

江苏省自然科学基金项目(No.BK20140202)

中央高校基本科研业务费专项资金项目(No.2014QNB22)

无线传感器网络

能量优化路由算法研究

江海峰○著

Wuxian Chuanganqi Wangluo

Nengliang Youhua Luyou Suanfa Yanjiu



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

江苏省自然科学基金项目(No. BK20140202)

中央高校基本科研业务费专项资金项目(No. 2014QNB22)

无线传感器网络能量优化 路由算法研究

江海峰 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书在分析无线传感器节点数据传输能耗的基础上,针对现有无线传感器网络能量优化路由中存在的问题,考虑节点能耗的有效性、均衡性,算法实现的复杂度,以及不同的网络结构 and 应用需求,分别基于能量代价、物理学场论、模糊逻辑以及非均匀分簇,设计了平面型和层次型的能量优化路由算法,并分析、验证了性能。本书力求科学化、实用化和前沿化,使读者能够在有限的时间内了解无线传感器网络能量优化路由原理及其应用。

本书可作为高等院校计算机科学专业和其他信息类专业研究生的参考书,也可以供相关领域的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络能量优化路由算法研究/江海峰著.

—徐州:中国矿业大学出版社,2015.11

ISBN 978-7-5646-2847-5

I. ①无… II. ①江… III. ①无线电通信—传感器—
计算机网络—路由选择—算法—研究 IV. ①TP212
②TN915.05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 228684 号

书 名 无线传感器网络能量优化路由算法研究

著 者 江海峰

责任编辑 王美柱

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 880×1230 1/32 印张 5 字数 139 千字

版次印次 2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷

定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

无线传感器节点一般由容量有限的电池供电,且通常会被部署在无人看护的户外或环境复杂的危险区域,因此能量受限是其突出特点。优化传感器节点的能量消耗,延长网络的生存时间,是无线传感器网络能够进入实际应用的关键环节。本书考虑节点能耗的有效性、均衡性,算法实现的复杂度,以及不同的网络结构 and 应用需求,分别基于能量代价、物理学场论、模糊逻辑以及非均匀分簇,设计了平面型和层次型的能量优化路由算法,并分析、验证了性能。

全书共 7 章,主要包括:

第 1 章:绪论,介绍了无线传感器网络能量优化路由研究的背景与意义,以及与本研究内容相关的无线传感器网络能耗和路由的研究现状。

第 2 章:设计了一种新的能量代价标准,提出了基于能量代价的路由算法思想,将该路由算法应用在井下长带状无线传感器网络中,并给出了算法的仿真结果与分析。

第 3 章:分析了无线传感器网络与物理学中场的相似性,介绍了无线传感器网络到虚拟场的抽象方法,提出了两种基于虚拟场的多 Sink 能量优化路由算法。

第 4 章:分析了节点能耗有效性和均衡性的评价标准,提

出了系统能量优化参数的计算方法和一种基于模糊逻辑的能量优化路由算法,并对算法性能进行了理论分析和仿真验证。

第5章:介绍了分簇路由算法的相关研究工作,分析了现有算法存在的问题,给出了最优簇头数量的计算方法,以及分簇路由的能量优化设计方法。

第6章:对本书所提出的路由算法进行了对比分析,比较了不同算法在多种网络性能上的优劣,指出了不同算法的适用范围。

第7章:总结与展望。

本书包含了笔者多年的研究成果,也借鉴和吸收了国内外专家学者的研究成果和公开出版的论文资料,在此谨向他们致以崇高的敬意。本书的顺利撰写得到了中国矿业大学计算机科学与技术学院、中国矿业大学出版社等各级领导和同事们的支持和帮助,在此表示感谢。

本书得到了江苏省自然科学基金项目(No. BK20140202)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(No. 2014QNB22)的支持。此外,本书还得到了中国矿业大学“第九批校级优秀青年骨干教师”和江苏省矿山机电装备重点实验室专项资金的资助。

由于无线传感器网络的不断发展,新的理论方法和技术不断涌现,再加上作者的学识水平所限,书中难免有错误和不足之处,敬请读者批评指正。

著者

2015年9月

目 录

1 绪论	1
1.1 选题背景与意义	1
1.2 无线传感器网络的能耗问题	6
1.3 典型的能量相关路由算法	12
1.4 本书的主要研究工作	22
2 基于能量代价的能量优化路由算法	25
2.1 引言	25
2.2 系统模型和定义	26
2.3 基于能量代价的路由算法	28
2.4 能量代价路由在井下长带状 WSN 中的应用	39
2.5 本章小结	50
3 基于虚拟场的能量优化路由算法	52
3.1 引言	52
3.2 系统模型和定义	54
3.3 无线传感器网络到虚拟场的抽象	55
3.4 基于虚拟势能场的能量优化路由算法	56
3.5 基于虚拟静电场的能量优化路由算法	66
3.6 算法分析与讨论	73

3.7	本章小结	73
4	基于模糊逻辑的能量优化路由算法	75
4.1	引言	75
4.2	系统模型和定义	77
4.3	能量有效性和均衡性	77
4.4	能量优化参数	81
4.5	模糊逻辑控制	85
4.6	算法实现	90
4.7	仿真结果与分析	91
4.8	本章小结	98
5	能量优化的分簇路由算法	99
5.1	引言	99
5.2	相关工作	100
5.3	系统模型和定义	103
5.4	问题分析	104
5.5	分簇路由算法	109
5.6	算法性能分析	115
5.7	仿真结果与分析	117
5.8	本章小结	123
6	算法比较与分析	124
6.1	平面路由算法的比较与分析	124
6.2	平面路由与层次路由的比较分析	130
6.3	本章小结	132

目 录

7 结论与展望	134
7.1 结论	134
7.2 展望	136
参考文献	137

1 绪 论

1.1 选题背景与意义

1.1.1 选题背景

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由大量低功耗、多功能,具备信息采集、处理和传输功能的传感器节点组成的智能专用网络系统,节点间采用自组织的无线通信方式相互传递信息,协同完成特定功能^[1-4]。近年来,随着传感器技术、微机电系统和无线通信技术的飞速发展,推动了连通人类与现实物理世界的无线传感器网络技术的产生和发展。无线传感器网络可以实时采集监测区域中感知对象的各种信息,如温度、湿度、光照、声音和视频等,并经过处理后传递给观察者,可应用于环境监测、军事探测、医疗保健、灾害救援等众多领域^[5]。

现代网络技术实现了计算机与计算机、人与计算机、人与人之间的对话与交互,已使世界变成“地球村”,但人与物的交流则相对困难。人们对物理世界的感知需要通过传感器来获取,无线传感器网络可从根本上改变人类和自然界的交互方式,把人类的交流领域从虚拟的网络世界延伸到具体的物理世界。无线传感器网络与因特网、移动通信网的高效融合,能够实现人与物、物与物的互联,从而形成“物联网”^[6]。随着“感知中国”、“智慧地球”等国家战略性课题的提出,无线传感器网络技术的发展对整个国家的社会与经济,甚至人

类未来的生活方式都将产生重大影响^[7]。据 Forrester 等权威机构预测,下一个万亿级的通信业务将是传感网产业。预计到 2020 年,物物互联业务与现有人人互联业务之比将达到 30 : 1^[8]。

无线传感器网络通常由一个或多个具有网关和协议转换功能的汇聚节点(Sink)和大量普通无线传感器节点组成。汇聚节点亦称为基站,除了负责收集网络数据外,还完成与外部网络的互联,以及一定的网络管理或协助路由功能。普通传感器节点主要完成环境信息的采集和简单处理,同时具备路由转发功能^[9]。传感器节点与汇聚点之间的通信,根据距离的远近可采用单跳或多跳传输的方式。多个传感器节点还可以组织成簇,并选出一个管理节点——簇头,簇头负责收集簇内成员节点的数据,并发送给汇聚点。汇聚点与因特网连接,将数据汇总到网络数据管理服务器。用户可通过网络访问物理世界的信息,实现人与物的互联。

对无线传感器网络的研究起源于美国军方的作战需求。1978 年,美国国防部高级研究计划局(DARPA)在卡耐基—梅隆(Carnegie-Mellon)大学成立了分布式传感器网络项目组。项目组根据军方对军用侦察系统的需求,研究无线传感器网络中的通信和计算问题^[10]。此后,DARPA 又联合美国国家自然科学基金委员会设立了多项有关无线传感器网络的研究项目。这些研究推动了以网络技术为核心的新军事革命,建立了以网络为中心的战术思想体系,由此拉开了世界范围内对无线传感器网络研究的序幕。20 世纪 90 年代中后期以后,世界各地的政府、大学、专业研究机构和企业都陆续开展了关于无线传感器网络的研究工作。例如,DARPA 的传感器信息技术(Sensor Information Technology, SensorIT)研究计划^[11],加州大学洛杉矶分校与罗克韦尔研究中心合作开展的 WINS 项目^[12],U. C. Berkeley 大学的智能微尘(Smart Dust)研究计划^[13],加拿大国家研究委员会的水/废水无线传感器网络计划^[14],由欧洲研究共同体发起的多国 9 所大学和研究机构参加的无线传感器网络实验床(Wireless Sensor Network Testbeds, WISEBED)研究计划^[15],澳大利亚

联邦科学与工业研究组织发起的传感器与传感器网络计划^[16]。这些研究项目极大地推动了无线传感器网络技术的发展,产生了大量的科学文献。

我国现代意义的无线传感器网络及其应用研究几乎与发达国家同步启动。1999年在中国科学院《知识创新工程试点领域方向研究》的信息与自动化领域研究报告中,无线传感器网络被列为该领域的五个重大项目之一。随着该工程试点工作的深入,2001年中国科学院依托上海微系统研究所成立微系统研究与发展中心,引领无线传感器网络的相关研究工作,并通过该中心在无线传感器网络的方向上陆续设置了多项重大研究项目,初步建立了无线传感器网络系统研究平台,在无线传感器网络通信技术、微型传感器、无线传感器节点和应用系统等方面取得了很大的进展。2004年9月,相关研究成果在北京进行了大规模外场演示,部分成果已在实际工程系统中使用。2006年,我国在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》中把智能感知技术、自组织网络与通信技术、宽带无线移动通信技术等列为重点发展的前沿技术。2008年上半年无锡市与中科院上海微系统研究所合作成立中科院无锡微纳传感网工程技术研发中心,大力推进无线传感器网络和物联网的产业化进程。目前,我国无线传感器网络标准体系已形成初步框架,向国际标准化组织提交的多项标准提案被采纳,传感网标准化工作已经取得积极进展。2009年9月11日,经国家标准化管理委员会批准,全国信息技术标准化技术委员会组建了无线传感器网络标准工作组。同时,国家973计划、国家自然科学基金、863计划、国家发改委CNGI示范工程和各地区性研究计划等都投入大量资金,设立专题性研究项目,从理论、技术和应用等方面的各个角度开展无线传感器网络的研究。

目前,无线传感器网络研究领域所关注的问题主要集中在包括物理层、数据链路层和网络层的网络通信技术^[17-18],包括拓扑控制、时间同步、节点定位、能量管理、网络安全等的支持技术^[19-20],中间

件技术和数据管理技术^[21-22]。虽然当前的研究成果已使无线传感器网络在某些领域步入实用阶段,但仍有许多问题没有得到很好的解决。特别是在应用要求不断提高的情况下,对无线传感器网络的研究工作还远远没有结束。

1.1.2 选题意义

无线传感器网络的特殊运行环境以及传感器节点本身的特点,使其与传统的无线网络以及移动自组织网络有很大区别。传统无线网络的主要目标是在移动环境下提供高服务质量和高效带宽利用,这些网络的路由协议的主要任务是构建从数据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,能量消耗往往不是设计的主要内容。

与之不同,无线传感器网络的首要设计目标是有限能量的高效均衡利用,这是由其自身的特点决定的^[23]。首先,无线传感器网络是一种能量受限的网络。由于体积和成本的限制,传感器节点通常采用容量有限的电池供电。此外,由于无线传感器网络中节点数量众多,或者由于网络部署在环境复杂的危险区域,更换节点电池或对电池进行充电较为困难。当某些节点因能量耗尽而失效时,会给无线传感器网络带来两方面的问题:失效节点感知区域内的信息可能无法再被采集;如果失效节点还承担着数据转发任务,节点的失效可能会导致其他节点采集的数据无法发送到汇聚点,造成网络的分割^[24]。再者,无线传感器网络是一种面向应用的网络,虽然不同的应用场景对网络性能的要求不同,但是尽可能地延长网络生存时间,从而保证目标任务的可靠执行是所有应用的共同需求^[25]。

节约并均衡传感器节点的能量消耗,延长关键节点和无线传感器网络的生存时间,是无线传感器网络能够进入实际应用的关键环节。因此,如何实现这一目标,一直是该领域研究人员关注的热点问题。

从延长无线传感器网络生存时间的角度看,从节点层、数据链路层到网络层,已经提出了许多高能效的设计方法。节点层主要基于对单个节点的低功耗硬件设计和任务调度来实现;数据链路层主要基于单个节点的运行状态,通过调度使其运行在低能耗状态实现节能。但这两个层次的节能研究主要是针对单个节点来提高能量效率,对网络整体能量效率考虑较少,缺少对网络整体能量优化的研究。网络层的能量优化设计主要是结合节点功率控制进行路由优化来实现。节点功率控制机制通过动态调整传感器节点的发射功率,在保证网络连通性的条件下,以最小能耗传输数据,从而达到节约节点能耗的目的。路由优化旨在从网络整体的能量效率出发,构建数据传输的一条或多条路径,节约并均衡传感器节点的能量消耗,延长网络生存时间。现有的网络层能量优化路由可分为三类:最小能耗路由、能量均衡路由以及网络生存时间最大化路由。总体看来,现有的路由算法主要存在以下几个问题:

(1) 最小能耗路由只考虑路由路径的能量有效性,构建的是从数据源节点到汇聚点的最小能耗路径,数据传输集中在能耗最小的路径上,易造成该路径上节点能量的快速消耗,负载重的节点较早能量耗尽而失效,缩短网络的生存时间。

(2) 能量均衡路由以节点的当前剩余能量作为路由选择标准,使剩余能量多的节点优先参与数据转发,均衡节点间的能量消耗。能量均衡路由易造成数据在多个高剩余能量节点间传递,数据传输的端到端能耗大,造成能量的浪费,同时数据传输的延时较长。

(3) 网络生存时间最大化路由综合考虑了节点能耗的有效性和均衡性,但目前多数此类路由算法都基于集中式方式实现,带来了很大的控制开销,且随着网络规模的增大,路由求解的复杂度增加,不适应无线传感器网络对路由协议分布式、简单化的设计要求。

(4) 现有的路由算法多针对单 Sink 的平面网络结构或基于分簇的层次网络结构设计,对于多 Sink 网络结构的能量优化路由的研

究与设计相对较少。

本书在分析无线传感器网络数据传输能耗的基础上,针对现有能量优化路由机制及算法中存在的问题,根据无线传感器网络的特点,考虑节点能耗的有效性、均衡性以及算法实现的复杂度,针对不同的网络结构和应用需求,设计了能量优化的路由算法。鉴于无线传感器网络在当前乃至未来巨大的实用价值和应用前景,加之优化节点能耗以延长网络生存时间是使无线传感器网络实用化的关键环节,研究无线传感器网络能量优化的路由算法具有十分重要的理论意义与应用价值。

1.2 无线传感器网络的能耗问题

1.2.1 无线传感器网络的能耗分析

在无线传感器网络中,节点消耗能量的模块主要包括传感器模块、数据处理器模块和无线通信模块。从无线传感器网络操作的角度来看,能量消耗的操作主要分为两类:通信相关的能量消耗和非通信相关的能量消耗。非通信相关的能量消耗主要集中在传感器模块采集数据和数据处理模块处理数据的能耗。通常情况下,传感器节点采集数据的信息量不大,数据处理简单,因此传感器模块和数据处理模块的功耗较低,节点的大部分能量消耗在无线通信模块实现节点间数据传输的操作上。与通信相关的能量消耗主要包括数据源节点的数据发送、中间节点的数据接收和转发以及目的节点的数据接收。其中,发送端负责发送本地数据包、控制包和其他节点发来的中转数据包,接收端负责接收数据包和控制包。

无线通信模块按照功率消耗由大到小的顺序有四种工作模式:发送模式(Transmit)、接收模式(Receive)、空闲模式(Idle)以及睡眠模式(Sleep)。在无线传感器网络中,当节点既不发送也不接收数据时,无线通信模块通常处于空闲模式,它要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,因其电路是活跃的,功耗仍然很高。相反,节点在睡眠模式下则关闭无线通信模块,功率消耗非常低,节点不能监听信道,此时即使有报文到达也不能立即开始接收。通常把工作于睡眠模式的节点称作处于睡眠状态,工作于其他三种模式的节点称作处于活跃状态。

典型的传感器节点能量消耗分布如图 1-1 所示^[26],传感器节点传输信息要比执行计算消耗更多的能量。执行 3 000 条指令所消耗的能量大约只能将 1 比特数据发送 100 m 远。通信模块和处理器部件的功耗比通常在 1 000 倍以上,而在 Rockwell 的 WINS 节点上,该比值甚至可达到 1 500~2 700 倍。因此,采用高效的通信协议是降低无线传感器网络整体能耗的关键。

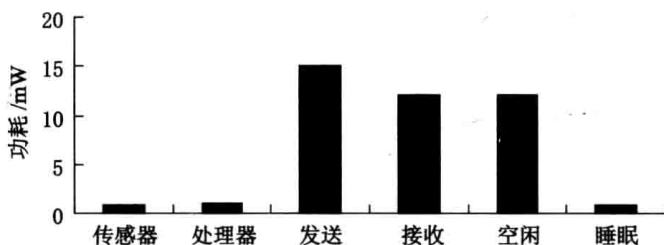


图 1-1 传感器节点的能耗分布

1.2.2 无线传感器网络的能量优化

现阶段无线传感器网络的能量优化研究根据其处于无线传感器网络中的不同层次,分为节点层节能、数据链路层节能以及网络层能量优化。

(1) 节点层节能

对节点层节能的研究可以分为两种,一种是使用低功耗的硬件设计技术^[27],另一种为使用节点系统级上的动态功率管理(DPM)^[28]。前一种方式为静态的实现方式,其适用范围是在传感器节点实现硬件设计的时候使用,比如改进 CMOS 系统或者 VLSI 电路设计。但是这种方式不能随着节点工作负荷的变化进行动态改

变,所以基于低功耗的硬件设计技术的节能能力有限。后一种实现方式可通过运行在节点上的操作系统根据当前节点的负荷情况对节点进行动态的功率管理,是一种更为有效的方法。

文献[28]研究了分级睡眠模式下不同睡眠状态间的切换问题,并提出了相关策略。从随机分布在固定区域内的传感器节点出发,并假设监测事件的发生服从一定的时间分布和空间分布。一旦处理完一个事件,则可根据时间计算下一事件的发生概率。根据概率从几个备选状态中选择最深度的睡眠状态。同时,该策略还考虑了事件遗漏的概率,因为传感器节点在睡眠模式下是无法接收数据的。在某些应用中,一定的事件遗漏概率是允许的。该文献制定了有关概率准则,据此判断是否切换到睡眠模式。

(2) 数据链路层节能

数据链路层的节能技术主要在 MAC 协议中实现。MAC 协议主要负责能量调度与节能控制,MAC 协议的优劣对网络性能的影响很大。根据信道的分配方式,现有的 MAC 协议可以大致划分为以下几类:固定配置类协议、基于竞争类协议以及采用其他方式的 MAC 协议。对于无线传感器网络的 MAC 协议来说,能量效率是设计时需要考虑的一个基本问题。其他的典型性能指标,如公平性、吞吐量以及延迟等,在无线传感器网络中所起的作用均不如能量因素。

MAC 协议中造成能量浪费的主要因素有:

- ① 碰撞会导致目的节点的数据接收和源节点的数据发送变得无效,数据需要重传;
- ② 节点在不收发数据时仍保持对信道的侦听;
- ③ 节点接收并处理不必要的数据;
- ④ 过多的协议开销;
- ⑤ 节点加入或离开时的配置能耗。

上述碰撞冲突后数据重传造成的能量浪费,可通过设计固定配置(TDMA 机制)或适当的冲突避免措施(CSMA)中的隐终端程序来避免碰撞的产生。对于特定的无线传感器网络应用,若能够保证

负载维持在较低的水平,也可以避免碰撞的产生。

文献[29]提出了 S-MAC 协议,协议采用周期性的侦听/睡眠工作方式,使节点尽可能处于睡眠状态,减少能耗;采用一致性协商睡眠调度机制将邻节点组织成虚拟簇以减少节点的空闲侦听;采用带内信令减少重传,同时避免监听不必要的消息;通过消息分割和消息传递技术有效减少控制开销和消息传递延迟。文献[30]在 S-MAC 的基础上提出了 T-MAC 协议,将时间分帧且帧长度固定,工作阶段长度可变,减少了空闲侦听的时间,延长了网络生存时间。

文献[31]提出了流量自适应的 MAC 协议 TRAMA,将时间划分为连续时隙,根据两跳内的邻节点信息,采用分布式选举机制确定每个时隙的无冲突发送者。文献[32]提出了一种基于 TDMA 的协议,不需要全局的时钟同步,结合了异步低能耗侦听机制,能量消耗很低。

目前,多数 MAC 协议只是针对导致能量浪费的某一个或几个因素进行改进,但同时也以增加其他方面的能耗或增加实现的复杂度为代价。综合各类协议的优点,以最小化网络能耗为目标进行优化,将是今后 MAC 协议的主要研究问题。

(3) 网络层能量优化

节点层节能方式主要是基于对硬件设计的优化和对单个节点任务的调度分配来实现的。数据链路层节能主要是考虑单个节点的运行状态,通过使节点运行在低能耗状态下来实现节能。但是对于无线传感器网络来说,节点层和数据链路层的节能还远远不够。单个节点节能并不意味着整个网络的能量消耗减少,而网络的总能耗最小也不等同于网络生存时间最大。无线传感器网络最终需要考虑的是节约并均衡整个网络的能量消耗,而节点层和数据链路层节能的方式都没有涉及整个网络,同时未考虑节点的能耗均衡。

网络层的主要任务是发现和维护路由,主要设计目标是建立能量优化的路径,形成可靠的数据转发机制,实现最长的网络生存时间。对于网络层而言,能量优化的路由协议可以分为三类:最小能耗