

无线传感器网络 路由与安全

冯 勇 / 王 锋 / 钱 谦 / 江 虹 / 王 翊 著

《无线传感器网络路由与安全》是一本论述在国防军事、环境监测、医疗卫生、工业生产等领域有着广阔应用前景的新兴无线传感器网络技术的专业书籍。全书分为两个部分，分别从实现高效节能的数据收集的角度、实现有效的数据生存和匿名隐私的角度介绍了无线传感器网络路由和安全防护领域的研究现状和存在的问题，重点阐释与讨论了作者在上述领域开展的研究工作和取得的成果。本书可为物联网、无线传感器网络和无线通信领域的科研工作者和技术开发人员提供翔实、专业和独创的知识，具有很好的参考价值。

云南大学出版社
Yunnan University Press

无线传感器网络 路由与安全

冯 勇 / 王 锋 / 钱 谦 / 江 虹 / 王 翊 著

 云南大学出版社
Yunnan University Press

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络路由与安全 / 冯勇等著. —昆明:
云南大学出版社, 2015
ISBN 978-7-5482-2281-1

I. ①无… II. ①冯… III. ①无线电通信—传感器—
计算机网络—路由选择②无线电通信—传感器—安全技术
IV. ①TP212②TN915.05

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第059109号

责任编辑: 叶枫红

装帧设计: 郑明娟

无线传感器网络 路由与安全

冯勇 / 王锋 / 钱谦 / 江虹 / 王翔 著



出版发行: 云南大学出版社

印 装: 昆明市五华区教育委员会印刷厂

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 12.5

字 数: 245千

版 次: 2015年5月第1版

印 次: 2015年5月第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-5482-2281-1

定 价: 38.00元

社 址: 昆明市翠湖北路2号云南大学英华园内

邮 编: 650091

电 话: (0871) 65031071 65033244

网 址: <http://www.ynup.com>

E-mail: market@ynup.com

前 言

由大量廉价、低功率传感器节点组成的无线传感器网络具有快速部署、适用于各种恶劣环境、能够感知并获取网络覆盖区域中大量翔实可靠的数据等优点,在国防军事、环境监测、医疗卫生、交通运输、工业控制等领域有着广阔的应用前景。由于成本控制和体积限制等原因,无线传感器网络中节点的能量、计算、存储、带宽等资源严重受限。为减少资源消耗,传感器节点通常采用周期性的工作/睡眠调度模式和短距离的通信方式,采集到的数据是通过节点间相互协作以多跳转发的方式传递到汇聚节点的,因而无线传感器网络具有间断连通和多跳转发的特性。特别是在移动传感器网络中,节点移动性导致的网络间断连通、拓扑变化更为频繁和明显。无线传感器网络往往部署于恶劣甚至敌对的环境中,传感器节点会因环境中破坏性因素的作用而损毁和失效,且传感器节点的能量有限且难于补充,一旦能量耗尽节点将“死亡”。

在军事、安保等许多领域中无线传感器网络感知和传输的数据十分敏感,安全防护措施是必不可少和非常重要的,然而实现无线传感器网络安全化存在着诸多制约:无线信道开放传输的脆弱性;廉价传感器节点防护薄弱,容易被攻击者捕获的脆弱性;部署环境无人看管存在着物理防护的脆弱性;节点计算、存储和能量受限,不适合采用安全等级高但计算强度大的密码算法的局限性;等等。因此,在网络间断连通、多跳转发、节点易损毁失效、资源受限的无线传感器网络中实现有效的路由和安全成为无线传感器网络大规模推广和应用必须解决的两个关键问题,是无线传感器网络研究中的重点和难点。当前无线传感器网络领域的相关研究在我国尚处于起步阶段,为更好地普及无线传感器网络知识,特别是其路由和安全的原理和机制,迫切需要具有专业性和前瞻性的作为指导书籍。

本书共分为两个部分:第一部分(包含五章)主要从实现高效节能的数据收集的角度介绍了无线传感器网络路由机制相关研究的理论、方法和成果;第二

部分（包含五章）主要从实现有效的数据生存和匿名隐私方面介绍了无线传感器网络安全防护相关研究的理论、策略和成果。本书可作为物联网、无线传感器网络和无线通信领域高年级本科生和研究生的教材，也可以为从事无线传感器网络路由和安全方向的科研工作者和技术开发人员提供翔实、专业的知识，具有很好的参考价值。本书对研究无线传感器网络的路由和安全机制有重要的学术价值和社会意义。

本书由昆明理工大学冯勇博士执笔，昆明理工大学王锋博士、钱谦博士，以及江虹和王翊两位同事在本书的撰写过程中给出了很多宝贵的意见和建议。昆明理工大学信息工程与自动化学院研究生李挺、杨杰和郑雄奇同学也为本书的撰写提供了帮助。本书受到国家自然科学基金项目（编号：61262081、61462056 和 71161015）、昆明理工大学引进人才科研启动项目（编号：KKS201203027）、云南省应用基础研究计划重点项目（编号：2014FA028）、云南省应用基础研究计划项目（编号：KKS201303008）、云南省高校普适与可信计算科技创新团队和昆明理工大学可信服务计算学科方向团队建设经费资助。

由于时间仓促和水平所限，本书中不足和纰漏之处在所难免，恳请读者和同行不吝指正。

作 者

2014 年 12 月

目 录

第一部分 无线传感器网络路由

第1章 无线传感器网络路由概述	3
1.1 无线传感器网络基础	3
1.1.1 研究背景	3
1.1.2 体系结构	5
1.1.3 无线传感器网络的协议栈	6
1.1.4 无线传感器网络的特点	8
1.1.5 无线传感器网络的主要应用	9
1.2 无线传感器网络研究的热点	11
1.2.1 物理层	11
1.2.2 数据链路层	11
1.2.3 网络层	12
1.2.4 传输层	13
1.2.5 应用层	14
1.3 无线传感器网络路由机制	14
1.3.1 节点静止的无线传感器网络路由研究	16
1.3.2 移动传感器网络路由研究	19
1.4 研究动机	23
第2章 移动传感器网络基于最小期望延迟路由	31
2.1 引 言	31
2.2 网络模型	32
2.3 MEDTS 路由算法	33

2.3.1 计算节点与汇聚点的相遇和分离时间	33
2.3.2 计算链路终止时间	34
2.3.3 计算节点的最小期望递交时间	36
2.3.4 MEDT 的更新机制	37
2.3.5 数据传输算法	38
2.4 性能分析	40
2.4.1 数据产生速率对性能的影响	41
2.4.2 节点密度对性能的影响	42
2.4.3 节点运动速度对性能的影响	43
2.4.4 网络寿命分析	44
2.4.5 MEDTS 中 t_{hop} 对性能的影响	44
2.5 本章小结	45
 第3章 能量高效的移动传感器网络路由策略	 48
3.1 引言	48
3.2 网络模型	50
3.3 问题描述	51
3.4 EDAG 路由算法	53
3.4.1 计算节点递交概率	53
3.4.2 计算链路终止时间	54
3.4.3 计算节点的最大期望递交概率	55
3.4.4 数据传输算法	57
3.5 仿真实验与性能分析	58
3.5.1 仿真实验环境	58
3.5.2 数据产生速率对性能的影响	59
3.5.3 节点密度对性能的影响	60
3.5.4 节点路由缓存对性能的影响	62
3.5.5 网络寿命分析	62
3.6 本章小结	63

第4章 自适应复本数的移动传感器网络路由	67
4.1 引 言	67
4.2 网络模型	69
4.3 问题描述	69
4.4 RADG 数据收集算法	70
4.4.1 消息复本数目的计算	70
4.4.2 节点递交概率的计算	71
4.4.3 数据传输算法	72
4.4.4 路由缓存管理算法	73
4.5 仿真实验与性能分析	74
4.5.1 仿真实验环境	74
4.5.2 数据发送速率对性能的影响	75
4.5.3 节点密度对性能的影响	76
4.5.4 节点路由缓存对性能的影响	77
4.5.5 数据传输负担分析	78
4.5.6 网络寿命分析	79
4.6 RADG 和 EDAG 算法的比较	80
4.7 本章小结	80
第5章 层次结构的移动传感器网络路由	83
5.1 引 言	83
5.2 EFTCP - MWSN 协议	86
5.2.1 簇的建立阶段	86
5.2.2 簇的稳定传输	87
5.2.3 容错机制	89
5.3 性能分析	90
5.3.1 与典型协议的比较	90
5.3.2 节能特性分析	90
5.4 仿真实验与性能分析	92
5.4.1 实验设置	92
5.4.2 网络总体能量消耗	92

5.4.3 网络寿命	93
5.4.4 网络吞吐量	94
5.5 本章小结	94

第二部分 无线传感器网络安全

第1章 无线传感器网络安全概述	99
1.1 无线传感器网络安全基础	99
1.1.1 安全威胁	99
1.1.2 安全防范方法	101
1.2 数据生存	102
1.3 拓扑修复策略	105
1.4 安全路由策略	107
1.4.1 基于反馈信息的安全路由	107
1.4.2 基于地理位置的安全路由	109
1.4.3 基于密码算法的安全路由	110
1.4.4 基于多路径传输的安全路由	111
1.4.5 针对层次结构的安全路由	113
1.4.6 应对特定攻击的安全路由	114
1.5 研究动机	115
第2章 灾害环境中无线传感器网络数据生存研究	125
2.1 引言	125
2.2 网络模型	127
2.3 定义和问题描述	128
2.3.1 定义	128
2.3.2 问题描述	130
2.4 逃避式的数据生存算法	130
2.5 FEDS 数据生存算法	131
2.5.1 信息收集	132

2.5.2 目的地和路径选择	133
2.5.3 安全区域节点的组织	134
2.5.4 数据转移和存储	136
2.6 仿真实验与性能分析	136
2.6.1 仿真实验环境	136
2.6.2 转移的数据消息数目对性能的影响	137
2.6.3 节点密度对性能的影响	138
2.6.4 节点通信范围对性能的影响	139
2.6.5 灾害严重程度对性能的影响	140
2.7 本章小结	141
第3章 无线传感器网络分布式数据生存策略研究	143
3.1 引 言	143
3.2 网络模型	144
3.3 定义和问题描述	145
3.3.1 定 义	145
3.3.2 问题描述	146
3.4 VGDS 数据生存算法	147
3.4.1 安全区域的组织	148
3.4.2 安全区域信息分级广播	148
3.4.3 目的安全区域选择	150
3.4.4 数据转移	151
3.5 仿真实验和性能分析	152
3.5.1 仿真实验环境	152
3.5.2 转移的数据消息数目对性能的影响	153
3.5.3 节点密度对性能的影响	154
3.5.4 节点通信范围对性能的影响	154
3.5.5 灾害严重程度对性能的影响	155
3.6 VGDS 和 FEDS 算法的比较	156
3.7 本章小结	157

第4章 无线传感器与执行器网络拓扑修复研究	159
4.1 引 言	159
4.2 问题模型	160
4.3 基于割点的拓扑修复	162
4.3.1 选择代理	162
4.3.2 拓扑修复	164
4.4 性能评价	167
4.4.1 局部覆盖率对比	168
4.4.2 仿真实验	168
4.5 本章小结	172
第5章 隐私增强的安全路由	174
5.1 引 言	174
5.2 系统模型	176
5.2.1 网络模型	176
5.2.2 威胁和信任模型	177
5.3 DPAR 匿名协议	177
5.3.1 假名使用规则	177
5.3.2 路由发现	177
5.4 性能评价	180
5.4.1 隐私保护	180
5.4.2 安全性	180
5.4.3 能量消耗	181
5.4.4 数据传输性能	182
5.5 本章小结	184
第6章 总结与展望	187
6.1 研究总结	187
6.2 未来的研究展望	189

第一部分

无线传感器网络路由

第1章 无线传感器网络路由概述

无线传感器网络被普遍认为是 21 世纪最重要的技术之一,从 20 世纪 90 年代兴起至今一直受到广泛的关注,目前仍然是计算机网络、无线通信和微电子技术等相关领域的研究热点。本章首先简要介绍了无线传感器网络的研究背景、特点、体系结构等基础知识,并综述当前无线传感器网络中研究的热点内容。接着分别阐述了与静止部署和节点可移动的无线传感器网络路由机制相关的研究内容、现状和主要评价指标。本章构成了本书第一部分研究的基础。

1.1 无线传感器网络基础

1.1.1 研究背景

信息的获取是信息传输、处理和应用的基础,它是信息科学的重要组成部分,也是信息技术产业链上的一个重要环节。随着微电子技术、嵌入式计算技术、信号处理技术、低功耗无线通信技术,以及互联网的迅速发展,传统的传感器信息获取技术从独立的单一化模式向集成化、微型化、智能化、网络化方向发展,成为信息获取最重要和最基本的技术之一。正是在此背景之下,出现了由大量集成有传感器、数据处理单元和通信模块的微小节点通过自组织的方式构成的网络,即无线传感器网络(Akyildiz 等, 2002; 孙利民等, 2005)。

在无线传感器网络中,各传感器节点能够相互协作完成感知、采集网络覆盖区域内的各种环境或监测对象的信息,对这些信息进行处理,以获得翔实而准确的信息,并通过无线多跳方式传送给需要这些信息的用户。可以说,由计算机技术、传感器技术、无线通信技术相结合产生的无线传感器网络实现了物理世界、信息世界与人类社会三元世界的连通,将会对人类社会的生产和生活产生深远而积极的影响(崔莉等, 2005)。因此,无线传感器网络被人们寄予了极高的期望,例如美国《技术评论》杂志于 2002 年 2 月评出的世界十大新兴技术中,无线传感器网络位列第一(MIT technology review, 2002)。美国《商业周刊》杂志把效

用计算、无线传感器网络、塑料电子学和仿生人体器官并称为全球未来的四大高技术产业 (Business week magazine, 2003)。

由于无线传感器网络在军事、环境、医疗、救灾、工业和商业等领域所具有的潜在的巨大应用价值,世界各国军事部门、学术界和工业界都对其发展表现出了极大的关注。以对无线传感器网络技术研究和推广最为活跃的美国为例:在军事方面,美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 等机构对无线传感器网络给予了高度重视,支持设立了一系列的军用传感器网络研究项目,其中包括“灵巧传感器网络”计划 (Smart Sensor Web, SSW)、“网状传感器系统”研究计划 (Co-operative Engagement Capability, CEC)、“网络嵌入式系统技术”项目 (Network Embed System Technology, NEST),以及 C4KISR (Command, Control, Communications, Computers, Kill, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance) 战场指挥系统项目等。

在学术界,美国自然科学基金委员会 (NSF) 在最近十余年每年都划出大量的资金支持无线传感器网络相关的基础理论和关键技术研究。在 NSF 的推动下,美国的许多大学和研究机构投入了大量的研发力量开展无线传感器网络的研究工作,例如,美国加州大学伯克利分校 (UC - Berkeley) 负责的智能微尘 (Smart Dust) 项目 (Kahn、Katz 和 Pister, 1999) 和低成本、低功耗节点的无线专用网络 PicoRadio 项目 (Rabaey 和 Ammer, 2000); 美国加州大学洛杉矶分校 (UCLA) 主持的无线集成网络传感器 (Wireless Integrated Network Sensors, WINS) 项目; 美国麻省理工学院 (MIT) 承担的面向低功耗需求的无线传感器网络 μ AMPS (micro - Adaptive Multi - domain Power aware Sensors) 项目; 以及由多达 25 家大学和研究机构共同承担的大规模分布式军事传感系统 SensIT (Sensor Information Technology) 项目; 等等。

在工业界,英特尔、惠普、微软、德州仪器和 Rockwell 公司等业界巨头已加入到无线传感器网络的研究中,并启动了许多新的研发计划。此外,无线传感器网络的发展也催生出一批新技术公司,其中有代表性的有 Crossbow Technology 公司和 Dust Networks 公司等。工业界的加入极大地推进了无线传感器网络技术的发展,特别是在无线传感器节点的微型化、低功率设计、组网、数据管理等方面取得了许多重要的进步。Imote、SmartMesh 和 MICA 等系列的无线传感器节点已经走出实验室并被应用到多个项目中正是这种进步的具体例证。

除美国外,无线传感器网络同样受到了其他许多国家的高度重视。日本、德国、英国、法国、意大利、印度和巴西等国家投入了大量的资金和人力,加入到无线传感器网络技术的研究中。在我国国内,学术界和工业界也对无线传感器网络表现出了极大的兴趣,许多高等院校、科研机构和企业相继展开了相关的基础

研究和产品开发等工作。2006年发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》在信息技术领域确定的三个前沿方向中有两个方向（即智能感知技术和自组织网络技术）与无线传感器网络密切相关。目前，国家自然科学基金已资助了大量无线传感器网络基础理论和关键技术的研究工作，其中包括多项重点项目。国家重点基础研究发展计划（“973”项目）也已设立了多项与无线传感器网络相关的项目，如“无线传感器网络的基础理论及关键技术研究”和“BNI融合的微纳传感器及其系统基础研究”等。

最近几年来，物联网概念的提出和快速发展受到了全世界范围内的高度重视。IBM公司在2008年提出的“智慧地球”构想被美国各界认为与1992年提出的“信息高速公路”构想有许多相似之处，同样是振兴经济、确立竞争优势的关键战略。中国政府在2009年描绘了“感知中国”的蓝图，物联网被正式列为国家五大新兴战略性新兴产业之一，在国内受到了全社会的极大关注，相关的研究和应用进入到一个高速发展的阶段。在物联网飞速发展这样一个大背景下，作为物联网核心技术之一的无线传感器网络，其研究、应用和推广也将迎来新的机遇和挑战。

1.1.2 体系结构

1. 传感器节点结构

无线传感器网络是由部署在监测区域内的大量的廉价微型传感器节点以无线多跳通信方式形成的自组织网络系统，其中的传感器节点能够协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中被感知对象的信息，并发送给用户（李建中、高宏，2003）。无线传感器网络中最基本的组成要素是传感器节点，它由数据采集单元（Data acquisition unit）、处理单元（Process unit）、数据传输单元（Data transfer unit）和能量供应单元（Power unit）四部分组成，如图1-1所示。

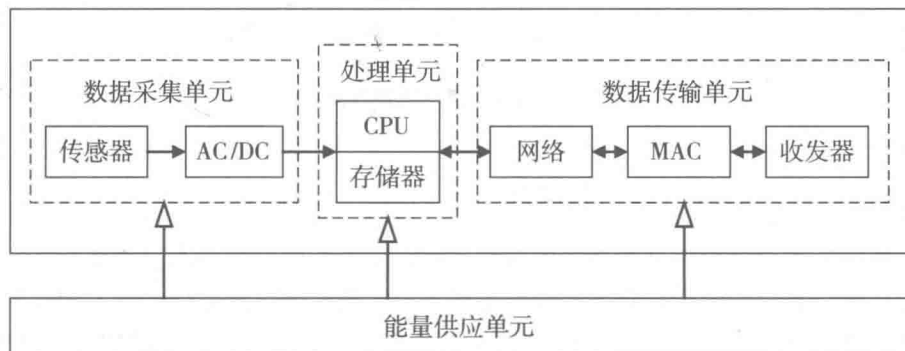


图 1-1 传感器节点结构

数据采集单元负责监测区域内信息的采集和数据转换，借助形式多样的传感部件，传感器节点能够感知温度、湿度、噪声、光强度、压力、土壤成分、移动物体的大小、速度和方向等信息。处理单元负责控制整个传感器节点的操作、存储和处理数据信息。数据传输单元负责与其他传感器节点交换控制信息和传输采集到的数据信息。能量供应单元为传感器节点各部件提供运行所需的能量，通常采用微型电池。

2. 网络体系结构

在传感器网络中，通常节点被任意部署在被监测区域内，部署过程可以通过飞行器撒播、人工埋置或火箭弹射等方式完成。部署完成后，传感器节点间以无线通信方式建立连接，形成自组织网络，通过多跳中继方式将监测数据传到汇聚节点（Sink node）。汇聚节点通过专用链路、Internet、卫星链路或者临时链路（如游弋在监测区的车辆、无人飞机等）将整个网络覆盖区域内的数据传送到数据处理中心进行集中处理，以提供给用户。图 1-2 给出了传感器网络体系结构一般形式的描述（任丰原、黄海宁和林闯，2003）。

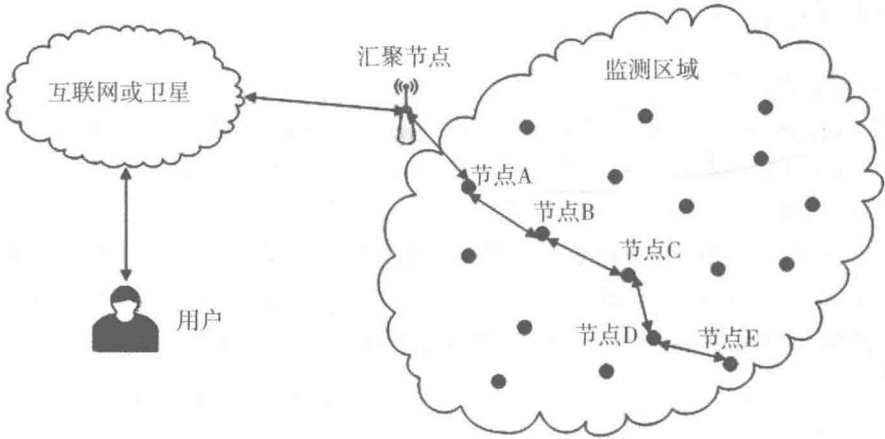


图 1-2 无线传感器网络体系结构

1. 1. 3 无线传感器网络的协议栈

与传统无线通信网络相比，无线传感器网络更加面向应用层，为适应特定的应用目标，其组织和结构在很大程度上进行了优化，以减少系统开销、提高网络性能并延长网络寿命。无线传感器网络的协议栈将信息传输与功耗感知相结合，将数据处理融入网络协议，从而可以通过无线媒体高效地交互网络的功耗状态，