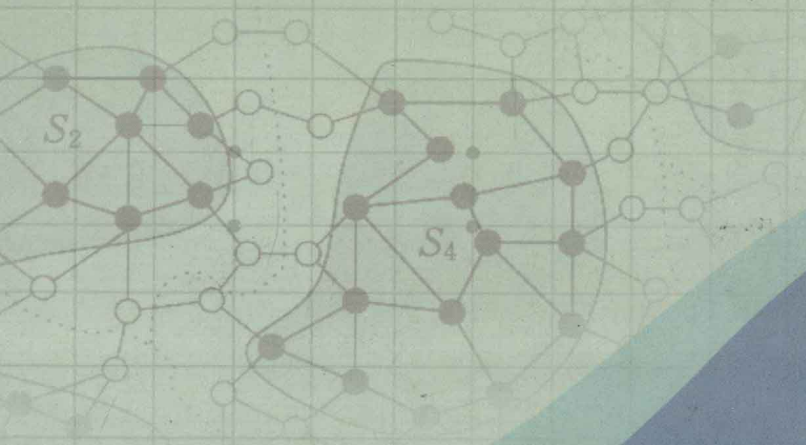


Wuxian Chuanganqi Wangluo Fencu Yu Xuni Gudan Jishu

无线传感器网络分簇与 虚拟骨干技术

● 孙彦景 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

内 容 简 介

本书系统地总结了无线传感器网络分簇与虚拟骨干形成算法的最新研究进展与成果,同时集成了作者多年来的研究成果,既可作为网络通信、传感器技术等专业的研究生教材,也可为广大对传感器网络技术感兴趣的工程技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络分簇与虚拟骨干技术/孙彦景著.

徐州:中国矿业大学出版社,2010.9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0752 - 4

I. ①无… II. ①孙… III. ①无线电通信—传感器

IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 172217 号

书 名 无线传感器网络分簇与虚拟骨干技术

著 者 孙彦景

责任编辑 章 毅

出版发行 中国矿业大学出版社

(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 83884990

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 850×1168 1/32 印张 7.125 字数 184 千字

版次印次 2010 年 9 月第 1 版 2010 年 9 月第 1 次印刷

定 价 26.80 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

无线传感器网络是一种大规模、无人值守、资源受限、无基础结构的多跳自组织网络。在传统的计算机网络中,层次型的基础结构是其可扩展性和有效性的关键。对无线传感器网络而言,缺少网络基础设施,需要构建虚拟基础结构以支持可扩展性。

分簇与虚拟骨干形成是构建层次型网络结构和支持可扩展性的有效方法,是贯穿于无线传感器网络众多研究问题的核心和基础问题,对覆盖、连通、拓扑和路由等问题的研究起着非常重要的作用。本书在系统、全面地学习和总结无线传感器网络分簇算法和虚拟骨干形成算法研究成果的基础上,从时延和能量约束、有界增长、网络动态变化和生存时间等四个方面,针对相关问题,就无线传感器网络分簇与虚拟骨干形成方法进行了研究。

全书共七章,内容组织如下:

第一章为绪论,介绍课题来源、无线传感器网络体系研究进展以及应用研究分类,在对 WSN 通信与组网相关问题进一步分析的基础上,介绍本文研究内容和全文结构。

第二章分析并总结了分簇和虚拟骨干形成研究现状,与本课程相关的研究工作,为分簇与虚拟骨干形成的进一步研究提供参考。

第三章提出时延和能量的联合约束连通支配集构建算法。基于 (α, β) -tree 定义了具有传输时延约束的连通支配树 CDTT 和强连通支配树 SDTT 问题,理论分析和仿真结果表明提出的算法能

正确地解决 CDTT 和 SDTT 问题,构造联合约束的连通支配集。

第四章基于更切合实际的有界增长图无线网络通信模型,提出虚拟骨干近似形成算法,构造的连通支配集具有常量扩展因子和常量度,对网络节点的分布密度有较好的适应能力,并且算法运行时节点仅需要直接邻域信息。

第五章提出具有自愈能力的动态自适应团簇虚拟骨干形成算法。在骨干形成的过程中对网络动态变化进行处理,使用自愈机制的有效可重配置的团簇虚拟骨干形成方法 DCBC,解决网络中典型的节点加入和退出事件,即网络动态性问题。

第六章基于传感器节点的剩余能量和簇头节点间的距离提出了一种新的算法 LEACH—ED,使得分簇更加均匀,能量消耗更均衡,从而有效延长了网络的生存时间。

第七章针对无线传感器网络中节点能量有限的特征,面向受限空间区域应用提出了基于权值的能量有效分簇路由协议 ECRPW,达到延长网络生存时间的目的。

本书相关内容受到国家自然科学基金项目(No. 50904070)、江苏省高新技术重大项目(No. BG2007012)和国家 863 发展计划项目(No. 2007AA06Z114)的资助。

作 者

2010 年 8 月

目 录

1 绪论	1
1.1 无线传感器网络的概念和特点	1
1.1.1 无线传感器网络的概念	1
1.1.2 无线传感器网络的特点	3
1.2 无线传感器网络体系研究进展	4
1.2.1 通信与组网	4
1.2.2 基础设施	6
1.2.3 中间件和数据管理技术	7
1.2.4 节点及其嵌入式软件系统	7
1.2.5 应用研究分类	8
1.3 通信与组网相关问题	11
1.3.1 拓扑控制	12
1.3.2 覆盖和连通	13
1.3.3 分簇和骨干形成	16
2 分簇与虚拟骨干形成研究进展	19
2.1 网络模型及概念	19
2.2 分簇算法研究进展	22
2.2.1 分簇算法技术要求	24
2.2.2 分簇算法属性分类	27

2.2.3	分簇算法分析比较	29
2.3	虚拟骨干形成方法	40
2.3.1	虚拟骨干形成算法分类	40
2.3.2	连通支配集算法分析	46
2.3.3	虚拟骨干形成算法分析	53
2.4	本章小结	58
3	联合约束的连通支配集算法	59
3.1	引言	59
3.2	CDTT 问题	60
3.3	CDT 算法	62
3.4	分布式 CDS 构建	64
3.4.1	分布式 MIS 构建	64
3.4.2	分布式 CDT 算法	65
3.4.3	理论分析	66
3.4.4	仿真实验	70
3.5	SDTT 问题	71
3.6	SCDT 算法	72
3.7	分布式 SCDS 构建	74
3.7.1	分布式 SCDT 算法	75
3.7.2	理论分析	76
3.7.3	仿真实验	81
3.8	本章小结	85
4	基于有界增长图的虚拟骨干形成算法	86
4.1	概述	86
4.2	模型及术语	88
4.2.1	网络建模	88

4.2.2	有界增长图	91
4.3	VBFA 算法	94
4.3.1	MIS 构造	95
4.3.2	最小支配集近似	97
4.3.3	标记过程和自剪枝 Rule k	97
4.4	理论分析	99
4.5	仿真实验	101
4.6	本章小结	104
5	动态自适应团簇虚拟骨干形成算法	105
5.1	概述	105
5.2	相关工作	108
5.3	MACA 算法	110
5.4	团簇算法	111
5.4.1	簇形成阶段	111
5.4.2	簇互连	125
5.4.3	骨干重组	128
5.5	仿真比较	148
5.5.1	骨干建立分析	149
5.5.2	节点退出分析	154
5.5.3	节点加入分析	157
5.6	本章小结	158
6	有界区域能量有效分簇算法	161
6.1	概述	161
6.2	LEACH 变体	163
6.2.1	LEACH 算法	163
6.2.2	LEACH 变体	165

6.3	LEACH-ED 算法	167
6.4	仿真实验	170
6.4.1	异构时的生存期	170
6.4.2	距离阈值约束	173
6.4.3	同构时的生存期	173
6.5	本章小结	176
7	基于权值的能量有效分簇路由协议	177
7.1	概述	177
7.2	能量模型	179
7.3	ECRPW 路由协议	180
7.3.1	簇头选取算法	180
7.3.2	路由树的生成	183
7.4	实验结果与分析	184
7.4.1	异构的情况下 LEACH 和 ECRPW 的比较	185
7.4.2	同构的情况下 LEACH 和 ECRPW 的比较	186
7.4.3	LEACH、LEACH-C 和 ECRPW 的比较	190
7.5	本章小结	191
	参考文献	193

1 绪 论

随着无线通信、集成电路、传感器和微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) 等技术的迅速发展, 无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSN)^[1,2] 引起了全世界范围的广泛关注^[3,4], 其应用已经由军事国防领域扩展到环境监测、交通管理、生物医疗、抢险救灾以及商业等诸多领域, 具有广阔的应用前景^[5,6]。它已经成为 21 世纪一个新的研究领域, 在基础理论和工程技术两个层面提出了大量的挑战性问题。无线传感器网络与传统固定网络有很大的不同: 在传统的计算机网络中, 层次型的基础结构是其可扩展性和有效性的关键; 对无线传感器网络而言, 缺少网络基础设施, 需要构建虚拟基础结构以支持可扩展性。

1.1 无线传感器网络的概念和特点

1.1.1 无线传感器网络的概念

无线传感器网络的思想起源于 20 世纪 70 年代。1978 年, 美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 开始进行无线传感器网络的研究。1988 年, Mark Weiser 提出了普适计算 (Ubiquitous Computing, UC) 思想, 即把计算机嵌入到环境或日常工作中去, 作为 21 世纪的计算模式。无线传感器网络将逻辑上的信息世界与物

理世界融合在一起,改变了人与自然的交互方式^[7],是普适计算理念的实践和延伸。

无线传感器网络涉及传感器技术、网络通信技术、无线传输技术、嵌入式技术、分布式信息处理技术、微电子制造技术等,是多学科高度交叉、新兴的热门研究领域。它是继因特网之后,将对 21 世纪人类生活方式产生重大影响的 IT 热点技术。因特网改变了人与人之间交流、沟通的方式;无线传感器网络将改变人与自然交互的方式,极大地扩展了网络功能和人类认识世界的能力。无线传感器网络是由部署在监测区域内大量的微型传感器节点,通过无线通信的方式形成一个多跳的自组织(Ad Hoc 或 Self-organization)的网络系统,协作感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息,并通过汇聚点或网关(Sink or Gateway)发送给观察者。无线传感器网络能够获取最直接、最有效和最真实的客观物理信息,具有十分广阔的应用前景。

目前许多政府部门和国内外科研机构投入巨资设立启动了很多关于无线传感器网络的研究计划^[8]。比较重要的有 BWRC 的 PicoRadio, UCLA 的 WINS、Smart Dust、 μ AMPS、SCADDS, 欧洲 Eyes、DARPA 的 SensIT 等^[9, 10]。在节点研制方面包括 UCLA 的 WINS 节点, MIT 的 CAMPS 节点, UC Berkeley 的 Smart Dust 节点和 UC Berkeley 的 Motes 节点等。在 Test Bed 研究上,有欧洲 Eyes (EU、TU Berlin)、TMote Sky (MoteIV)、MicaZ (Crossbow)和 iMote (Intel)平台,以及中科院计算所的 EAS- ISET 和 GAINS 等。Motes 平台及其配套的 TinyOS 操作系统应用最为广泛,为全球 400 多家研究机构所采用。

无线传感器网络作为当今信息领域新的研究热点,涉及多学科交叉,包括通信与组网、网络管理、分布式信息处理等多个方面^[11, 12]。

1.1.2 无线传感器网络的特点

与传统网络相比,无线传感器网络具有以下显著特点^[13~17]:

无中心和自组织性:无线传感器网络中没有绝对的控制中心,所有节点的地位平等,网络中的节点通过分布式算法来协调彼此的行为,无须人工干预和任何其他预置的网络设施,可以在任何时刻任何地方快速展开并自动组网。由于网络的分布式特征、节点的冗余性和不存在单点故障瓶颈,使得网络的鲁棒性和抗毁性很好。

动态变化的网络拓扑结构:网络的拓扑结构是指从网络层角度来看的物理网络的逻辑视图。网络中的节点可能因电池能量耗尽或其他故障而退出网络运行,也可能因任务需要移动节点或添加新的节点到网络中,这些都会带来网络拓扑结构的变化。在无线传感器网络中,移动节点可能以任意速度和任意方式在网络移动,并可以随时关闭;无线收发装置的天线类型多种多样,发送功率随着携带能量的变化而变化;加之无线信道之间的互相干扰、地形和天气等综合因素的影响,节点间通过无线信道形成的网络拓扑随时可能发生变化。

受限的无线传输带宽:无线传感器网络采用无线传输技术作为底层通信手段,由于无线信道本身的物理特性,它所能提供的网络带宽相对有线信道要低得多。此外,考虑到竞争共享无线信道产生的冲突、信号衰减、噪声和信道之间干扰等多种因素,节点得到的实际带宽远远小于理论上的最大带宽。

资源受限:节点由于受成本、体积及功耗的限制,其计算能力、程序空间和内存空间比普通的计算机功能要弱小很多,不利于展开功能较复杂的业务。节点由电池供电,在使用过程中经常是一次性的,不能更换电池和随意充电。

大规模使用:为实现区域监测任务,往往有成千上万的传感器

节点密集部署在目标区域,利用节点之间的高度连通性来保证系统的容错性和抗毁性。

多跳通信:无线网络中节点通信距离有限,节点只能与其邻居直接通信。若希望与其射频覆盖范围之外的节点进行通信,则需要通过中间节点进行路由转发。

应用相关性:不同的传感器网络应用所关注的物理量不尽相同,针对每个具体应用的特点来研究传感器网络技术,这是传感器网络设计不同于传统网络设计的显著特征。

以数据为中心:传感器网络是任务型的网络,其核心是感知环境数据。

无线传感器网络不同于传统数据网络的特点对无线传感器网络的研究提出了新的挑战。

1.2 无线传感器网络体系研究进展

国内外无线传感器网络的研究日趋热烈,取得了大量研究成果。下面从无线传感器网络的通信与组网技术、基础设施技术、中间件与数据管理技术、节点及其嵌入式软件技术等方面综述无线传感器网络体系的研究进展,讨论目前存在的问题和有待进一步研究的方向^[11]。无线传感器网络的网络体系划分如图 1-1 所示。

1.2.1 通信与组网

物理层的研究主要集中在传输介质选择、传输频段选择、无线电收发器的设计、调制方式等方面,核心问题是能量有效性或节省能量。无线传感器网络的物理层研究比较薄弱,还有很多问题有待解决,如简单低能耗无线传感器网络的超带宽和通带宽调制机制设计问题、微小低能耗低费用无线电收发器的硬件设计问题。

数据链路层的研究主要集中在 MAC 协议方面,无线传感器

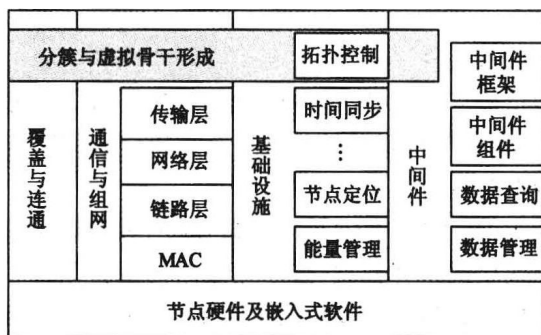


图 1-1 无线传感器网络的网络体系

网络的 MAC 协议旨在为资源(特别是能量)受限的大量传感器节点建立具有自组织能力的多跳通信链路,实现公平有效的通信资源共享,处理数据包之间的碰撞,研究重点是如何节省能量。虽然 MAC 协议方面的研究取得一些进展,但仍然有很多问题没有解决,如移动无线传感器网络的 MAC 协议、无线传感器网络自组织所需能量下界、能量有效的错误控制编码模式、能量有效的节点操作模式等问题。

网络层路由协议的研究主要有:基于聚簇的路由协议、基于地理位置的路由协议、能量感知路由协议、以数据为中心的路由协议、容错路由协议等类型。在路由协议方面目前仍然有很多关键问题未解决,如节能与通信服务质量的平衡、支持拓扑结构频繁改变的路由协议、面向应用的路由协议、安全路由协议等问题。

当无线传感器网络与 Internet 或其他网络相连接时,传输层协议尤其重要。无线传感器网络的能量受限性、节点命名机制、以数据为中心等特征,使其传输控制很困难。无线传感器网络的传输层需要特殊的技术和方法,目前关于无线传感器网络传输层方面的研究相对滞后。

1.2.2 基础设施

除了通信协议,无线传感器网络及其应用系统需要很多其他技术的支持,如拓扑控制、时间同步、节点定位、能量管理、网络安全、QoS 管理等。

拓扑控制的问题是在满足网络覆盖度和连通度的前提下,通过功率控制或层次拓扑控制,最小化网络的能量消耗。需要以实际应用为背景,研究多种机制,强调网络拓扑控制的自适应和鲁棒性,在保证网络连通性和覆盖度的前提下提高网络通信效率,最大限度地节省能量,延长网络的生存期。

在无线传感器网络中,每个节点都有自己的时钟。由于不同节点的晶体振荡器频率存在误差以及环境干扰,即使在某个时刻所有节点都达到了时间同步,它们的时间也会逐渐出现偏差。无线传感器网络的协同工作特点需要各传感器节点的时间同步,所以时间同步机制是无线传感器网络的关键机制。由于传统分布式协同系统中的时间同步机制不适用于无线传感器网络,人们在无线传感器网络时间同步方面开展了一些工作并取得了一些成果。然而还有很多无线传感器网络时间同步关键问题没有解决,例如同步精度与能量有效性之间的平衡、局部同步和全网同步之间的关系、抗外来侵扰的同步机制、同步机制的性能估计、安全时间同步机制等问题。

在无线传感器网络系统中,位置信息对于无线传感器网络应用至关重要,没有位置信息的数据几乎没有意义。因此,传感器节点定位是无线传感器网络的关键技术之一。人们提出了两类传感器节点定位方法:基于测量距离的定位方法、与测量距离无关的定位方法。基于测量距离的定位方法需要附加的硬件设备,与测量距离无关的定位方法精度低。目前还有很多关键问题需要解决,如定位精度评估、信标节点自身位置误差对定位精度的影响、测量

距离的误差对定位精度的影响、网络拓扑结构对定位的影响等问题。

无线传感器网络安全研究主要集中在密钥管理、身份认证和数据加密方法、攻击检测与抵御、安全路由协议和隐私问题等方面。无线传感器网络安全问题的研究工作相对较少,亟待解决的挑战性问题还很多,如使用有限内存空间管理大量预分配密钥、支持新节点加入的密钥预分配技术、低能耗加密方法、入侵模型和入侵抵御方法、安全路由方法、安全网内数据处理技术等问题。

1.2.3 中间件和数据管理技术

无线传感器网络中间件是位于操作系统和应用软件之间的软件系统。中间件的研究目前主要集中在两个方面:一是问题的识别和探索,二是部分算法和中间件组件的研究。无线传感器网络数据管理系统也是一种中间件,是一个相对独立而且比较大的软件。

无线传感器网络以数据为中心的特点使得无线传感器网络与数据库系统类似:无线传感器网络可视为一个数据空间或数据库,面向的是以数据为中心的查询。于是,数据库研究者开始采用数据库系统的研究方法来研究无线传感器网络,目前主要集中在感知数据的存储与索引技术、无线传感器网络数据查询处理技术。数据管理技术的研究尚待深入,如数据模型的研究成果无法表达感知数据的语意,不适合感知数据特点;数据操作算法的研究仅考虑了聚集操作,大量的数据操作算法无人问津;应用中最经常使用的实时查询的优化与处理没有被考虑;支持数据管理的通信协议至今很少见。

1.2.4 节点及其嵌入式软件系统

传感器节点的研究主要包括硬件设计和嵌入式软件系统两个

方面。在传感器节点硬件方面,人们开展了如下研究:新传感器概念、理论和技术;新型感知材料和装置的研究,如化学感知材料和装置、生物感知材料和装置等;以降低能耗为核心,把传感器、计算部件、存储部件、通信部件集成为微型传感器。目前国内外研制出很多种传感器节点,它们在实现原理上相似,只是分别采用了不同的微处理器等器件。典型传感器节点包括 Smart Dust, Mica 系列, Telos 以及 Crossbow 公司的产品等。我国的中国科学院计算技术研究所、哈尔滨工业大学、中国科学院软件研究所、黑龙江大学等单位也都研制了具有我国自主知识产权的具有感知、计算和通信能力的微型传感器节点,并用这些传感器构造了各种无线传感器网络。

目前在嵌入式软件系统方面的研究成果主要是嵌入式操作系统。加利福尼亚大学伯克利分校研究开发了一个传感器节点操作系统 TinyOS。TinyOS 有三个主要特点:基于组件的架构、基于事件和任务的并发模式、独立的状态操作。加利福尼亚大学洛杉矶分校研究了传感器节点嵌入式操作系统 SOS, 该系统具有支持无线传感器网络任务重构能力等特点。传感器节点嵌入式软件系统的研究开发工作远落后于其他方面的研究,还有大量的工作需要完成。

1.2.5 应用研究分类

根据无线传感器网络的功能特性,可以把无线传感器网络的研究分为无线多媒体传感器网络^[18]、无线传感器执行器网络、无线水下传感器网络和无线地下传感器网络等。

(1) 无线多媒体传感器网络

随着监测环境的日趋复杂多变,由传统传感器网络所获取的简单数据愈加不能满足人们对环境监测的全面需求,迫切需要将信息量丰富的图像、音频、视频等媒体引入到以传感器网络为基础

的环境监测活动中来,实现细粒度、精准信息的环境监测。由此,多媒体传感器网络应运而生。

无线多媒体传感器网络是由一组具有计算、存储和通信能力的多媒体传感器节点组成的分布式感知网络。它借助于节点上多媒体传感器感知所在周边环境的多种媒体信息(音频、视频、图像、数值等),通过多跳中继方式将数据传到信息汇聚中心,汇聚中心对监测数据进行分析,实现全面而有效的环境监测。

近年来,多媒体传感器网络技术的研究已引起了科研人员的密切关注,一些学者开展了多媒体传感器网络方面的探索性研究,在 IEEE 系列会议(如 MASS、ICIP、WirelessCOM 等)、ACM 多媒体和传感器网络相关会议(ACM Multimedia、ACM MOBI-COM、ACM 无线传感器网络等)发表了一些重要的研究成果。从 2003 年起,ACM 还专门组织国际视频监控与传感器网络研讨会交流相关研究成果。美国加利福尼亚大学、卡耐基梅隆大学、马萨诸塞大学^[19]、波特兰州立大学^[20]等著名学府也开始了多媒体传感器网络方面的研究工作,纷纷成立了视频传感器网络组并启动了相应的科研计划。我国学者也非常重视多媒体传感器网络方面的研究,北京邮电大学智能通信软件与多媒体北京市重点实验室、中国科学院计算技术研究所、哈尔滨工业大学已开始了该领域的探索。

无线多媒体传感器网络作为全新的研究领域,在基础理论和技术实现两个层面提出了大量的挑战性研究课题^[21,22,17~19]。这些问题的解决,是加快多媒体传感器网络实用化的基础。

(2) 无线传感器执行器网络

从无线传感器网络衍生出来的分布式无线传感反应网络(WSAN)^[23,24]的研究,将反应装置添加到无线传感器网络所形成的 WSAN,极大地增强了传感器网络的应用能力和范围。它能够观察实体世界,处理数据,并能根据观察到的数据作出决策,执行