

无线传感器网络 关键技术及应用

○ 陈继光 著



电子科技大学出版社

University of Electronic Science and Technology of China Press

无线传感器网络 关键技术及应用

○ 陈继光 著



电子科技大学出版社

University of Electronic Science and Technology of China Press

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络关键技术及应用 / 陈继光
著. -- 成都: 电子科技大学出版社, 2018.7
ISBN 978-7-5647-6469-2

I. ①无… II. ①陈… III. ①无线电通信—
传感器—研究 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 143177 号

无线传感器网络关键技术及应用

陈继光 著

策划编辑 谭炜麟

责任编辑 谭炜麟

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 郑州泰宏印刷有限公司

成品尺寸 170mm × 240mm

印 张 12

字 数 196 千字

版 次 2018 年 7 月第一版

印 次 2018 年 7 月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-6469-2

定 价 50.00 元

版权所有,侵权必究

前 言

无线传感器网络具有非常广阔的应用前景,其广泛的应用必然会对人们的生活和生产带来深远影响。它是由部署在监测区域内,大量传感器节点组成的自组织、多跳的无线网络系统。它无须固定设备支撑,具有快速部署、易于组网、抗毁性强、不受有线网络约束等优势,其弱势在于动态拓扑和能量受限。节点部署技术和节点定位技术是无线传感器网络研究中的关键技术。优化的节点部署策略,可以较大程度地增强网络中节点的容错能力和负载均衡,亦可较好地提升网络的性能,延长网络的生命周期,降低网络的部署代价。对于无线传感器网络的大部分应用,传感器节点的位置信息是至关重要的。传感器节点为用户所提供监测部署区域上下文相关信息,与位置信息相关的占80%以上。“低耗自主”是无线传感器网络的基本特征,故在所有节点加装定位芯片是行不通的。此外GPS仅适用于室外无遮挡条件下,因而只能在部分节点上安装定位芯片,其他节点的位置则须通过定位算法估计出来。因此,研究无线传感器网络节点部署技术和节点定位技术有着较强的应用背景和现实意义。

本书总结了作者在无线传感器网络节点部署技术和节点定位技术方面取得的研究成果。具体包括以下内容:针对无线传感器网络节点部署技术,首先采用基于位置信息的理想流体模型对节点部署进行了研究;其次采用了非守恒黏性流体模型对三维网络的节点部署进行了研究;而后提出了基于改进人工鱼群的流体模型分布式节点部署算法,较好地分散了节点功耗,延长了无线传感器网络的生命周期。针对无线传感器网络节点定位技术,首先研究了基于可行加权最小二乘和主成分分析的递增式定位算法,然后提出了基于稳健回归的定位修正算法。本书理论与仿真结果较好吻合,从而证实了理论计算与分析的正确性和可靠性,为节点部署技术和定位技术的研究及应用,做了有益的探索。

本书在编写和出版过程中得到了南京理工大学计算机科学与工程学院钱焕延教授的指导。郑州航空工业管理学院以及计算机学院的有关领导、专家给予了大力支持。河南省科技攻关项目、河南省教育厅高等学校重点科研项目给予

了资金支持。此外,本书在撰写过程中引用了大量国内外相关领域的最新成果和资料,许多朋友为此书付出了辛勤的劳动,在此一并表示衷心的感谢!

随着技术的进步,无线传感器网络技术还会不断地发展,我们希望得到各位读者的支持,也期待与大家共同探讨相关技术的发展动向。虽然本书是作者近年来研究工作的总结,有一定的理论和实验基础,但由于作者水平有限,书中错误在所难免,欢迎读者批评指正。

陈继光
2018 年 5 月

目 录

1 绪 论	1
1.1 研究的背景及意义	3
1.2 无线传感器网络概述	5
1.2.1 无线传感器网络研究现状	5
1.2.2 水下传感器网络研究现状	7
1.2.3 无线传感器网络的特点	9
1.2.4 无线传感器网络的应用领域	9
1.2.5 无线传感器网络研究的关键技术	11
1.3 无线传感器网络节点部署问题的研究	13
1.3.1 节点部署算法的分类及研究现状	13
1.3.2 水下传感器网络节点部署研究现状	16
1.3.3 节点部署策略的性能优化指标	20
1.4 无线传感器网络节点部署技术	23
1.5 无线传感器网络节点定位技术	31
1.6 全书的结构安排	33
2 二维空间无线传感器网络节点部署算法研究	35
2.1 引 言	37
2.2 二维移动无线传感器网络节点部署问题	39
2.2.1 流体动力学与节点部署的相关性	39
2.2.2 理想流体模型应用于节点部署	40
2.2.3 二维部署环境中节点位置估计	42
2.3 理想流体模型	45

2.3.1	流体模型	45
2.3.2	理想流体模型控制方程	46
2.4	基于位置信息的理想流体模型节点部署算法	49
2.4.1	算法设计	49
2.4.2	节点部署的相关条件	51
2.4.3	模型评价指标	52
2.5	仿真实验	57
2.5.1	实验参数设定	57
2.5.2	仿真结果与分析	58
2.6	本章小结	70
3	三维空间无线传感器网络节点部署算法研究	71
3.1	引言	73
3.2	三维无线传感器网络节点部署问题	75
3.2.1	三维空间节点部署所面临的挑战	75
3.2.2	三维部署环境中节点位置估计	76
3.3	使用卫星图像制作部署地图	78
3.3.1	部署区域选取	78
3.3.2	区域信息提取	79
3.3.3	制作部署地图	81
3.4	非守恒黏性流体模型控制方程	83
3.5	非守恒黏性流体模型三维空间节点部署算法	88
3.5.1	算法设计	88
3.5.2	节点部署的相关条件	91
3.5.3	模型评价指标	93
3.6	仿真实验	95
3.6.1	实验参数设定	96
3.6.2	仿真结果与分析	97
3.7	本章小结	104

4 水下无线传感器网络节点部署算法研究	105
4.1 引 言	107
4.2 水下无线传感器网络节点部署问题	109
4.2.1 水下传感器节点感知模型	109
4.2.2 网络中的覆盖控制模型	110
4.3 水下环境节点位置估计	113
4.4 流体模型	115
4.4.1 黏性流体模型	115
4.4.2 水流移动模型	117
4.5 人工鱼群算法	119
4.6 基于改进人工鱼群的流体模型节点部署算法	121
4.6.1 算法设计	121
4.6.2 模型评价指标	126
4.7 仿真实验	129
4.7.1 实验参数设定	129
4.7.2 仿真结果与分析	130
4.8 本章小结	138
5 一种改进的递增式定位算法	139
5.1 引 言	141
5.2 相关概念	144
5.2.1 可行加权最小二乘	144
5.2.2 主成分分析	145
5.2.3 FWLS-PCA	147
5.3 实验与仿真	149
5.4 本章小结	152
6 基于稳健回归的定位修正算法	153
6.1 引 言	155
6.2 基于稳健回归的误差修正模型	157

6.2.1	模型描述	157
6.2.2	模型求解	158
6.3	仿真实验	161
6.3.1	误差修正效果测试	161
6.3.2	模型稳健性测试	163
6.4	本章小结	164
7	结 束 语	165
7.1	本书成果总结	167
7.2	未来工作展望	169
	参考文献	170

1 绪 论

卷一

1.1 研究的背景及意义

进入 21 世纪以来,随着嵌入式计算、传感器、分布式信息处理和无线通信等技术的发展,无线传感器网络被广泛应用于数据采集、环境监测、智能家居、军事、交通等领域,美国商业周刊将无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)列为未来最具影响的四项技术之一。同时,无线传感器网络、仿生人体器官和塑料电子学又被视为未来全球三大高科技产业^[1-2]。WSN 受到了国内外专家和学者极大的关注,成为国际竞争的焦点,也关系到国家国防、经济和社会的安全^[3-4]。相关人员对无线传感器网络的研究也越来越深入,目前研究的热点主要有无线传感器网络的网络协议、时间同步、覆盖控制、定位技术和节点部署等关键技术。

WSN 的组网无须要固定设备来支撑,其特点在于可快速部署、抗毁性强、易组网和无须架设有线网络等。很适合应用于传统有线通信环境下难以完成任务的苛刻环境,比如战场、雷区、危化品爆炸区域、核电厂、远海航道等,这些区域可以通过 WSN 来实现实时高效的监测;同时,为避免对自然生态环境造成侵入性的破坏,WSN 也可应用于对水资源(如南水北调水渠、水库、江河等水域)、大气环境等领域的监测^[5-8]。WSN 包括水下传感器网络和陆地无线传感器网络两类,它们之间的共同之处在于低耗自组、异构互联、能量受限;不同之处在于它们所采用的通信方式,陆地无线传感器网络通常采用电波通信,而水下传感器网络则通常采用声学通信^[9]。由于电磁波在水下传播损耗大大延长,因此不适合在水下环境中使用,而声学通信信道又具有选择性衰落、背景噪声较大、通信带宽窄、延迟高和多途效应等特性,同时受水下传感器节点硬件技术水平所限,故对水下传感器网络的研究面临更大的困难,现有的陆地无线传感器网络的相关技术并不适合直接应用于水下环境。目前,由于硬件技术和网络技术并不成熟,研究人员对水下传感器网络的研究成果不多,尚处于起步阶段。

衡量一个国家是否强大的标准之一,就是看该国家是否是海洋大国。海洋拥有宝贵的资源和战略意义,对海洋的开发和利用关系到一个国家的国防安全 and 经济安全。我国拥有辽阔的海域和很长的海岸线,海洋监测能力的提升可有效地维护我国的海洋权益。因此,水下传感器网络的研究对我国具有重要的战略意义,也逐渐成为我国专家和学者研究的一个热点。水下传感器网络是由大量水下无线传感器网络节点部署在监测区域,它们之间由协同感知来采集相关数据,而后通过水声通信方式进行数据传输,从而组成一种自组织、分布式和多跳的网络系统。水面基站将采集的数据信息经过计算融合处理后,通过射频通信或有线通信发送给用户^[10-11]。正是由于水下传感器网络具有成本低、组网简单、分布式、异构互联等特性,近年来,水下传感器网络被广泛应用到敌情监测、海难搜救、资源开采等领域。

为使 WSN 发挥更好的作用,需要确保网络中的所有节点可以有效地覆盖监测区域,以便更好地完成信息获取和目标监测的任务。目前,无线传感器网络的支撑技术包括节点部署、节点定位、能量管理优化、覆盖控制、时钟同步等^[12-13],节点部署技术是无线传感器网络的核心关键技术之一,为使受限的节点能量、计算能力和通信带宽等资源得到优化配置,如何研究出优化的节点部署策略,就成为 WSN 研究中亟须解决的首要问题。一个优化的部署策略,可以较好地使网络的能耗、时间和空间复杂性最小化,提高水下传感器网络的感知、通信、监视、计算的服务质量。国内外学者对此做了大量的研究,提出了各种新的节点部署算法,近年来的研究表明,在 WSN 的节点部署中,应用流体动力学技术可以有效提高 WSN 的部署质量。随着 WSN 研究和应用的不断深入,WSN 必将对人类的活动产生重大影响,并被应用到各个领域。因此,研究无线传感器网络的节点部署技术具有重要的理论意义和应用价值。

1.2 无线传感器网络概述

1.2.1 无线传感器网络研究现状

我国近 20 年的飞速发展,使得人民的生活条件得到了很大的改善。同时,也带来了诸如 PM2.5 经常爆表的空气污染、交通堵塞、水体污染等社会及环境问题。而由微型传感器构成的低成本无线传感器网络的出现,对这些问题的缓解和最终解决,提供了一种新的解决方案。低成本、多功能微型传感器技术的快速发展,受益于现代网络、传感器、嵌入式计算和无线通信等技术的进步,WSN 能够完成诸如信息采集、数据处理、无线通信等多种功能,逐步成为计算机科学技术一个新的研究领域^[14-15]。

无线传感器网络具有非常广阔的应用前景,其广泛的应用必然会对人们的生活和生产带来深远影响。WSN 是由部署在监测区域内,大量传感器节点组成的自组织、多跳的无线网络系统。它无须固定设备支撑,具有快速部署、易于组网、抗毁性强、不受有线网络约束等优势,其弱势在于动态拓扑和能量受限。各类传感器节点之间协作感知、采集网络部署区域中的信息,并对该信息在嵌入式系统中处理后通过卫星或互联网传送给管理者^[16]。大量传感器节点自组织组成一些小的、多跳的无线网络,而后这些小的无线网络再组成一个更大的 WSN。它可以在一些恶劣苛刻的环境中有效地工作,如危化品爆炸区域、雷区、战场环境、深海、地震监测区等。无论在任何时间、地点和环境下,无线传感器网络都可以使人们获取大量翔实可靠的信息,从而实现“计算无处不在”的愿景。

无线传感器网络被广泛应用于大型活动的安全监测、智能家居、环境监测、健康医护、智能交通等领域^[17-19]。一个典型的 WSN 通常由三部分组成:传感器节点(Sensor Node)、汇聚节点(Sink Node)和管理节点(Manager Node),如图 1.1 所示。通常情况下,散布在某个区域内的无线传感器网络节点相互之间直接通信,并收集其周围感兴趣的环境信息。采集到的数据被量化成数字信号^[20-21],

经过一系列的处理,可以还原监测区域的诸多信息。传统的 WSN 协议栈主要包括五层协议:物理层、网络层、数据链路层、传输层和应用层,与互联网协议栈是相对应的,而 WSN 协议栈通常还包括能量管理、移动管理和任务管理这三个平台。WSN 的协议栈如图 1.2 所示,在这里时间同步、定位这两个功能子层用倒 L 型来表示,主要是由于它们的功能比较特殊,既需要为网络协议各层提供信息支持,又需要进行协作定位和时间同步。由于传感节点的通信距离有限,采集到的信息需要通过中继节点多跳传输来传递给汇聚节点,此外,传感器网络的部署也需要根据应用的类型来确定,不同的应用采用的部署方式也是千差万别的。

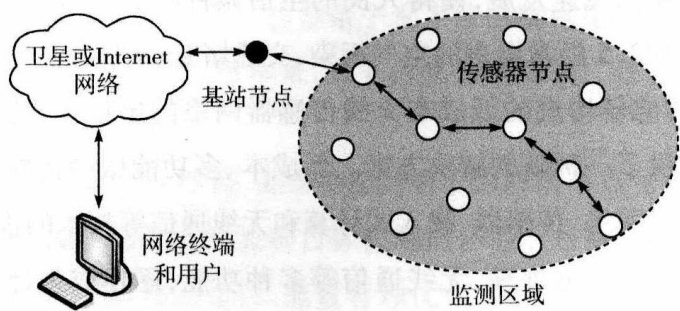


图 1.1 一个典型的 WSN 结构示意图

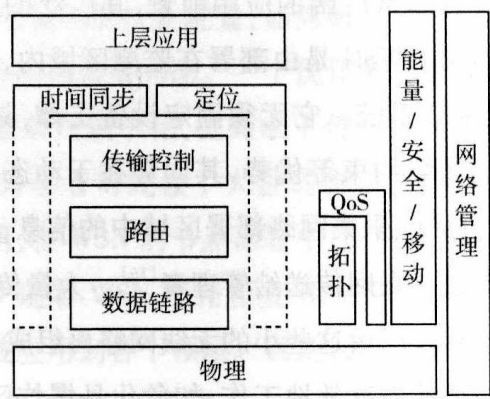


图 1.2 无线传感器网络协议栈

正是由于 WSN 拥有巨大的应用价值,国内外的工业界和学术界对此投入了极大的热情和关注。无线传感器网络起步于 20 世纪 80 年代,国际上一些有关 WSN 的研究成果逐步出现。美国 and 欧洲相继启动了 WSN 的研究计划,尤其是美国国防部和国家自然科学基金委在 WSN 的科研项目上投入了巨资来支持。1995 年,美国交通部启动了“国家智能交通系统项目规划”,该项目旨在建立全方位大范围的实时高效的综合交通管理系统,试图在地面交通管理上有效集成

利用现有的先进计算机技术、传感器技术、控制技术、通信技术等,该系统可有效避免交通堵塞和交通事故,保持安全的行车距离等;美国陆军于 2001 年拟定了“灵巧传感器网络通信”计划,该计划主要是在战场上部署传感器网络,来提高战士对战场态势的感知和把握能力,利用传感器采集并传输信息,然后把信息传送到数据融合中心,生成战场全景图;2003 年,美国国家自然科学基金委就投入巨资,来支持无线传感器网络的有关研究计划;英特尔公司致力于 WSN 在预防医学、行星探测、森林灭火等领域的应用,INTEL 公司和加州大学伯克利分校联合成立“智能尘埃”实验室;欧盟为解决无线传感器网络的体系结构和相关智能算法的实现,提出了无线自组织和能量高效协作的无线传感器网络,以使节点能够完全智能化地协作工作。几乎所有美国的著名大学都有研究小组从事 WSN 的研究工作。此外,如英国、法国、德国、日本、韩国等国的高校和科研机构,也加入了对 WSN 相关技术研究的行列。

在我国,无线传感器网络的研究受到了很高的重视,相关的研究与发达国家同步启动。国防科技大学、清华大学、哈尔滨工业大学、浙江大学、中国科技大学、中科院上海微系统研究所、软件研究所、自动化所等单位在国内相继展开了对无线传感器网络的研究,从 2004 年起,更多的高校和科研机构加入了 WSN 的研究队伍中。1999 年,中科院在《知识创新工程试点领域方向研究》的“信息与自动化领域的研究报告”中,将无线传感器网络列为该领域的五大项目之一;国家自然科学基金委员会从 2002 年起,针对 WSN 理论研究,投入了大量资金;2009 年 11 月,国务院批复《关于支持无锡建设国家传感网创新示范区(国家传感信息中心)情况的报告》,在江苏无锡建立了“感知中国”中心,传感网的发展战略从而上升至国家层面,并正式进入具体实施阶段;2010 年,无线传感器网络作为国家重点发展的产业被列入“十一五”发展规划中;2012 年,工信部发布的《“十二五”物联网发展规划》指出我国将在 2015 年,在无线传感器网络的感知、传输、处理和应用等核心技术研发中,力争取得 500 项以上重要科研成果。在 2006—2020 年“国家中长期科学和技术发展规划纲要”中,WSN 的研究得到了国家层面的高度重视,在纲要中列入了大量与 WSN 相关的研究项目。

1.2.2 水下传感器网络研究现状

海洋是人类赖以生存和经济可持续发展的不可或缺的基地,目前,世界各国

对海洋经济和海洋权益日益重视。陆地无线传感器网络的飞速发展,为实现低成本、性能可靠的水下无线传感器网络的研究提供了优越的条件。水下传感器网络(Underwater Wireless Sensor Networks, UWSN)是由部署在监测区域的大量水下传感器节点,自组织形成的多跳无线网络。UWSN的研究始于20世纪90年代,它能为促进海洋资源勘测、海洋环境管理、灾害监测、海上作业和海洋军事活动提供良好的设备支持和信息平台,得到世界各国的政府部门、军事部门、高校和科研机构的高度关注,多项有关UWSN关键技术的项目得到了资助^[22-24]。

1998年,美国海军研究局和空海战系统中心的“海网(Seaweb)”,就做了真实环境下的水下组网实验,来验证水下声学通信,该项目主要应用于控制、导航以及近海区域军事监控等方面;2005年,美国海军开发了持久性沿岸海底监测网,该系统由固定在海底的传感器节点和移动传感器节点组成半自治控制网络,节点之间可以互相通信,也可做一些简单独立的决策;2008年,美国国防高级研究计划局推出了“水下飞机”项目,对该“水下飞机”的研发要求是,要具备海上巡航、空中飞行和水下隐身等能力;NOPP和NSF资助的“环境采样处理机”项目是一个多学科交叉项目,它集成了微生物、分子探测和自动化等技术,用来检测水体质量;2009年,美国国家科学基金会与海洋发展领导联盟就海底观测网络的建设签署了协议,建立一个用于观测复杂的海洋过程的海洋观测站,2013年,该站接收到了第一组数据,系统在2015年进行了试运行。欧洲的ESONET计划,在大西洋和地中海设立了10个监测站点,对海底提供长期的组网监测能力,为地球物理学、生物学、生物化学等学科的研究工作提供数据支持。日本东京大学用光缆和电缆连接组网,构建了海底监测网络ARENA。

我国在“八五”期间就开始针对水声通信进行研究。在“十五”和“十一五”期间,国家自然科学基金委就把UWSN的核心技术的研究列入了重点资助项目。我国目前对水下传感器网络尚处于起步阶段,研究成果还比较少。2010年,天津大学召开了水下滑翔机及自主式水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)技术发展研讨会,针对863计划海洋技术领域的水下滑翔机及AUV技术方向及未来发展展开了讨论。2015年,解放军信息工程大学于宏毅研发团队采用光学与电学协同的处理办法,在可见光空间通道互干扰高效抑制等关键技术方面取得了重大突破,实时通信速率提高至50Gbps(比特每秒),可见光通信是利用半导体照明实现数据高速传输的技术,可见光通信技术的突破,实现了“有