中的典型路由算法

3.2.1 直接散布

直接散布(Directed Diffusion)的目标是在网络中寻找一条链路质量最好,通信代价最小的路径。基站广播需要的数据的查询信息。查询信息描述了网络需要反馈的信息。查询信息被每一个接收到的节点广播到自己的邻居。一直到整个网络中节点都接收到这个查询信息。查询信息在节点之间传播时,节点之间建立一个梯度方向,表明从哪一个节点收到这个查询信息。这样在传播查询信息的过程中整个网络从信息源节点到基站之间建立起了梯度。每个梯度包含了一个链路质量值(数据率)和一个方向。这个阶段网络可能存在回路,网络中也存在多个从源到目的端的路径。最后每个节点通过本地的交互操作来从自己到目的端链路质量最好的一条路径,阻止以后的查询信息防洪广播。节点在传输数据时使用在本地记录近期发送的数据用来阻止回路。数据在从源传输到目的节点的途中做信息融合。由于并不能保证一开始查询信息就散布到了网络中每一个节点,所以基站从源开始接受信息后,仍然周期广播查询信息。

直接散布(Directed Diffusion)的性能受很多方面的影响,包括信源位置,信源数量,通信网络拓扑结构等。虽然在路径建立阶段发现多条路径,但是最后只维持其中的一条路径^[22]。

3.2.2 LEACH

LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)是一种分层路由算法。每轮信息收集时,都将网络动态的分簇。簇头在簇内收集信息然后直接向基站传输。簇头通过随机选举产生,但是每个节点成为簇头的概率相等。这样可以保证通信能量消耗的公平性。簇头产生以后,其它节点根据接收到的来自簇头的广播信息能量来决定加入哪一个簇。LEACH在簇内使用TDMA来调度节点通信,簇间使用CDMA来减小簇间通信干扰。

LEACH 通过巧妙的设计使节点成为簇头的概率相等来将网络能量消耗平均分配到各个节点，防止某些节点过早的失败，从而来延长网络的稳定。

LEACH 也假设相邻节点的信息有相关性，簇头收集到的信息在向基站传送之前可以做信息融合来减少传送冗余信息。LEACH 虽然通过巧妙的设计保证了每个节点成为簇头的公平性，但是并不能保证这些簇头均匀分布在整个网络。这样就有可能导致网络中某一区域内分布了大量的簇头，而在另外一些区域则可能簇头的密度很少。在簇头稀疏的区域，节点和簇头之间通信需要消耗大量能量。LEACH 的这种特性可以经过改良以适应节点非均匀分布的应用。LEACH 在每轮信息收集时都需要重新分簇，这种开销对于拥有有限资源的传感器节点来说太昂贵了。LEACH 同时也假设了每个节点可以控制发送功率，在必要时都可以直接和基站通信^[1,2,23]。

3.2.3 SPIN

SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) 假设网络中每个节点都是基站，将每一个节点采集到的信息散布在整个网络中，这样就可以使网络中每一个节点都拥有整个网络的所有数据信息。这时，如果用户想要查询数据只需与网络中任何一个节点通信即可。这时问题的关键就是如何在保持小的通信量的前提下节点有效的向网络散布采集到的信息。SPIN 使用了数据协商来减少数据散布的通信量。假设网络中相邻节点拥有大量相似信息，节点之间只需交换某一方节点没有的数据。例如：当某一节点采集到新的数据时，节点向网络中广播自己拥有的新信息的一个描述。如有其它节点对这个信息感兴趣，则要求拥有新信息的节点向它传输数据。在这个数据协商过程后，才开始实际的数据交换。SPIN 要求上层协议使用一种机制可以对原始数据准确进行数据描述。在交换任何实际的原始数据使用数据描述来进行数据协商以确定是否需要进行数据交换。这样的机制保证了冗余数据在网络中的最少传输。SPIN 也可以根据自身资源状况，如能量的多少，来调节协议的运行。SPIN 是时间驱动路由，即使在没有要求任何数据信息也会周期进行数据散布。

SPIN 通过数据协商和据能源调节运行状态来改善泛洪路由的低效率。SPIN 通过如下两个方面来改进路由算法性能：首先，对在网络中传输数据的描述比直接传输数据更有效；第二，泛洪路由在网络中某些区域重复传输同一数据信息的不同副本。SPIN 并不能保证数据被散布到网络中所有节点。例如，当某一节点拥有新数据时，向网络中广播其拥有新的数据，它周围的邻居节点可能拥有相同的数据信息，所以这次信息广播就被限制在某一个区域。与这个节点相距较远的另一节点可能对这一个节点感兴趣，但是却无法接收到来自信源节点的信息广播。

SPIN 假设网络拓扑为平面网络，按数据协商运行的一种协议^[1,2]。

3.2.4 PEGASIS

PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information System) 将网络中所有节点都看作连接在一个链上, 在基于链的路由算法中是性能接近最佳的。节点只与最近的邻居节点通信, 来减少通信能量的消耗。每轮信息收集时只使用链上的一个节点作为簇头与基站通信。链上节点轮流成为簇头保证了通信开销的公平性。每轮信息收集时所有节点都将自己的信息发送到簇头, 信息在每个传输过程中作信息融合。由于信息在链状网络中传输, 可以最大程度的减少冗余信息。

PEGASIS 首先通过信息在传输过程中最大程度的信息融合来减少通信量。其次, PEGASIS 只允许节点与最近的邻居节点通信来降低通信发送功率, 延长网络通信时间。第三, PEGASIS 也将网络的通信任务平均分布在每个节点上。

由于 PEGASIS 网络的拓扑构造成一个链状结构, 虽然可以最大程度作信息融合, 但是延迟过大, 不适合一些要求小延迟特性的应用。利用了网络分层可以在信息传输过程中实施并行计算也可以减少信息传输延迟。

PEGASIS 可以看作一种特殊的 LEACH, 即整个网络只有一个簇。路由协议 E-LEACH 和 C-PEGASIS, 利用了 LEACH 的分簇思想和 PEGASIS 中节点与最近邻居通信来减少能量消耗的思想, 比 LEACH 和 PEGASIS 协议降低了能量消耗^[9, 11, 19]。

3.2.5 TEEN

TEEN (Threshold-Sensitive Energy Efficient Protocols) 为实时应用而设计。传感器连续采集数据, 但是以相对较低的频率发送到基站。簇头向其成员节点发布一个硬阈值和一个软阈值。硬阈值用来限制采集的数据范围。软阈值是一个相对较小的值, 用来触发当目标变化超过这个值时打开发送器向簇头发送信息。使用软、硬两个阈值来减少通信量。小的软阈值在使节点反馈更精确的数据同时也增加了通信开销。

TEEN 允许用户可以使用软、硬阈值结合平衡数据的精确和通信开销。这种思想可以应用在网络设计时对一对矛盾寻求平衡的方案中。例如将网络的某些特性参数或一些需要达到的目标量设计为一些参数, 可以根据应用和网络运行的不同状态来调整节点的运行状态。在 QoS 路由算法中可以加入节点当前能量状态的指标, 根据要求的目标 QoS 和当前节点的能源状态指标来计算网络可以提供的 QoS。在分层网络中, 节点可以根据接收到簇头信号的强度和其它一些信息指标, 例如节点之间信息的相关性和节点任务角色的不同, 来决定加入哪一个簇。

TEEN 最大的缺点就是如果节点没有收到来自簇头的软、硬阈值的广播, 节点不向用户反馈任何信息。APTEEN 对 TEEN 加入了节点在限定时间内必须通信一次的限制。APTEEN 还对用户提供了可以限定的阈值, 和使用 TDMA 调度节点的通信等来调高协议性能, 但是增加了额外的复杂度。

3.3 当前无线传感器网络研究中的开放性问题

由于无线传感器网络的节点一般只配备有限的能量,如何有效的利用有限的能量一直是研究的热点。无线传感器网络能量消耗直接关系到网络的生存时间,在以后关于无线传感器网络的研究中如何有效利用有限能量,如何降低节点能量消耗还将是各种研究共同关注的热点。通信能量的消耗在节点能量消耗中占据很大比重,有效、节能的路由策略仍然会是被广泛研究的热点。

3.3.1 网络容错性

传感器一般会以高密度的被散布在被观测目标或现象的内部。由于传感器节点的脆弱性,使得它们很容易因为各种外部或内部的因素而脱落网络。部分节点的脱落网络会对网络拓扑造成很大的改变。路由技术如何利用网络的拓扑的冗余度来很好的应对节点失败还需要进一步研究。

3.3.2 分层结构

网络的分层结构已经提出了很长一段时间,也有了大量的研究。研究说明在网络的规模和分层网络结构是否有效可能存在一个确定关系^[21]。在分层策略中加入对成员能量的考虑也会是无线传感器网络中的一个值得关注的研究方向。传统分层网络的分簇以地理位置或者信号强度作为标准,以求达到区域内较小的通信代价。如果在分簇时以节点之间信息的相关性作为分簇标准,则可以最大程度利用数据信息的冗余来实施数据融合,从而减少网络的通信量。较小通信代价和高度的数据融合之间存在一对矛盾,如何在这对矛盾之间取舍才可以达到整个网络较小的通信代价也是一个值得关注的问题。

3.3.3 节点任务的分配

将一个大的检测任务划分为几个小的任务,利用无线传感器网络节点高密度分布和节点之间的相关性,将这些小的任务合理有效的分配给不同的节点。从而在数据采集期间就可以在一定程度上降低数据的冗余性,较小了冗余信息的传输。合理的对节点分配给不同的任务要求对采集数据或被检测目标有一定的先验知识,这在实施起来也具有很大难度。

3.3.4 利用空间节点的差异性和密度

为了适应不同应用的多样性,一般会在无先验知识的被检测区域散布高密度的节点。这些高密度分布无线传感器网络节点的区域,单个节点可能达到的通信距离内可能分布大量的节点。在网络运行一段时间后,某些节点可能由于能量消耗过大,需要降低通信发送功率,这时可能要求原本通信任务小、能量充裕的节点来分担一些通信任务。如何利用节点的高密度和节点之间的差异性进行有效的通信仍然是一个值得关注的研究热点。

3.3.5 如何通过节点本地的算法来达到整个网络性能的优化

整个无线传感器网络是一个分布式计算的系统。每个节点可以执行一定的计算任务，节点直接协作来完成网络的整体的任务。例如在路由机制里，如何通过每个节点本地的选路算法使整个网络的路由接近最优。同样的问题也存在于数据融合，节点任务分配等机制里。

3.3.6 时间和位置信息的同步

在要求网络提供 QoS 时，时间和位置信息也可能会在要求提供数据信息时被提供。如何在数量巨大的节点之间同步时间和位置信息而又不影响网络的正常运行和生存时间也是一个值得进一步研究的问题。

3.3.7 定位系统

在很多应用中要求节点在提供采集的数据的同时提供位置信息。GPS 技术提供了精确的定位信息，但是只能使用在室内。而且其接收器的成本昂贵也限制了应用于无线传感器网络中。发展与蜂窝网络的定位技术，实施起来相对简单，但是提供的位置信息精度对于高密度的无线传感器网络来说还有待进一步提高。还有一些户外定位方案利用了三角计算公式和坐标变化等原理来提供位置信息。这些定位技术本身要求网络节点之间频繁通信，其带来的通信代价对于无线传感器网络节点是否可以容忍仍然需要进一步考察。简单准确的定位技术可以进一步拓宽无线传感器网络的应用范围和提高无线传感器网络采集所得数据的价值^[3,24]。

3.3.8 自适应配置

网络运行的不同时期网络的拓扑结构和节点拥有的资源可能都不相同，这时节点应该可以自我调节运行状态来适应网络的变化。例如在节点能量充裕时可以向网络提供较高的 QoS。而在节点能量消耗过度时，节点可能就要降低 QoS 或者停止参与一些网络活动以延长其生存期。

3.3.9 安全路由技术

尽管现在的路由机制在设计时都没有考虑信息的安全性。但是各种路由技术的安全性仍然需要被仔细考察。实施安全路由的一个最大挑战就是：现在的路由技术大量使用数据融合来降低网络的通信量，中间节点在实施数据融合时必须直接的访问原始数据，这就导致很难在数据源节点和目的节点之间建立安全的数据通道。

4 节点间均衡耗能的无线传感器路由算法设计

在这一章节中,介绍一个通过资源调度从而使网络中的传感器节点轮流承担耗能较大的远距离通信任务的路由算法并分析其性能,然后在这个路由算法的基础上给出一个改进的路由算法。

4.1 基于资源调度的静态路由算法 (SCIRS)

首先会介绍这个资源调度的静态无线传感器路由算法基于的两个假设。在这两个假设条件的基础上,会介绍所设计的这个基于资源调度的静态路由算法 (SCIRS: Static Clustering with Intra-cluster Resources Scheduling) 的运行机制,包括集中式网络拓扑计算、网络拓扑形成和簇内调度传输。对基于资源调度的静态路由算法 (SCIRS) 作一个定性的分析之后,会给出这个路由的一个改进算法,即低耗能静态分簇路由算法 (LESCS: Low-energy Static Clustering Scheme)。

4.1.1 资源调度的静态无线传感器路由算法基于的两个假设

首先,假设资源调度的无线传感器网络中所有传感器节点分布的位置信息都是可以被分布在传感器节点分布区域附近的基站所知道。也就是说,无线传感器节点分布区域附近的基站可以记录整个无线传感器网络的所有节点的位置信息。在大多数应用中,无线传感器网络所采集的数据要求和位置信息相关联。例如,分布在山区高速公路上的交通检测传感器网络中,当有某一个传感器节点检测到道路情况异常时,需要将发生道路异常的区域的地理位置信息或者地理位置信息对应代码和发生异常情况的状态信息整合在一起,作为一个数据包发送出去,通知远程道路检测系统。拥有智能家庭网络的房子中,某一个压力传感器检测到房子的某一面墙壁受到的压力远大于其他正常水平时,也需要将承受大压力的墙壁的地理位置信息,在大多数情况下也就是传感器自身的位置信息,和压力信息等一些目标物体的状态信息做一个数据整体发送到中央监控系统上用于触发整个房子的安全系统。散布在动物生态栖息区的传感器也需要将自身的位置信息和检测到的动物种类和数量等信息一起发送到科研人员的终端上,才能帮助科研人员分析动物的栖息等生活习性。由此可见,在大多数应用中,无线传感器网络节点的地理位置信息和无线传感器节点检测到的数据一样重要。

关于无线传感器网络节点实用的地理位置信息大概分为绝对地理位置信息和相对地理位置信息。绝对地理位置一般可以通过 GPS 等定位手段得到。相对地理位置可以通过传感器节点之间的相对位置或传感器节点和基站之间的相对位置来计算得到。通过 GPS 得到的地理位置信息,一般是通过专用的 GPS 芯片来接受卫星信号,然后计算出准确的位置信息。其特点是精确度高,成本高,适合检测区域较大的无线传感器应用。相对地理位置信息可以通过接收来自不同基站的参考信息,然后通过计算信号接收的时间差和方位差就可以得到传感

器节点自身的相对位置信息。在大多数的无线传感器应用中位置信息都至关重要，并且可以通过不同途径获得不同精确度的位置信息，所以假设本节要讨论的资源调度的静态无线传感器路由算法是在基站可以获知所有传感器节点位置信息的基础上设计的。

第二个假设是，所有无线传感器节点在散布到目标检测区域以后几乎没有位置上的改变或者改变很小。在大多数的应用中，无线传感器网络的节点都是能量等资源有限的独立节点，几乎不会装备用来改变位置的动力装置。但是在一些场合下，不可避免的存在一些外界因素导致的传感器节点的位置变化。例如温度传感器节点会在一些特定情况下随着附着的被检测物体一起移动而导致位置的细微变化。所以当这些节点被分配到目标检测区域后，几乎是不移动的或者说位置信息几乎是不改变的。如果传感器节点被安置于某一固定地点后，在其有效生存时间内不移动或者只有很小的移动，就可以等效为网络的拓扑结构在大部分时间内都是不发生变化的。利用这一假设，就可以利用集中式网络拓扑计算算法来计算出一个近似最佳的网络拓扑结构。

4.1.2 集中式网络拓扑计算

资源调度的静态无线传感器路由算法在所有传感器节点被安置在被检测目标区域以后，会通过基站所掌握的信息计算出一条近似最佳路由。

大多数的无线传感器应用都会在被检测目标区域安置一个基站。来自无线传感器网络的数据信息被基站处理后可以发送到远程用户数据终端上。基站由于处在被检测目标区域的外部，而且可以重复利用，所以基站的设计一般不受体积、能源等限制，而且一般也会设计为具有足够信息处理能力的终端。

集中式网络拓扑计算将网络拓扑的计算任务分配给具有较强信息处理能力、资源不受限制的终端，大多数情况下会是被安置在被检测目标区域的基站。其一般过程为，首先基站收集整个网络的传感器节点信息，例如每个节点位置信息和每个节点的能量信息。然后根据一定规则计算整个网络的最佳路由。将网络的拓扑结构的计算任务分配给基站，可以有效减少网络拓扑计算阶段传感器节点的能量损耗。

使用传感器节点来分布式计算网络的拓扑结构，一般过程为，首先传感器节点发现分布在自己周围的邻居传感器节点并和这些邻居传感器节点建立连接。选择邻居节点中的一个作为自己的信息传输目标。再通过这个邻居节点用相同的方法发现网络传输路径上的下一跳的传输节点。通过重复这样的步骤，最后消息源节点可以找到一条通向目标节点或者基站的路由。往往一次发现的路由并不是最有效的路由，所以如果需要得到一条非常有效或者近似最佳的路由需要通过网络中每个节点都在路由发现和信息传输过程中继续发现新的更有效的传输路径。这样的路由发现由于使用了网络中多个节点作为中继节点来发现下一跳的路由传输节点，所以发现一条路由都会消耗很多无线传感器节点宝贵的能力资源，如果需要优化路由信息更需要多次不断的更新路由信息，寻找新的路径。一条高效的路由的发现不仅需要很多节点消耗不少的能量，也需要很多不断重复

的路由发现过程来找到最佳路由。而一个节点在发现其邻居过程一般也会通过广播来发现邻居,这样又会引起无线信道资源的浪费。使用传感器节点来分布式计算网络的拓扑结构的优点是可以动态适应网络的变化,灵活性好。在能量消耗不均匀或网络中承担的任务分配不均匀的无线传感器网络中,网络被安置到被检测目标区域并运行很长时间以后,可能会有一定数量的无线传感器节点由于过大消耗能量等原因而导致节点较其他节点提前失败的情况下,分布式计算网络的拓扑结构可以较好的适应这种网络的变化。

与使用传感器节点来分布式计算网络的拓扑结构的路由发现过程相比,集中式网络拓扑计算可以有效减少网络节点的能力消耗,并且路由的发现与建立过程耗时短,路由效率高,可靠性好。集中式网络拓扑计算的缺点是,路由计算的灵活性不够好,不适合结构或拓扑随时间变化较大的网络。这也是为什么无线传感器节点在散布到目标检测区域以后几乎没有位置上的改变或者改变很小的理由。只有在保证了传感器节点没有移动性或者移动性很小的情况下,才可以使由集中式网络拓扑计算出来的路由性能保持在一个比较理想的状态下。

在基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)中,已经假设了安置在被检测目标区域的基站掌握着所有无线传感器节点的位置信息。所以集中式网络拓扑计算的工作可以简化为利用一定规则来计算出一条在这种规则下的最佳路径。集中式网络拓扑计算常用的规则有:整个网络在传送一定的数据包时耗能最小,网络传输从源节点发送数据到目标节点接受到数据的网络延迟最小,网络传输从源节点发送数据到目标节点接受到数据的网络路径最短(网络的跳数最短),使网络中数据在保持一定稳定性或者冗余性的条件下满足耗能最小,网络的生存时间(从无线传感器网络被安置在被检测目标区域开始检测目标到无线传感器网络维持的检测性能已经不能满足应用的需求之间的时间)最大等。

在基于资源调度的静态路由算法中选用使网络按地域最平均分簇作为计算网络拓扑的规则。网络分簇不均匀是无线传感器网络中经常遇到的一个问题。前面的章节中已经阐述了 LEACH 虽然可以使每个无线传感器节点都有均等的机会成为网络中簇的节点,但是 LEACH 没有很好的解决网络平均分簇的问题。有可能在一个很小的区域中出现两个以上的簇头,很大的区域可能只有一个或者没有簇头的情况^[1, 2]。当很小的区域中出现多个簇头时,可以通过协商使两个以上的簇融合为一个簇,但是协商的过程本身就会使网络消耗更多的能量,从而导致路由算法性能的下降。

如图 4.1 所示的被检测目标区域使用按地域平均分簇作为计算网络拓扑的规则后,可以将网络分割为如图所示的网格状网络。在基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)中,在一个小方格区域内的所有节点被划分为一个簇。然后将每个小区域中最靠近小区域中心的无线传感器节点选择为簇头,如图 4.2 所示。簇头用于管理簇内其他无线传感器节点,使簇内所有无线传感器节点协调工作。然后基站会发送一个至整个网络所有节点的广播通知簇的划分和簇头的位置信息。

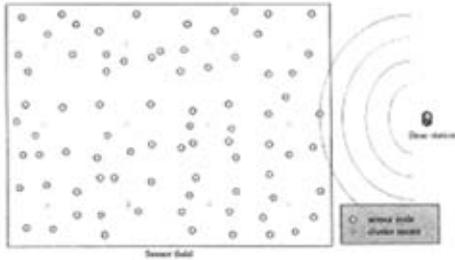


图 4.1 基站发送分簇信息广播
Fig. 4.1 Base station broadcasting

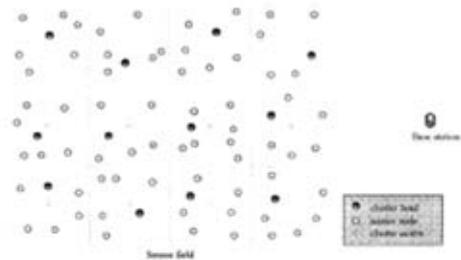


图 4.2 簇头的选择
Fig. 4.2 Selection of cluster head

由于在分簇的无线传感器中簇头和簇内普通节点的通信比簇内普通节点之间通信更频繁，所以按地域平均分簇可以保证簇内同样的通信量下簇内的整体通信耗能接近最小耗能，尤其是可以节约簇头的通信消耗，延长簇头的生存时间。簇头又是决定基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)主要网络性能的一个重要角色。

基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)将网络分簇以后簇的组成不再变化，也就是说一旦一个无线传感器节点被划分到某一个簇中，直到这个节点消耗完所有能量死亡之前都是为这个簇工作。这也是无线传感器网络中静态路由的一个特点。静态路由和集中式网络拓扑计算都会导致路由算法的灵活性比较差。反映在和动态路由和分布式计算网络拓扑结构的路由算法的特性比较中，就是在网络运行一段时间以后（一般情况下可能会是网络生存的后期，或者说网络性能开始出现下降的阶段），如果有一些节点较其他节点提前因为消耗完能量而导致节点失败时，使用静态路由或集中式网络拓扑计算得到的路由的性能会急剧下降。特别是网络的骨干节点（在大多数情况下可能为簇头）失败后，整个网络的性能下降剧烈甚至到整个网络不能工作。所以如何克服集中式网络拓扑计算得到的静态路由在出现网络中节点少量失败时会导致整个网络的性能急剧下降，是在基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)中要解决的一个重要问题。

从上面的分析中，看到导致集中式网络计算得到静态路由路由算法的性能急剧下降的原因是有少量的节点开始失败的时候，那么这个问题的解决可以转换为如何延迟这些少量节点的提前失败。那么要工作的就是将这些承担着大量网络任务的无线传感器节点的任务重新做一些调度，从而使节点的耗能比较平均，延迟网络性能出现急剧下降的时间。这也是将在仿真中用到的一个衡量路由算法性能的一个主要准则。

4.1.3 网络拓扑形成

完成了对网络的分簇过程之后，基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)进入第二个阶段，簇的形成。在簇的形成过程中，除了簇头和普通簇内节点，还有另外一个簇内角色就是网关。簇内网关的作用就是把簇内的要发送的数据收集、融合，然后负责和传输路径上的下一个传输簇进行通信传输。当网络中的无线传感器节点接收到来自基站的含

有簇的划分和簇头的位置信息的广播时，除了被选择为簇头的节点，其他节点都会选择离自己距离最近的簇头向其发送要求加入簇的请求信息。节点向簇头发送的请求加入簇的信息中会包含自己位置信息和自身可用能量信息。簇头接收所有要求加入自己所管理簇的请求信息，然后记录每一个请求节点的位置信息和可用能量信息。然后，簇头会给每一个加入的节点分配一个编号，并选择其中的一个节点作为网关。簇内选出来的这个网关，主要负责将簇内其他节点的信息收集起来，然后向临近的簇发送这些信息。簇内的编号是簇头用来调度不同的节点为簇间传输代理，并且可以保证不同的节点都有相同的概率成为网关。簇头记录簇内每一个节点的可用能量信息用来保证不会让能量过低的节点承担簇之间的通信任务。

经过网络拓扑形成这一个阶段，网络中所有传感器节点都被划分到不同的簇内。在簇内，节点被分为簇头，普通簇成员和网关三种类型的角色。簇头负责管理簇内所有成员和调度簇内节点之间的任务分配。

对于无线传感器来说，其用来驱动无线通信模块的能量消耗和维持其他功能模块的能量相比约相差两个数量级，其他功能模块的耗能可以忽略不计。在无线通信模块的耗能中，包含用于驱动发送电路的能量消耗和用于驱动接收电路的能量消耗。和驱动发送电路的能量消耗相比，接收电路消耗的能量约比发送电路消耗的能量小两个数量级。所以，在考虑如何节约无线传感器节点的能量消耗时，首先要考虑的是如何节约无线传感器节点在无线电发送功能模块上的能量消耗。由于通过无线链路发送的无线电信号在空间的衰减和距离的平方成反比，为了保证发送的信息可以被接受的节点正常接受，发送节点在发送信息时其信号的强度和发送的距离的平方成正比。由此可知，通信距离越远，发送节点消耗的能量越多。在基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)的分簇网络结构中，网关负责和相邻簇的通信，所以消耗能量较其它节点大。于是可以考虑使用簇头来检测各个节点能量，然后周期性的调度不同的节点作为网关，负责和相邻簇之间的通信。这样就可以将簇间通信这个消耗能量过多的任务分配给簇内所有无线传感器节点，从而防止簇内各部节点提前失败的发生。

4.1.4 簇内调度

由图 4.3 可以看出来，网关节点负责将收集簇内的信息并且发送到下一跳的节点上。由前面分析可知，无线传感器节点在驱动其通信模块时消耗的能量与距离的平方成正比。而接受信息消耗的能量又比发送信息消耗的能量小两个数量级。所以负责簇间通信的网关节点的能量消耗要大于普通节点发送信息至网关节点时消耗的能量。如果这种网络结构一致不发生变化的话，网关节点就会由于能量消耗过大提前失败。从而会导致整个网络传输性能的恶化。而簇头节点由于负责整个簇的管理，而且也维持正常的和网管节点的通信。所以簇头节点在一次簇内通信过程中也会比其他非网关节点消耗多一点的能量。由此可以看出，在一次簇内通信中，消耗能量最大的是网关节点，其次是簇头，

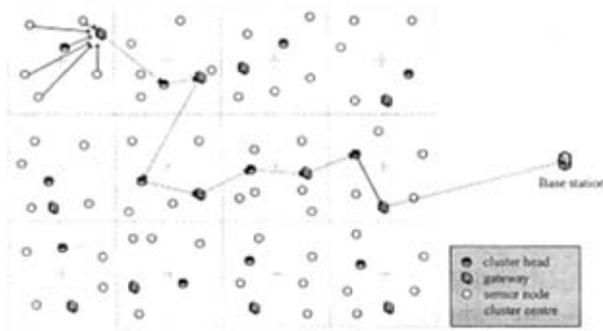


图 4.3 传感器网络的分簇和数据传输

Fig. 4.3 Clustering and data transmission of WSN

然后是普通簇内节点。所以本文尝试使用簇头对簇内所有节点进行周期性的调度。将承担通信消耗能量最大的簇间通信的网关角色分配到簇内不同的节点上。

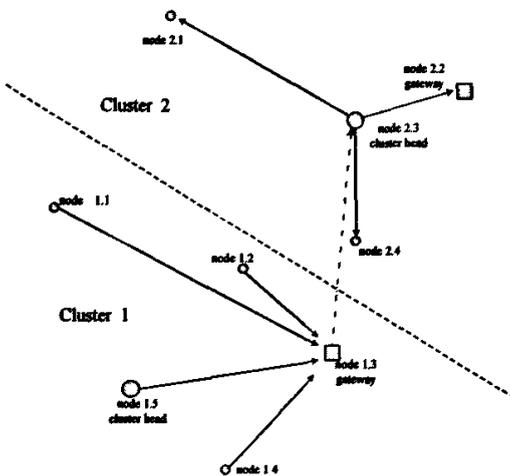


图 4.4 相邻簇的网络拓扑和簇间通信

Fig. 4.4 Topology and communication between two adjacent clusters

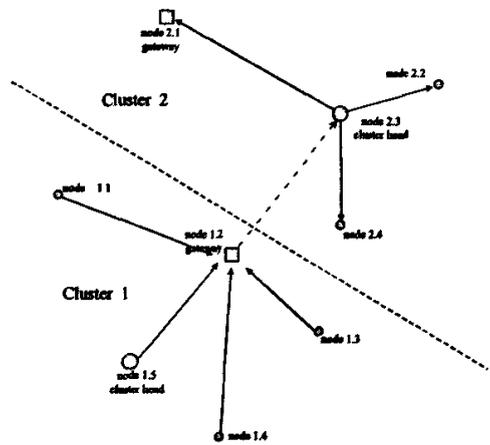


图 4.5 相邻簇间在不同回合时的网络拓扑

Fig. 4.5 Topologies of two adjacent clusters in different rounds

簇头执行每两次网关节点调度的时间称为一个回合 (round)。在网络结构上，每两个回合之间的区别为每个簇内的网关可能是不一样的节点。由于网络内的路由信息是由基站在给定条件下作集中式计算出来的信息，网络中每一个簇只负责将收集到的信息发送到下一跳的簇内，如图 4.4 所示。

图 4.5 是相邻两个簇的簇头进行网关节点调度之后，不同的回合时两个簇之间通信的拓扑结构示意图。图 4.4 所示图中簇 1 中, node 1.5, node 1.3 为网关, 其他节点 node 1.1、node 1.2 和 node 1.4 为普通簇内节点。普通簇内节点和簇头都将采集到的信息发送到网关节点 node 1.3, 网管节点 node 1.3 将来自簇内的信息收集起来并作必要的信息融合,

然后将融合后的信息包发送到簇 2 的簇头节点 node2.3。整个过程如图 4.4 所示。

为了避免簇 1 内网关节点 node1.3 由于承担簇间通信而导致能量消耗过快,过一定的时间后,簇 1 的簇头 node1.5 会根据簇内各个节点能量的情况进行簇内网关角色的重新分配。如图 4.5 所示,簇 1 的簇头 node1.5 选择节点 node1.2 作为簇内的网关节点。所有簇内节点都会向新的网管节点 node1.2 发送采集到的信息,然后新的网管节点 node1.2 会将收集到的信息发送到路由路径上的下一个簇内的簇头。

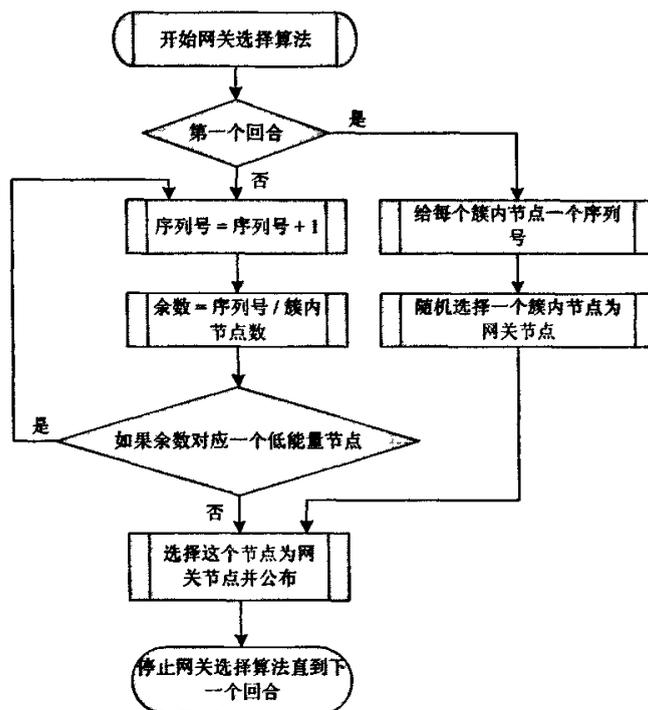


图 4.6 SCIRS 的网关选择算法

Fig. 4.6 Gateway selection scheme of SCIRS

每过一段时间,簇头都会根据记录的每个节点的能量情况来选择网关节点。簇头使用节点的序列号进行簇头调度。每调度一次都会增加自己维持的一个序列号。簇头使用这个序列号对簇内节点的数目求余数,然后选择对应的节点作为网关。当簇头通过序列号选择的节点的能量低于一个预定的阈值时,簇头就会增加自己维持的序列号,直到找到一个有足够能量可以承担网关通信任务的节点。图 4.6 描述了基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)在簇内的网关选择算法^[26]。

4.1.5 路由性能的定性分析

基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)使用基站集中式网络拓扑计算得到网络的分簇信息和拓扑结构。在得到网络分簇信息和网络拓扑结构之后,网络中的无限传感器节

点会加入不同的簇。这些簇由基站指定的簇头来管理。簇头会周期性的调用自己所管理簇内的普通节点扮演网关角色。簇头、网关和普通簇内节点没有硬件层次上的区别。仅有的区别只在三种节点在网络数据传输中扮演不同的角色。簇头负责管理簇和协调簇内的节点工作。网关负责收集簇内的数据并将数据发送到路由路径上的下一跳的簇的簇头。簇内普通节点在没有被簇头分配网关任务时,执行采集数据的任务,并在指定的时间内把采集到的数据发送到簇内的网关节点。

基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)和动态路由或者分布式计算路由相比,其整个路由算法在执行过程中,将耗能大的网络分簇和网络拓扑计算等任务用资源几乎不受限制的基站来执行。从而避免了传感器网络使用传感器节点进行网络拓扑计算和路由发现等导致的过大能量开销。也由于使用集中式网络拓扑计算,从而不需要传感器节点在路由发现过程中不断的发现新路由而导致的能量开销。这样的静态网络可靠性高,网络结构简单。最大可能的减少了高效率网络的建立过程的信息传输过程。

基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)使用集中式网络计算的机制也导致了它不能适应网络的动态变化,例如一些传感器节点或者检测目标会随着时间或者环境的变化而导致网络的结构等变化的传感器网络。当网络构成或者网络的拓扑等随时间发生变化时,由于基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)不能及时将这种变化反馈到基站。而传感器节点又缺少自适应网络变化的机制,所以不能做出及时的网络结构或者路由的优化调整。由此可知,增加从传感器节点到基站的适当的网络结构变化的反馈机制,可能会提高整个传感器网络的适应环境变化的灵活性。可是增加反馈网络变化的机制,又会使网络的路由机制变得复杂,从而导致能量的消耗。如何寻找路由算法的高效性和复杂度之间的折衷点,也是在无线传感器网络路由算法设计时的一个热点和难点。

在基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)中,将传感器节点划分为三种不同的网络角色用于平均网络传输导致的能量消耗。选用簇头来管理簇内节点和簇内节点之间工作的协调。网关用于和临近的簇之间通信,由于距离相对于簇内通信较大,所以也是一个能量消耗过大的工作。为了平均这种远距离通信导致的少数节点能量集中消耗,簇头使用时间触发的调度机制将网关的角色较平均的分配给簇内的每一个节点。在保证每一个节点都有机会成为网关节点承担远距离通信的同时,簇头的网关调度机制中也加入了防止剩余能量较低的节点被调度为网关执行远距离通信任务的机制。所有这些机制都是为了最大可能的将网络的能量消耗均衡在所有节点上。防止由于少数节点能量消耗及过大,提前失败从而导致网络性能恶化。

由于簇头使用的网关调度机制是由时间触发的,每两次调度之间的时间称为一个回合。回合的时间越短,簇内节点的能量消耗越平均,但是过于频繁的调度导致了整个路由算法的效率下降。合适的调度时间和路由效率之间的折衷点也是一个需要大量仿真实验来才能得到的近似指标。这个指标又是直接关系基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)

的性能的一个重要指标。

4.2 低耗能静态分簇路由算法 (LESCS)

这一节首先会介绍智能家庭网络对传感器网络的需求背景。然后介绍在基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)的基础上,得到的一个改进的路由算法——低耗能静态分簇路由算法(LESCS)。

4.2.1 智能家庭网络的特点

智能家庭网络是今后智能家电、现代化居家发展的一个重要的基础技术。而传感器网络又是智能家庭网络的一个核心组成部分。在对智能家庭网络做一个分析之后,发现如果满足以下条件就可以把无线传感器网络技术应用到智能家庭网络中。首先家庭网络对无线传感器节点的移动性要求不高,传感器节点可以不移动或者只需要很小的位置移动就可以满足家庭网络的应用需求。其次,所有传感器节点在家庭网络中的能量消耗必须严格控制。传感器节点在被安置后,可能几个月或数年都需要不间断的提供对目标体的检测。第三,家庭网络一般会将整个房屋的所有状态信息收集起来使用处理能力较大的终端进行综合处理。这一点和无线传感器网络的基站非常类似。第四,网络的可靠性和稳定性需要被高度保障。可能一个或者少数几个传感器节点的失败都会导致不能对房屋的状态信息作准确的监控,从而导致生命或者财产的损失。最后,笔者发现在智能家庭网络中,对于监控不同目标体可能会使用不同类型的传感器节点。不同类型的传感器节点又会产生不同速率数据流。例如来自温度传感器和来自视频传感器的数据流的速率是不一样的。

通过对智能家庭网络的分析,发现,智能家庭网络的特点基本满足在设计基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)时使用的假设,即基站可以掌握所有传感器节点的位置信息和所有节点在被安置之后几乎没有位置上的移动或者移动性很小。在本文前面讨论基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)时,无限传感器网络中所有节点产生的数据速率几乎是一样的。在本文对路由算法的性能作仿真时,需要引入的只是产生不同速率数据流的无线传感器网络节点。

4.2.2 低耗能静态分簇路由算法(LESCS)的运作机制

在将基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)引入智能家庭网络之后,本文在基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)的基础上对路由机制也作了一些改进,并命名改进后的路由机制为低耗能静态分簇路由算法(LESCS)。

和基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)一样,改进后的低耗能静态分簇路由算法(LESCS)的运行机制也分为三个过程。第一个过程也是集中式网络拓扑计算,如图4.1和图4.2所示。基站采用集中式计算得到整个网络的分簇信息和网络拓扑信息,将网络按地域平均分簇,并且选择距离每个簇中心最近的节点作为簇头用来在后续过程中

管理簇内其他节点。然后基站会发送广播至网络，通知所有传感器节点有关簇的划分信息和簇头信息。这一个过程基于资源调度的静态路由算法（SCIRS）和低耗能静态分簇路由算法（LESCS）是完全一样的。

低耗能静态分簇路由算法（LESCS）的第二个过程也是网络拓扑形成。在基站将计算得到网络的分簇信息广播向整个网络后，网络中每个无线传感器节点都会选择簇中心距自己距离最近的簇加入。其加入过程也是将自己的位置信息、能量信息和请求加入的状态信息封装在一起，向簇头发送请求加入的数据包。簇头接受到请求加入的数据包后，记录来自节点的位置信息和能量信息。基站会给要求加入的节点都分配一个序列号，其目的也是用于后面的网关角色的调度并且可以有效的防止生存能力过低的节点被调度承担网关的远距离通信任务。在回复节点的请求加入信息中，基站会将每个节点的序列号和第一回合使用的网关节点在信息包中告知簇内的所有成员节点。和基于资源调度的静态路由算法（SCIRS）有区别的是，在低耗能静态分簇路由算法（LESCS）中的网关节点和路由路径上的下一跳的簇的网关通信，而不在只是将消息发送到下一跳簇的网关节点，如图 4.7 所示。这样每一个回合，簇之间的通信都会由每个簇的网关来执行。

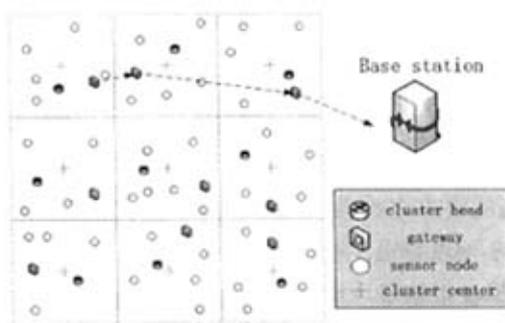


图 4.7 低耗能静态分簇路由的网络拓扑
Fig. 4.7 Network topology of LESCS

簇之间的通信有网关节点来承担，可以进一步减小簇头承担的任务，从而达到延长簇头生存时间的目的。由于路由算法每过一段时间都会在不同的簇内调度不同的节点担当网关，将簇间通信完全由网关节点承担，网络拓扑会经常变化，这样会导致减弱网络的稳定性。

低耗能静态分簇路由算法（LESCS）在完成集中式网络拓扑计算和网络拓扑形成后，第三阶段就是在网络信息传输时的簇内网关节点的调度。如图 4.7 所示，网关节点接受来自簇内传感器节点的信息，做信息融合，然后将信息传送给临近的簇的网关节点。重复这个过程就可以将信息传送到安置在被检测目标区域附近的基站上。前面讲到基站具有足够处理能力，可以使用一定的规则，从给定的网络中计算出来一条满足需求的最佳路由。从上述过程可以看出，基站计算出来的路由信息只需制定簇之间在路由路径上的

关系就可以了。而由于网关负责簇之间的通信，每过一定时间簇之间通信的节点都会变化，所以可以把网关之间通信看作一条近似最佳路由中的一个环节。

低耗能静态分簇路由算法（LESCS）中，每过一个时间段，每个簇内的簇头都会在节点间将网关做一个调度。两次网关调度之间的时间称为一个回合。一次调度之后，相邻两个簇内和簇之间的网络拓扑也发生变化，如图 4.8 和图 4.9 所示。

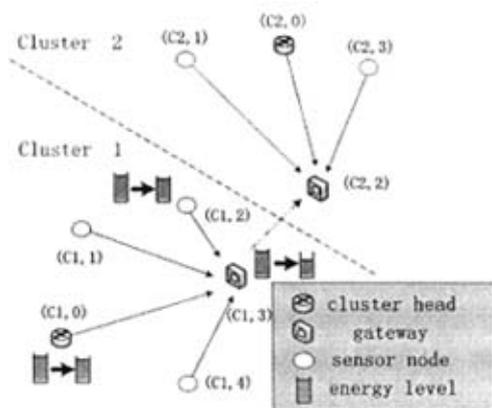


图 4.8 相邻簇之间的信息传输
Fig. 4.8 Data Transmission between adjacent clusters

在图 4.8 中，簇 1 中节点 (C1, 0) 为簇头，指定节点 (C1, 3) 为簇 1 的网关。在簇 1 内所有节点包括簇头 (C1, 0) 在内都将收集到的数据发送给簇 1 的网关节点 (C1, 3)。网关节点 (C1, 3) 将从簇 1 内收集到的数据信息融合起来，然后发送给簇 2 的网关节点 (C2, 2)。从图 4.8 可以看出，在簇 2 内网关节点 (C2, 2) 仍然是将簇 2 内的所有来自其他节点的信息都收集起来，然后发送到路由路径上的下一跳的簇内。

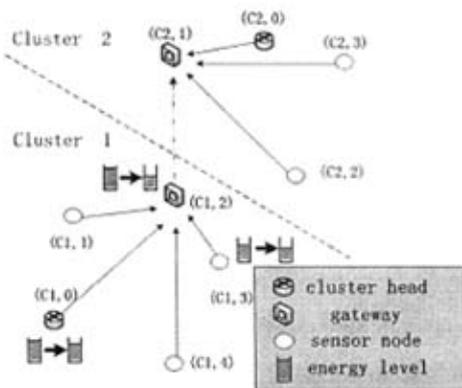


图 4.9 网关调度之后的相邻簇之间的信息传输
Fig. 4.9 Data transmission of two adjacent clusters after scheduling

图 4.9 是图 4.8 中的两个簇在经过一次网关调度之后的网络拓扑结构。簇 1 内的网关节点由图 4.8 中的 (C1, 3) 变为节点 (C1, 2)。而簇 2 内的网关节点也由节点 (C2, 2) 变为节点 (C2, 1)。所以在图 4.9 中, 簇 1 到簇 2 的通信链路变为了节点 (C1, 2) 和节点 (C2, 1) 之间的通信。在低耗能静态分簇路由算法 (LESCS) 中, 簇之间的信息交换由簇内的网关节点和网关节点之间的通信来完成。这样的机制是为了让节点的能量消耗更均衡。

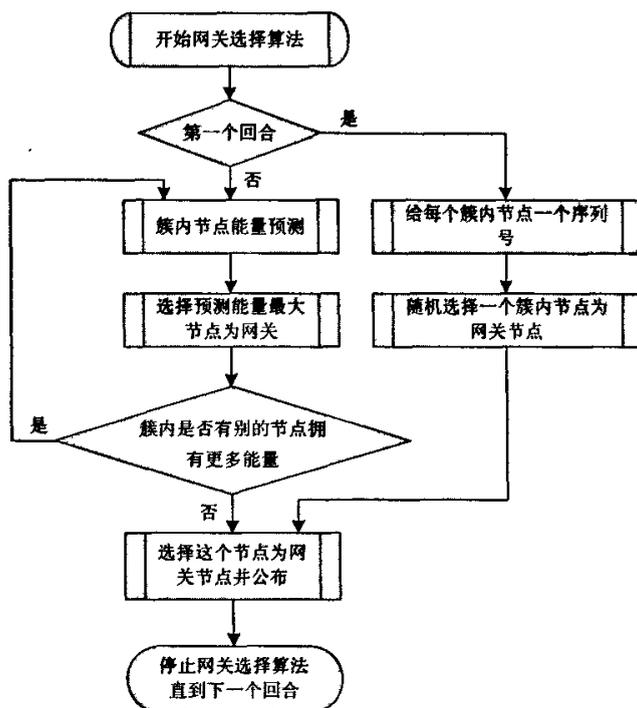


图 4.10 LECS 的网关选择算法
Fig. 4.10 LECS's gateway selection scheme

图 4.10 描述了簇头调度普通无线传感器节点为网关的机制。由于簇头维持一个簇内各个节点可用能量值的记录, 所以网络每运行一段时间都会触发一次簇头的调度机制。簇头在调度普通节点为网关时, 簇头根据簇内节点执行的网络传输任务, 然后对所有节点在这一时刻的剩余能量作一次预测。然后选择预测能量最高的节点作为网关, 并将这个预测结果广播至整个网络。如果簇内有节点的剩余能量值大于这个预测网关的能量, 则会与簇头通行协调, 更新自己在簇头上的能量值记录。然后, 簇头会再次选择能量值最大的一个节点作为网关。如果簇头做的预测是正确的, 即预测的剩余能量最多的节点确实是簇内剩余能量最多的节点, 簇头在广播自己的预测之后是不会有节点反馈预测错误的。这时就不需要再次预测能量值和选择网关节点。这样的机制, 保证了簇内包

括网关节点在内的所有节点都有成为网关的机会。而且每次选择剩余能量最多的节点作为簇内的网关，会保证网络内所有节点的能量消耗更为均衡。但是簇之间使用网关来通信和簇头执行的能量预测机制也一定程度上增加了路由算法的复杂度^[26, 27]。

在下一章节，会给出网络中存在不同速率节点的情况下，低耗能静态分簇路由算法（LESCS）性能的仿真评估。

5 基于资源调度的静态路由算法的仿真及分析

这一章节，会讨论低耗能静态分簇路由算法（LESCS）的仿真，包括仿真中必要的一些模型的建立和仿真的场景介绍。前面的章节已经讨论了基于资源调度的静态路由算法（SCIRS）和低耗能静态分簇路由算法（LESCS）的设计都是旨在将网络的耗能均衡的分配给网络中所有的节点。也会用这一设计的出发点来讨论仿真得到的结果并给出客观的仿真结果分析。

5.1 仿真原理

在第二章基于计算机软件的网络仿真中，已经讨论了仿真中使用的各种模型的建立和基于计算机软件的网络仿真原理。一个完整的网络仿真，需要有网络建模和网络的通信建模。网络建模中又包括了节点建模、网络场景建模等一些仿真模型。而网络中的节点建模，需要有节点通信机制或者说节点通信协议栈的完整建模。而在无线传感器网络中，由于节点的能量是非常有限的宝贵资源。所以如何节约通信或者说网络运行中的能量是衡量算法性能的重要指标。而能量的消耗又和无线传感器网络的生存时间之间相关。

对于低耗能静态分簇路由算法（LESCS）这样一个网络层的路由算法来说，为了避免链路层和物理层等机制的影响而导致评价性能的公正性，直接为网络层通信和能量消耗建立数学模型，从而通过能量消耗来得到节点的生存时间，然后使用网络中节点的生存时间来衡量路由算法的性能。

在路由算法中已经使用了回合的概念，仿真中这个概念再次被使用。每个回合，网络中有多少节点可以正常工作和节点之间的耗能是否均匀是本文衡量路由算法性能的重要指标。使用基于 C++ 和 Matlab 开发的仿真平台来衡量低耗能静态分簇路由算法（LESCS）的性能。

5.2 仿真场景的建立

而在仿真的网络场景中本文也引入了三种不同消息发送速率的无线传感器节点来模拟智能家庭网络中不同的传感器节点。然后随机产生 100 个无线传感器网络节点，其中包括每回合产生 1000bit 数据的节点 50 个，每回合产生 2000bit 数据的节点 30 个和每回合产生 3000bit 数据的节点 20 个，如图 5.1 所示。然后将这些节点安置在不同大小的目标检测区域内，并且给节点配置不同的初始能量来运行仿真程序，得到仿真结果。为了比较路由算法的特性，本文将仿真结果和 3.2 节中介绍过的 LEACH 和直接散布（Direct Diffusion）两个路由算法的仿真结果作比较^[26]。

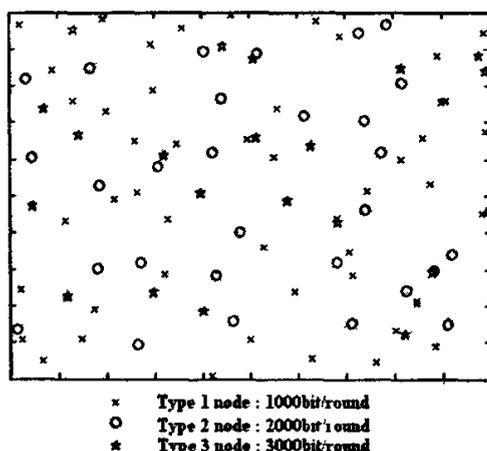


图 5.1 随机散布的 100 个节点的网络
 Fig. 5.1 Randomly deployed WSN with 100 nodes

5.3 能量模型的建立

为了公正客观的分析能量的消耗模型, 必须建立适当的能量消耗模型用来刻画无线传感器节点的无线收发机特性。无线收发机的能量消耗特性包括接收和发送信息时两个状态的能量消耗特点。本文假设无线收发机包括无线收发模块和发送消息时使用的发送功率放大模块。当无线传感器接收消息时, 只有收发模块在工作。而发送消息是, 经过收发模块发送的消息需要发送功率放大模块对信号进行放大, 然后发送出去。所以每接收一比特的数据, 无线收发机需要消耗 $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$ 的能量。而在发送消息时, 每发送一比特的数据, 无线收发机需要消耗 $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$ 的能量, 发送功率放大模块也需要消耗的单位能量是 $\epsilon_{amp} = 100 \text{ pJ/bit/m}^2$ 。所以当无线收发机在距离 d 米的范围内发送 K 比特的数据时, 消耗的能量 E_t 可以表示为如公式 (5.1) 所示。

$$E_T = E_{elec} \times K + \epsilon_{amp} \times K \times d^2 \quad (5.1)$$

当无线收发机接收 K 比特的数据时, 消耗的能量 E_r 可以表示为如公式 (5.2)。

$$E_R = E_{elec} \times K \quad (5.2)$$

不同消息发送速率的节点在每个回合中消耗的能量也不同。每回合发送 1000bit、2000bit 和 3000bit 数据的节点一个回合总共消耗的能量分别为 E_1 、 E_2 和 E_3 , 则可以用公式 (5.3), (5.4) 和 (5.5) 表示。公式中 d 表示节点到网关之间的距离。

$$E_1 = 50\mu\text{J} + 100\text{nJ} \times d^2 \quad (5.3)$$

$$E_2 = 100\mu\text{J} + 200\text{nJ} \times d^2 \quad (5.4)$$

$$E_3 = 150\mu J + 300nJ \times d^2 \quad (5.5)$$

簇内被调度为网关的节点在一个回合中消耗的能量为 $E_{gateway}$:

$$E_{gateway} = m_1 \times 50nJ + m_2 \times 100pJ \times D^2 \quad (5.6)$$

公式 (5.6) 中 m_1 表示簇内除了网关之外其它节点在一个回合中总共产生的数据。 m_2 表示网关接收到数据作数据融合之后需要发送至簇外的数据量。

网关接收簇内其他节点的数据并作数据融合, 然后将融合的数据发送到簇外, 融合后的数据一般总会大于簇内单个节点的数据量, 也说明网关的网络中耗能最大的角色。从上面的公式也可以看出来数据发送率高的节点在一个回合中耗能较大, 如果没有合适的调度规则, 则速率最大的节点一般情况下会由于能量耗尽而提前失败。所以本文选用的网关调度规则是使节点之间能量均衡消耗而不是每个节点成为网关的概率平均。也正是这种节点之间能量均衡消耗的调度规则才保证了低耗能静态分簇路由算法 (LESCS) 可以适应不同消息发送速率节点的混合无线传感器网络^[26-27]。

5.4 仿真结果和分析

在仿真中, 如前面陈述的那样本文在无线传感器网络中引入了三种不同消息产生速率类型的无线传感器节点。节点被随机的安置在目标检测目标区域内。仿真分别在不同大小的目标检测区域内进行。然后使用从不同仿真场景中, 直接散布 (Direct Diffusion)、LEACH 和低耗能静态分簇路由算法 (LESCS) 仿真结果作性能比较。在仿真中, 100 个节点的网络在使用 LEACH 时分为五个簇^[23, 26-27]。而使用低耗能静态分簇路由算法 (LESCS) 时分为九个簇。

第一个仿真场景是将 100 个节点的无线传感器网络随机的安置在 $10 \times 10m^2$ 的区域内。分配给无线传感器节点不同的初始能量, 然后分别使用直接散布 (Direct Diffusion)、LEACH 和低耗能静态分簇路由算法 (LESCS) 作仿真, 得到表 5.1 统计数

表 5.1 不同路由算法的仿真统计结果 (100 个节点随机分布于 $10 \times 10m^2$ 的区域)

Tab. 5.1 Simulation statistics of different schemes (100 nodes randomly deployed in $10 \times 10m^2$)

初始能量 (J/node)	路由算法	网络中第一个节点 失败的回合 (R_f)	网络中最后一个节 点失败的回合 (R_l)	R_l/R_f
0.05	Direct Diffusion	62	104	1.68
	LEACH	171	590	3.45
	LESCS	254	388	1.53
0.1	Direct Diffusion	130	207	1.59
	LEACH	338	1033	3.10
	LESCS	522	717	1.40
0.2	Direct Diffusion	262	409	1.56
	LEACH	719	2234	3.11
	LESCS	1011	1535	1.52

据。

当传感器节点的初始能量为 0.2 焦耳时,从表 5.1 可以看出,使用直接散布(Direct Diffusion)的路由算法,第一个节点失败出现在 262 回合,而当网络运行 409 回合时网络中所有节点都由于能量耗尽而失败。当传感器节点的初始能量为 0.2 焦耳时,使用 LEACH 作为路由算法时,第一个节点失败出现在第 719 回合,最后一个节点出现在 2234 回合。当传感器节点的初始能量为 0.2 焦耳时,使用 LESCS 作为路由算法时,第一个节点失败出现在第 1011 回合,最后一个节点出现在 1535 回合。

由此可以看出,直接散布(Direct Diffusion)算法的能量消耗最快,从而导致了网络中出现失败节点的回合较其他两个协议更早,网络出现不稳定因素的时间较其他两个路由算法较快,能连续稳定工作的时间较短。使用 LEACH 作为路由算法时,网络中最后一个节点失败的时间最晚,由此可以得出 LEACH 可以使网络的工作时间最长。但是使用 LEACH 作为路由时,第一个节点失败的时间较早,从而可能导致网络处于一个不稳定的工作状态,网络的性能不能得到保证。路由算法使用 LESCS 时,网络最后一个节点失败的时间较使用 LEACH 时有提前,但是网络第一个节点失败的时间较使用 LEACH 时较晚。由此可以保证网络的工作状态在较长时间内处于一个较良好的阶段,从而保证网络的信息传输性能。

在表 5.1 中使用网络中节点最后一个失败时的回合数 R_1 和网络中第一个节点出现失败时的回合数 R_f 的商作为一个衡量路由算法在节点能量均衡消耗方面的参数。 R_1/R_f 的值越接近于 1 说明路由算法在节点均衡耗能方面的性能越好。表 5.1 的数据可以看出在 LESCS 在节点均衡耗能方面是优于其他两个路由算法。直接散布(Direct Diffusion)算法虽然在节点均衡耗能方面的性能参数优于 LEACH,但是由于使用直接散布(Direct Diffusion)算法的网络生存时间短,所以直接散布(Direct Diffusion)并不是一个效率高于 LEACH 的路由算法。

图 5.2 描述了三种不同的路由算法在工作时,网络中活动的节点随时间的变化的曲线。使用直接散布(Direct Diffusion)算法的网络中,全部节点能量大约在 200 回合左右就会耗尽,从而导致网络不能正常工作。图 5.2 中可以看出,当路由算法使用 LEACH 时,整个网络可以生存大约 1000 回合左右。但是第一个节点失败出现在不到第 400 个回合(从表 5.1 可知第一个节点出现在第 338 回合)。说明路由算法使用 LEACH 时,网络中全部节点正常工作的完全稳定状态较短。而从曲线的倾斜度也可以看出,使用 LEACH 作路由算法的网络中大部分时间处在网络中存在部分节点失败的状态下(约 700 个回合)。

无线传感器网络在实际应用时,网络中生存的节点数量是一个被应用环境苛刻要求的参数。例如,有的应用环境可能要求被安置的用来检测目标的网络中有 50% 的节点失败时,则由于无线传感器网络提供的服务不能满足应用的要求,可以认为网络已经失败。

在 50% 时，使用 LSCS 作为路由算法的网络提供的服务质量高于使用 LEACH 作为路由算法的网络提供的服务质量。因为使用 LSCS 作为路由算法的网络在节点达到 50% 的失败率之前，网络中活动的节点数量要大于使用 LEACH 的网络。当应用对网络的节点活动率要求较低（低于 50%）而对网络的生存时间要求近最大可能的延长时，从图 5.2 可以看出 LEACH 是一个不错的选择。

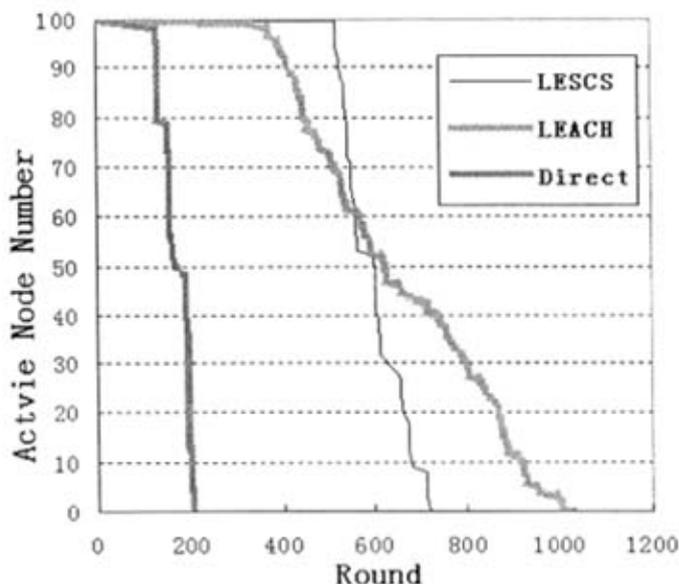


图 5.2 网络中活动节点和时间的统计数据

(100 个节点随机分布于 $10 \times 10 \text{m}^2$ 的区域，节点初始能量 0.1 焦耳)

Fig 5.2 The Amount of active nodes vs. time

(100 nodes randomly deployed in $10 \times 10 \text{m}^2$ with initial energy is 0.1J)

表 5.2 是将 100 个节点的无线传感器网络随机的安置在 $30 \times 30 \text{m}^2$ 的区域内，并分配给无线传感器节点不同的初始能量，然后分别使用直接散布 (Direct Diffusion)、LEACH 和低耗能静态分簇路由算法 (LSCS) 作仿真，得到的统计数据。从表中 R_1/R_2 的数值可以得到的结果仍是 LSCS 在网络中节点均衡耗能方面的指标优于 LEACH。

图 5.3 是在 $30 \times 30 \text{m}^2$ 的区域内安置 100 个初始能量为 0.2 焦耳的无线传感器节点的网络在使用不同路由算法时的仿真结果。从图可以看出网络中第一个失败节点的出现，仍然是使用 LSCS 的网络要晚于使用 LEACH 的网络。直接散布 (Direct Diffusion) 仍然是消耗能量过快从而导致网络中所有节点过早失败。

表 5.2 不同路由算法的仿真统计结果 (100 个节点随机分布于 $30 \times 30m^2$ 的区域)

Tab. 5.2 Simulation statistics of different schemes
(100 nodes randomly deployed in $30 \times 30m^2$)

初始能量 (J/node)	路由算法	网络中第一个节点 失败的回合 (R_f)	网络中最后一个节 点失败的回合 (R_l)	R_l/R_f
0.1	Direct Diffusion	111	174	1.57
	LEACH	247	818	3.31
	LESCS	427	622	1.46
0.2	Direct Diffusion	226	346	1.53
	LEACH	498	1493	3.00
	LESCS	809	1220	1.51
0.4	Direct Diffusion	454	685	1.51
	LEACH	1083	2960	2.73
	LESCS	1715	2439	1.42

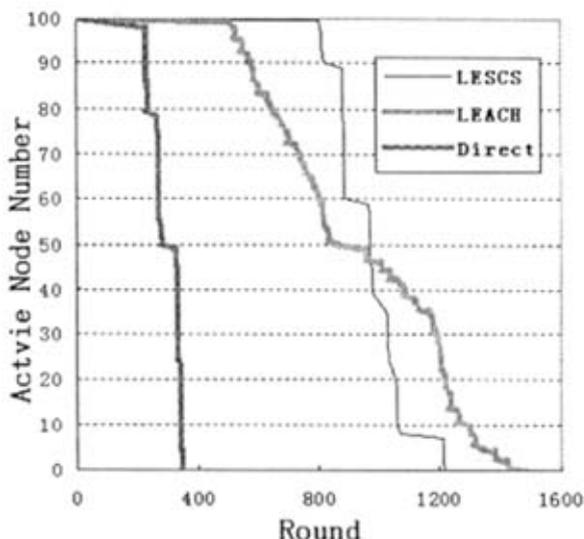


图 5.3 网络中活动节点和时间的统计数据
(100 个节点随机分布于 $30 \times 30m^2$ 的区域, 节点初始能量 0.2 焦耳)
Fig 5.3 The amount of active nodes vs. time
(100 nodes randomly deployed in $30 \times 30m^2$ with initial energy is 0.2J)

从图 5.3 也可以看出来, 使用 LESCS 的网络中首个节点的失败出现在 809 回合, 而使用 LEACH 的网络首个节点的失败出现在 498 回合左右。所以可以看出来在维持网络中所有节点都活动从而保证网络高性能运作方面, LESCS 仍然是非常有效的。LEACH 的活动节点随时间的曲线下落仍然是比较延缓。而 LESCS 陡峭的活动节点随时间的曲线正说明了 LESCS 在节点的均衡耗能指标方面是一个非常有效的路由算法。图 5.3 中 LESCS 和

LEACH 的活动节点随时间变化的曲线的交点仍然是活动节点率约等于 50% 的时刻。

本文的最后一个仿真场景是在 $100 \times 100 \text{m}^2$ 的目标检测区域安置 100 个无线传感器节点。然后给传感器节点不同的初始能量，分别使用直接散布 (Direct Diffusion)、LEACH 和低耗能静态分簇路由算法 (LESCS) 作仿真，得到的统计数据如表 5.3 和图 5.4。

表 5.3 不同路由算法的仿真统计结果 (100 个节点随机分布于 $100 \times 100 \text{m}^2$ 的区域)
Tab. 5.3 Simulation statistics of different schemes
(100 nodes randomly deployed in $100 \times 100 \text{m}^2$)

初始能量 (J/node)	路由算法	网络中第一个节点 失败的回合 (R_f)	网络中最后一个节 点失败的回合 (R_l)	R_l/R_f
0.05	Direct Diffusion	146	240	1.64
	LEACH	292	1088	3.73
	LESCS	679	1088	1.48
0.1	Direct Diffusion	299	466	1.56
	LEACH	589	1996	3.39
	LESCS	1291	1966	1.52
0.2	Direct Diffusion	597	923	1.55
	LEACH	1191	3628	3.05
	LESCS	2644	3724	1.41

从表 5.3 的数据可以看出直接散布 (Direct Diffusion) 虽然比较好的将网络的能量消耗均衡于传感器节点之间，但由于网络的生存时间短，仍然不是一个有效的路由算法。传感器网络在 $100 \times 100 \text{m}^2$ 的目标检测区工作时，LESCS 的 R_l/R_f 指标仍然可以维持在一个较低的数值 (低于 1.52)，所以在三个路由算法中仍然是最有效的均衡节点之间能量消耗的路由算法。而在 $100 \times 100 \text{m}^2$ 的区域工作时，LESCS 不仅将网络中的首个节点失败的时间有效的延迟。从表中数据可以看出，LESCS 可以维持网络中所有节点都活动的时间约是 LEACH 的二倍左右。而 LEACH 和 LEACH 的网络中所有节点都失败的时间在不同的仿真中几乎相同。

图 5.4 是将传感器网络安置在 $100 \times 100 \text{m}^2$ 的区域内，节点初始能量为 1 焦耳时的网络中活动节点和时间的统计数据。和表 5.3 的数据反映的一致，LESCS 可以维持网络所有节点工作的状态时间约是使用 LEACH 时的二倍。直接散布 (Direct Diffusion) 仍然不能维持一个良好的网络服务质量和网络生存时间。图中 LEACH 的曲线较 LEACH 的曲线陡峭，说明 LEACH 在均衡网络中节点能量消耗方面仍然是最佳的。

图 5.4 和前两次仿真得到的图表反映的情况不同的是，在图 5.4 中几乎在网络的所有工作时间内，LESCS 维持的活动节点数目都是多于 LEACH。所以笔者可以猜想 LEACH 在节点密度较低的网络中的性能要比在高密度节点的网络中性能相对要好一些。

在不同的场景的仿真中，可以看出 LEACH 是一个可以有效使网络耗能均衡于所有节点之间、可以提高性能的网络服务质量的路由算法。而且从最后一个场景的仿真中也看

出，LESCS 在节点密度较低的情况下表现更为出色^[25-27]。

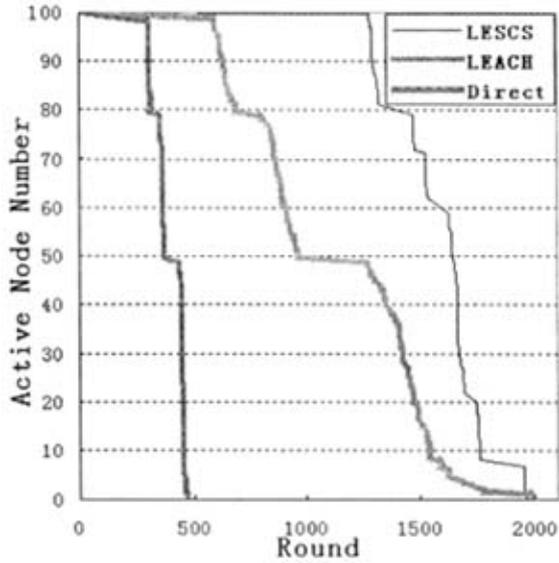


图 5.4 网络中活动节点和时间的统计数据
 (100 个节点随机分布于 $100 \times 100\text{m}^2$ 的区域, 节点初始能量 1 焦耳)
 Fig 5.4 The amount of active nodes vs. time
 (100 nodes randomly deployed in $100 \times 100\text{m}^2$ with initial energy is 1J)

结 论

无线传感器网络由于其无需基础设施、自组网、自管理等特点决定这种传感器网络可以应用于军事、环境、健康、家庭和其他商业领域。在空间探索和灾难拯救等特殊领域,传感器网络也有其得天独厚的技术优势。而这种新型的传感器网络又是融合通信技术、计算机网络技术、传感器技术和微机电(MEMS)技术等多种技术为一体的复杂网络。无线传感器网络中的路由技术则是关系到网络结构、服务质量和应用场景的一个关键技术。

如何利用无线传感器网络有限的资源而尽可能长的延长网络的生存时间,一直是被广泛关注的研究热点。而网络的生存时间又是和应用的需求密切相关的。在尽可能的延长网络的生存时间的同时,如何为应用提供更好的网络服务和数据服务也是一个不可忽视的问题。无线传感器为应用提供的良好的网络服务和数据服务是依靠网络中尽可能多的节点协同工作来保证的。传统的无线传感器网络中不同的节点由于数据采集、通信等任务的频繁度不同,从而导致节点的生存时间也不一样。数据采集、通信任务繁重的节点由于能量消耗过快而过早失败会导致网络拓扑变化、数据传输丢失和网络服务质量不稳定等问题。特别是处于网络中主干传输链路上的节点的失败更是有可能导致整个网络的服务质量不能满足应用的需求而导致网络的过早失败。

本文在分析无线传感器网络特点和前人研究成果的基础上,提出了基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)及其改进路由算法,并给出了算法性能的仿真分析。基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)是一个分簇的路由算法,在簇内通过调度节点来轮流承担远距离通信等耗能大的任务,从而致力于均衡节点之间能量消耗的一个路由算法。在对基于资源调度的静态路由算法(SCIRS)做了定性分析的基础上,本文给出了一个改进过的基于资源调度的静态路由算法,低耗能静态分簇路由算法(LESCS)。低耗能静态分簇路由算法(LESCS)的基本设计思想是使用网络中可用能量最多的节点承担能量消耗最大的任务。从直接散布(Direct Diffusion)、LEACH和低耗能静态分簇路由算法(LESCS)等三个路由算法仿真的结果中,可以看出低耗能静态分簇路由算法(LESCS)在延长网络生存时间和均衡网络中节点的能量消耗之间取得了一个良好的折衷。而在网络节点分布较稀疏的应用场景的仿真中,低耗能静态分簇路由算法(LESCS)更在网络生存时间和均衡网络中节点能量消耗等衡量指标上都要优于其他两个路由算法。由此可见,低耗能静态分簇路由算法(LESCS)是一个可以在有限资源的无线传感器网络中最大的延长无线传感器的生存时间并对应用提供高质量服务的路由算法。

无线传感器技术的发展日新月异。通过仿真验证的路由算法能否在实际的无线传感器节点平台上去的理想的效果,不仅取决于硬件层的无线电技术、链路层协议、应用层

协议等网络协议栈，也取决于路由算法工作的软件平台。如何设计的路由算法移植到基于实际的应用软件平台（如 TinyOS）上，是今后需要研究的一个方向。网络层的路由算法的设计和 network 协议栈其他层之间的合理高效的接口设计更是一个值得深究的课题。让路由算法工作于实际应用平台的最佳参数还需要大量的仿真和来自实际测量的数据分析才可以得到。

由于作者水平有限，文中出现错误和疏漏之处在所难免。敬请阅读本文的各位老师和同学批评指正。

参 考 文 献

- [1] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam et al. A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8):102-114.
- [2] Jamal N. Al-Karaki, Ahmed E. Kamal. Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey. *IEEE Wireless Communications*, 2004, 11(6):6-28.
- [3] Capkun S., Hamdi M., Hubaux J.. GPS-free Positioning in Mobile Ad-Hoc Networks. *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences*, Hawaii, 2001.
- [4] 蒋丽影, 惠晓威, 章永来. OPNET 的网络仿真机制及仿真建模方法[J]. *中国新通信*, 2006, (15): 56-57.
- [5] 喻其财, 周晨, 邢建平. 网络仿真与应用软件的特性分析[J]. *电脑应用技术*, 2006, 1: 32-37.
- [6] 陈敏, 张金, 文韦岗. OPNET 无线信道建模[J]. *计算机工程与应用*, 2003, 39(25):62-65.
- [7] Marcos Augusto M. Vieira, Claudionor N. Coelho. Jr., Diogenes Cecilio da Silva Junior et al. Survey on Wireless Sensor Network Devices. *Proceedings of ETFA(2003)*, Hawaii, 2003, 1:537-544.
- [8] Bhaskar Krishnamachari, Deborah Estrin, Stephen Wicker. The Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks. *Proceedings of The 22nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops(ICDCSW' 02)*, Vienna, Austria, 2002.
- [9] Stephanie Lindsey, Cauligi Raghavendra. PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems. *IEEEAC*, 2002, 3:3-1125~3-1130.
- [10] Fernando Ordonez, Bhaskar Krishnamachari. Optimal Information Extraction in Energy-Limited Wireless Sensor Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(6):1121-1129.
- [11] Stephanie Lindsey, Cauligi Raghavendra, Krishna M. Sivalingam. Data Gathering Algorithms in Sensor Networks Using Energy Metrics. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2002, 13(9):924-935.
- [12] 石怀伟, 王华, 张念军等. OPNET 网络仿真技术及其应用分析[J]. *计算机工程与设计*, 2006, 27(17): 3309-3311.
- [13] 伍俊洪, 杨洋, 李惠杰等. 网络仿真方法和 OPNET 仿真技术[J]. *计算机工程*, 2004, 30(5): 106-108.
- [14] 陈敏. OPNET 网络仿真(第一版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [15] K. Sohrabi, Jay Gao, Vishal Ailawadhi et al. Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network. *IEEE Pers. Commun.*, 2000, 16-27.
- [16] Sylvia Ratnasamy, Brad Karp, Scott Shenker et al. Data-Centric Storage in Sensornets with GHT, a geographic hash table. *Mobile Networks and Applications*, 2003, 8(4):427-442.
- [17] Jamal N. Al-Karaki, Ahmed E. Kamal. On the Correlated Data Gathering Problem in Wireless Sensor Networks. *Computers and Communications*, 2004. *Proceedings. ISCC 2004. Ninth International Symposium*, 2004, 1:226-231.

- [18] Jamal N. al-Karaki, Raza Ul-Mustafa, Ahmed E. Kamal. Data Aggregation in Wireless Sensor Networks - Exact and Approximate Algorithms. High Performance Switching and Routing (HPSR) Workshop 2004, USA, 2004, 241-245.
- [19] Tri Pham, Eun Jik Kim, Melody Moh. On Data aggregation Quality and Energy Efficiency of Wireless Sensor Network Protocols-Extended Summary. Proceedings of the First International Conference on Broadband Networks (BROADNETS' 04), California, USA, 2004:730-732.
- [20] Sundeep Patterm, Bhaskar Krishnamachari, Ramesh Govindan. The Impact of Spatial Correlation on Routing with Compression in Wireless Sensor Networks(IPSN). Proceedings of the Third International Symposium Information processing in sensor networks, Berkeley, 2004.
- [21] Chalermek Intanagonwivat, Deborah Estrin, Ramesh Govindan et al. Impact of Network Density on Data Aggregation in Wireless Sensor Networks. Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems(ICDCS' 02), Vienna, Austria, 2002.
- [22] Chalermek Intanagonwivat, Ramesh Govindan, Deborah Estrin et al. Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking. IEEE/ACM Transactions on Networks, 2003, 11(1):2-16.
- [23] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, Hari Balakrishnan. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, USA, 2000.
- [24] Nissanka B.Priyantha, Anit Chakraborty, Hari Balakrishnan. The Cricket Location-Support System. Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Boston, 2000.
- [25] Fei HAO, Bo HUANG, Hui ZHU et al. An Efficient Data Dissemination Scheme for Wireless Sensor Networks. 2006 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing(NCSP 2006). Hawaii, USA, 2006.
- [26] Bo HUANG, Hui ZHU, Fei HAO et al. An Energy-Efficient Data Dissemination Scheme for Wireless Home Network. Journal of Signal Processing, 2006.
- [27] Bo HUANG, Hui ZHU, Fei HAO et al. Low-Energy Static Clustering Scheme for Wireless Sensor Network. The 2nd International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (IEEE Conference WiCOM 2006). Wuhan, China, 2006.

攻读硕士学位期间发表的论文情况

[1] Fei HAO, Bo HUANG, Hui ZHU, Yuji TANABE, Takaaki BABA. An Efficient Data Dissemination Scheme for Wireless Sensor Networks. 2006 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP 2006), Hawaii, USA, 2006. 学位论文第四章和第五章.

致 谢

在论文即将完成之际，我要对我的导师孙怡老师表示崇高的敬意和最衷心的感谢。孙老师在繁忙的工作之余，仍然对我的科学研究倾注了大量的心血，做了周到而细致的指导。不仅如此，孙老师还以她严谨治学的科研态度和丰富的研究经验教会了我一个科研人员应该具备的基本素质。

衷心的感谢王洪玉老师在课题研究前期给我在课题选题和相关专业知识积累方面的指点。正是在王老师的指点下，我才开始接触无线传感器网络、计算机网络仿真等相关领域知识，为后面的研究工作的进行打下了良好的基础。

最后我也要感谢黄博、朱辉、刘超、王新荣和李琼等教研室的学长和学弟们在我课题遇到困难时为我伸出援助之手。

再次对给予我各种资助、指导和协助完成这个课题，以及提供各种条件的单位及个人表示感谢。