

无线传感网

Wireless Sensor Networks

可靠传输的关键技术研究



陈 昊 © 著

数据是无线传感网部署的目标，

数据的可靠传输

是保障应用需求的必要手段。



电子科技大学出版社

无线传感网

Wireless Sensor Networks

可靠传输的关键技术研究

陈 昊 著



电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

无线传感网可靠传输的关键技术研究 / 陈昊
著. -- 成都: 电子科技大学出版社, 2018. 1
ISBN 978-7-5647-5535-5

I. ①无… II. ①陈… III. ①传感器—无线
传输技术 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 010557 号

无线传感网可靠传输的关键技术研究

陈 昊 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 河南承创印务有限公司

成品尺寸 170mm × 240mm

印 张 7.75

字 数 121 千字

版 次 2018 年 1 月第一版

印 次 2018 年 1 月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-5535-5

定 价 30.00 元

版权所有,侵权必究

前言

无线传感网作为多学科交叉的一个研究方向,已获得了国内外众多学者的关注。随着研究的深入和相关技术的发展,无线传感器网络被广泛地应用到各个领域,并表现出巨大的潜力。可靠传输机制是无线传感网的研究热点之一。数据的可靠性对于各类应用至关重要,如在长期的监测类应用中,完备的数据可为应用提供决策依据与数据支持。因此,数据源节点感知并产生的数据作为无线传感网部署的目标,必须被可靠地传输到汇聚节点。而无线传感网采用无线通信方式,无线链路质量不稳定、无线通信的竞争本质与网络纯分布的特征等因素都将导致数据包丢失,影响数据传输的可靠性。

实现数据的可靠传输面临着无线信道不稳定、实时网络状态不可用、资源有限等挑战。为最大力度地保障数据传输的可靠性,除了在传输层设计可靠传输协议外,还应与其他网络层协作,考虑 MAC 层、路由层与数据可靠性保障间的关系,对无线传感网的可靠传输机制进行研究。

本书以陕西明长城健康监测为应用背景,结合国家自然科学基金“土遗址保护无线传感器网络检测与信息融合”项目、国家科技支撑“长城保存状态智能感知关键技术研究”项目的需求,对无线传感网可靠传输面临的挑战和已有研究成果开展了深入分析,重点关注信道准入策略、流量控制策略、可靠路由策略和可靠传输机制这四个与可靠传输密切相关的研究点,从 MAC 层、路由层和传

输层对数据可靠传输的影响入手, 权衡不稳定的无线信道、时变的网络状态与资源受限的节点间的关系, 研究无线传感网的可靠传输机制。具体成果总结如下。

(1) 数据的高效接入机制是提高数据可靠传输的有效途径。本书在现有研究工作的基础上, 结合排队机制与多信道技术, 提出了 QMMACP 协议。该协议将传输信道分为控制信道和数据信道, 控制信道用于发送 probe 等控制包, 数据信道用于发送数据包。采用多个带外的忙音信号来保护 probe 包和数据包的传输, 当 probe 被成功接收、数据信道被占用, 同时队列未滿时, 数据流 ID 进入队列等待, 期间不再发送探测信号, 避免了 RTS 包重复发送, 提高了信道利用率。仿真结果表明, 接收节点只需添加少数几个忙音信号就可以实现信道的预约, 有效地降低了冲突概率, 提高了数据传输的可靠性。

(2) 流量控制是避免数据溢出与网络拥塞, 保障传输可靠性的有效方法。无线通信的竞争本质使得每个节点均基于自己的需求争用无线信道, 当有数据需要发送时会根据退避窗口大小随机选择一个退避时间延迟发送。然而, 每个节点仅有网络的局部视图, 无法根据全网负载自适应地进行流量控制。因此, 本书提出了 BABNS 算法, 根据网络状态自适应地对退避窗口参数进行设置, 可以对网络中实时的数据传输量进行控制, 能够有效避免网络拥塞, 降低丢包率, 提高传输可靠性, 最终使得 sink 节点接收到的数据包数量最大化, 即吞吐量最优。

(3) 数据收集是监测类应用中的主要任务, 将数据由感知节点可靠地传输到汇聚节点, 可靠有效的路由机制是根本保障。本书基于长城应用中网络部署在带状区域的特点, 结合机会路由思想, 研究了最优转发候选集的确定策略, 提出了用以解决直线带状区域的候选集选择的 SLS 算法和 S^3 算法, 以及一个改进的适用于转弯带状区域的 TS^3 算法。同时, 提出了 ROR 协议(一种新颖的基于传输方向的无线传感网路由机制), 可以有效地解决带状等特殊地形网络可靠数据转发时所面临的挑战。理论分析和仿真实验表明, 该协议能够在预期的传输可靠性下实现最小化网络通信代价和最大化网络生命周期。

(4)无线信道的不可靠导致无线传感网中数据包的丢失。重传所丢失的包是保障数据传输可靠性的有效方法。然而,传感器节点的能量极其受限,故必须在传输可靠性与能量有效性之间寻求折中。本书基于传感网中数据传输及能量消耗的特征,将节点划分为近源与近 sink 节点,结合链路质量及节点能量状况动态确定数据包的缓存位置,提出了 RTPSC 协议。仿真及理论分析表明,该协议能兼顾数据可靠传输和能耗两方面。

(5)针对大型土遗址保护的需求,设计并实现了一个大型土遗址监测传感网原型系统,验证了本书提出的部分协议。

目 录⁺

第1章 绪 论

1.1 无线传感网概述	002
1.1.1 无线传感网	002
1.1.2 无线传感网的特点	003
1.1.3 无线传感网的应用	004
1.1.4 国内外研究现状	005
1.2 无线传感网的可靠传输	007
1.2.1 研究意义	007
1.2.2 研究现状	009
1.2.3 可靠传输面临的挑战	011
1.3 本书研究成果	012
1.4 全书组织	013

第2章 基于信道接入的可靠传输保障策略

2.1 引 言	015
---------------	-----

2.2 研究现状 016

2.3 基于队列的多信道接入策略 022

2.3.1 问题描述 022

2.3.2 协议描述 023

2.4 性能分析与仿真 026

2.4.1 性能分析 026

2.4.2 仿真与分析 029

2.5 本章小结 032

第3章 基于网络状态的实时流量控制策略

3.1 引言 033

3.2 研究现状 033

3.3 吞吐量最优的退避策略 037

3.3.1 问题描述 037

3.3.2 协议描述 037

3.4 仿真与分析 040

3.4.1 仿真环境 040

3.4.2 仿真结果 041

3.5 本章小结 043

第4章 大规模带状传感网的可靠路由机制

4.1 引言 044

4.2 研究现状 046

4.2.1 可靠路由 046

4.2.2 机会路由 047

4.3	高可靠性保障的机会路由策略	049
4.3.1	问题描述	049
4.3.2	带状区域层划分算法	050
4.3.3	机会路由机制(ROR)	059
4.4	仿真与分析	059
4.4.1	仿真环境	059
4.4.2	性能评价标准	060
4.4.3	仿真结果	060
4.5	本章小结	075

第5章 基于机会缓存的可靠传输策略

5.1	引言	076
5.2	研究现状	076
5.3	缓存位置可调的可靠传输策略	078
5.3.1	问题描述	078
5.3.2	协议描述	079
5.3.3	正态分布的数据包缓存模型	079
5.4	性能分析与仿真	080
5.4.1	性能分析	080
5.4.2	仿真与分析	084
5.5	本章小结	086

第6章 大型土遗址监测传感网原型系统设计与实现

6.1	引言	091
6.2	大型土遗址监测传感网原型系统	092

6.2.1 系统概述 092

6.2.2 系统构成 093

6.2.3 系统设计 095

6.3 大型土遗址监测传感网原型系统的应用 096

6.3.1 QMMACP 协议在原型系统中的实现 096

6.3.2 RTPSC 协议在原型系统中的实现 099

6.4 大型土遗址监测传感网原型系统的应用效果 101

6.5 本章小结 102

参 考 文 献 103

第 1 章

绪 论

无线传感器网络简称无线传感网(Wireless Sensor Networks, WSN),是当前在国际上备受关注的、多学科高度交叉的、应用广泛的前沿热点研究领域^[1]。无线传感网技术被认为是 21 世纪最重要的技术之一,将对人类的生活方式产生巨大的影响。2008 年,美国《福布斯》指出未来的无线传感网要比现在的 Internet 大得多,无线传感网正由高科技概念逐步走向大规模应用,它的发展和广泛应用将对人们的社会生活和产业变革带来极大的影响,并产生巨大的推动力^[2]。

作为一种全新的信息获取和处理方式,传感网受到了国内外学术界和工业界的高度重视。1998 年,美国国防部提出“智能尘埃”的概念,最先开始了无线传感网技术的研究,主要应用于军事领域。2009 年 1 月,IBM 首席执行官彭明盛首次提出“智慧地球”的概念。2009 年 2 月,奥巴马签署生效的《美国恢复和再投资法案》提出要在智能电网投资 110 亿美元、卫生医疗投资 190 亿美元、教育信息技术投资 6.5 亿美元,这些投资都与无线传感网技术相关,是奥巴马政府推动经济复苏和塑造国家竞争力的重点^[2]。2009 年惠普公司的“地球中枢系统”(Central Nervous System for the Earth, CeNSE)旨在创建新的信息生态系统所需技术的数学和物理基础,预计将在全球范围内安装一万亿个微型传感器。

我国无线传感器网络及其应用研究几乎与发达国家同步启动,首次正式出现于 1999 年中国科学院《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。其初步具备了一定的技术、产业和应用基础,呈现出良好的

发展态势。我国 2010 年远景规划和“十五”计划中都将无线传感网列为重点发展的产业之一。在这些项目的支持下,许多高校和科研机构纷纷开展有关无线传感网的理论研究和应用实践,取得了一系列的研究成果。

1.1 无线传感网概述

1.1.1 无线传感网

构成无线传感网的基本单元是无线传感器节点,这些节点具有无线通信模块、传感器模块、数据处理模块和电源模块,具有感知、计算和通信能力,它们以自组织的方式构成无线网络。网络中的传感器节点通过一定的节点休眠调度策略不间断地监测指定区域的各种对象,采集数据,与其无线通信半径内的邻居节点以多跳的方式将感知的信息传送至汇聚节点。汇聚节点对接收到的信息进行分析,根据预设的策略对各节点发送命令。

一个典型的无线传感网的体系结构如图 1-1 所示,包括传感器节点、汇聚节点(即 sink 节点)、通信网络和监测中心。传感器节点随机或有规律地部署在监测区域,以多跳自组织的方式组成网络。sink 节点负责对传感器节点发来的数据分类汇总,通过通信网络将数据传至监控中心^[1]。

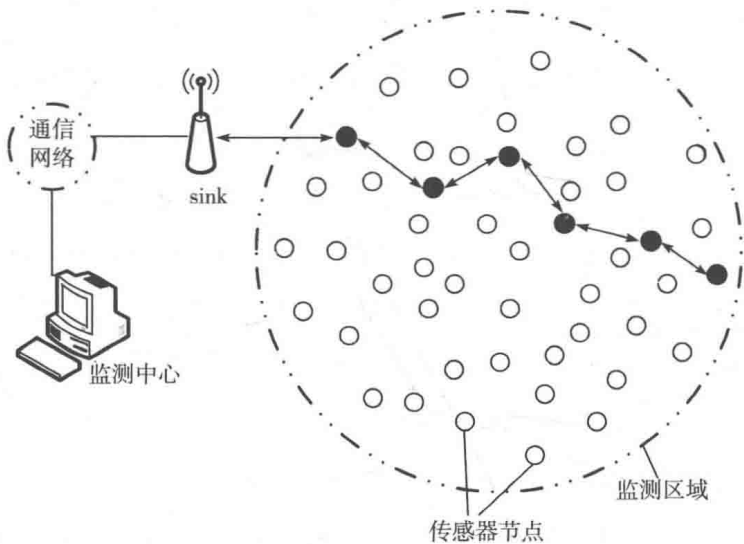


图 1-1 典型的无线传感网体系结构

1.1.2 无线传感网的特点

无线传感网不同于 Ad Hoc 网络,其设计目标、要求和应用需求有以下几个特点。

(1) 大规模性与自适应性

为获取准确的信息,监测区域常部署大量传感器节点。其优点在于,大量的传感器节点同时采集数据,可以提高监测的精度,降低对单个节点的依赖,大量冗余节点的存在可以提高系统的容错性能。此外,监测区域内的节点自组织成网络,网络一旦形成,外界很少干预其运行,相应的通信协议必须具有自适应性^[1]。

(2) 资源有限

传感器节点的能量、通信能力、存储能力和计算能力都非常有限。网络中的节点具有体积小、重量轻的特点,因此运算器、存储器的处理能力和存储容量都十分有限。节点由电池供电,不可避免地存在节点失效的情况。因此,必须合理利用节点的能量,使节点的计算和通信的工作量最小化,最大化网络的生命期^[3]。

(3) 网络动态性强,安全性弱

随着无线传感网中节点的失效或新节点的加入,网络的拓扑结构会随之动态变化,同时,节点的休眠调度等策略也会导致网络拓扑发生改变。此外,由于节点数量大且采用无线通信和分布式控制,因而容易被攻击,需要特别考虑安全策略。

(4) 以数据为中心的网络

对观察者而言,关注的是观测区域内采集到的数据,而无须了解数据是由哪个或哪些节点感知到的。因此,无线传感网有别于以地址为中心的 Internet,是一个以数据为中心的网络。

(5) 应用相关

无线传感网是面向应用的网络,关注对用户需求的执行和反馈,其网络资源分配、节点组织方式与信息交互方式需要与任务需求相适应,而不是关注网络质量的通信系统。

1.1.3 无线传感网的应用

随着微电子技术的发展,微处理器的体积不断缩小,价格日益下降,使得无线传感网的广泛应用成为可能。目前,在土遗址保护监测^[4-7]、环境监测^[8]、城市交通^[9]、目标跟踪^[10]、智能家居^[11]、军事侦察^[12]、野生动植物保护^[13]等多个领域有着广泛的应用。

(1) 土遗址保护监测

土遗址材质源于夯土,经过千百年环境的侵蚀,其中的很大部分面临垮塌毁灭的危险。研究表明,自然环境是造成土遗址基体受损的主要原因,对土遗址状态影响巨大。无线传感网监测系统能够协作采集网络区域内环境或监测对象的多样信息并进行综合处理,实现动态监测,可以及时发现由于自然环境及外力导致的形变、下沉等隐患,这些细微的变形、裂缝可能导致土遗址的坍塌、毁灭,通过调节环境及人为干涉进行预防性保护。

(2) 环境监测

环境监测系统是无线传感网的典型应用场合。随着人类对环境日益关注,环境监测人员需要实时获得大量监测区域数据,进行有效的分析和预测。由于监测区域环境的复杂,可能出现极其恶劣、有毒或有害的情况,现场采样会损害监测人员的健康,另外现场采样-实验室分析的方式存在较大的数据分析延迟问题,不能对环境情况进行实时分析和预测。无线传感网技术的应用实现了对环境信息的实时采集、监测、处理和分析预测,同时提高了环境监测效率与安全性。无线传感网的应用使得在野外恶劣环境中随机、实时获取数据成为可能^[14]。

(3) 智能家居

智能家居是指在小区内部宽带网络已经普及的基础上利用小区内部的网络环境搭建的以家庭为单位的控制系统,其目的是为住户提供以住宅为平台,兼备网络通信、信息家电、设备自动化,集系统、服务、管理于一体的高效、舒适、安全、便利的居住环境。具体实现为在家具、家电中嵌入传感器芯片,使它们与网络互连,通过一定媒介构成与外界的通信通道,利用语音与远程遥控技术监

测控制家庭范围中家具与电器的状态。

(4) 军事侦察

军事应用是无线传感网最早应用的领域。无线传感网具备随机部署、自组织、无须人工干预的特点,非常适合监视作战区域,能够对敌方兵力、武器、作战环境进行实时监控,同时能实现目标定位与追踪,为战略决策提供准确有效的依据。

(5) 野生动植物保护

近年,由于环境的恶化,人类的乱捕滥猎以及人类活动范围的不断扩大,野生动植物生存环境受到愈来愈严重的威胁。据世界《红皮书》统计,20 世纪有 110 个种和亚种的哺乳动物以及 139 种和亚种的鸟类在地球上消失了。近年来,全世界每天有 75 个物种灭绝,每小时有 3 个物种灭绝。由此推算,在未来 50 年中,地球陆地上四分之一的动物和植物将遭到灭顶之灾。各种野生动植物的生存正在面临着各种各样的威胁,针对野生动植物保护展开野生动植物行为规律的研究越来越迫切。无线传感网在大范围野生动植物监测中极具优势,研究者可以在不干扰动植物正常生活的情况下,长期、实时、协作地采集监测区域环境和野生动植物活动信息。

(6) 其他应用

无线传感网还可以应用于其他一些领域,包括智能电网、农业灌溉自动化控制、药品管理、远程医疗、预警监测和紧急救援等。2004 年,文献[15]研究运用无线传感网技术监测厄瓜多尔中部的 Tungurahua 火山,通过对振动传感器采集到的数据进行分析判断火山的活动情况。文献[16]研究运用无线传感网技术实现洪水预警。

1.1.4 国内外研究现状

目前,针对无线传感网的研究已进入面向应用的整体解决方案阶段,侧重于对节点群体行为的研究,如跨层协同设计、能量管理与优化调度、服务质量保障、网内信息处理等^[2]。具有代表性的计划有美国的“智慧地球”、日本的“u-Japan”、韩国的“IT839”和中国的“感知中国”。

(1) 国外研究现状

2003 年,美国科学基金委员会制订了无线传感器网络研究计划,领域涉及智能感知有毒化学物品、生物攻击等的传感器节点,分布式环境下传感器网络的特性等问题。2005 年,对系统和网络技术的研究计划中,主要探讨下一代高可靠性、高安全性的可扩展网络,以及可编程的无线网络和传感器系统的网络特征,资助金额高达 4000 万美金。2007 年美国国家自然科学基金会(NSF)资助的 CitySense 项目,监控城市的天气和环境污染,目标是打造世界上第一个能够在整个城市范围内实时传送传感器数据的无线网络。除此之外,美国能源部、交通部、国家航空航天局也相继启动了相关项目的研究工作。在美国,几乎各大著名院校都有相关的研究小组,专门从事无线传感器网络的相关技术研究。哈佛大学^[17]、麻省理工学院^[18]、加州大学伯克利分校^[19]、康奈尔大学^[20]等在无线传感器网络研究领域的成绩较为突出。英国、加拿大、意大利、日本和德国等国家的科研组织也相继展开了对无线传感器网络内容的研究。欧洲联盟的 France Telecom、Philips、Ericsson、Siemens 等公司,日本的欧姆龙、NEC、OKI 等公司也对无线传感器网络进行了深入讨论。

(2) 国内研究现状

我国非常重视无线传感网的研究和发展,国内的许多科研机构,如中科院计算所^[21]、清华大学^[22]、哈尔滨工业大学^[23]、北京大学^[24]、国防科技大学^[25-26]、浙江大学^[27]、复旦大学^[28]、北京航空航天大学^[29]、北京邮电大学^[30]等,从 2002 年开始在传感器数据管理系统、时间同步和定位方面展开了深入的研究工作。西北大学在此方面也开展了一系列工作,对嵌入式无线传感器网络节点、无线传感器中的定位等技术进行了探讨。与此同时,大量的企业也逐步开始关注无线传感器网络技术的发展,推出了多种针对无线传感器网络的解决方案。

最近几年主要的项目有 2008 年工信部资助的多个企业、高校和研究所共同参与的“新一代宽带无线移动通信网”重大专项,目标是研制具有海量通信能力的新一代宽带蜂窝移动通信系统、近距离无线互联系统与传感器网络,加大科技成果的商业应用。2010 年科技部资助的国家重点基础研究发展计划项目

(即 973 项目),以无线传感网关键核心技术及重点产品的研发和产业化为重点,开展重点领域的应用示范和推广,以促进传感网在环境监测、智能家居、工业控制等领域的应用^[2]。2010 年,正式获准立项由我国参与主导提出的传感器网络协同信息处理国际标准,在同一年,全球首颗二维码解码芯片由我国企业研制出,研发的光纤传感器具有国际领先水平。2011 年众多高校和研究所承担的国家“863 计划”“三网融合演进技术与系统研究”,以自主创新为核心,引领和支撑三网融合发展、推动国家信息化、培育战略性新兴产业。2012 年打造的京杭运河无锡段的“智能航道”,使无锡段畅通度提高了 80%,事故率降低 11%,船舶最大吨位从 500 吨提高到 1000 吨。

上述无线传感网的应用研究主要集中在全网数据的传输、传感器节点的定位、全网的拓扑管理、节点间的协作处理,以及软硬件的设计与制造。其中,所监测到的数据可靠传输是保障应用需求的前提,因此,可靠传输是目前关注度极高的研究热点。

1.2 无线传感网的可靠传输

1.2.1 研究意义

数据是无线传感网部署的目标,数据的可靠传输是保障应用需求的必要手段。Holger Karl 在 *Protocols and Architecture for Wireless Sensor Networks* 一书中认为数据可靠传输是保障无线网络服务质量最重要的因素。相对于时延、吞吐量、信道利用率等,数据的可靠性在某些应用中更为重要。例如,在野生动物保护监测系统中,长期的监测数据对于动物的生活习性研究和运动轨迹分析才是有意义的,因此,所有源节点感知并采集的数据必须被可靠地传输到动物保护中心,以便动物保护人员对动物实施保护及研究。在大型土遗址保护监测系统中,如陕西明长城,为评价其健康状态并提供决策依据,所有感知到的数据必须被可靠地传送到 sink 节点,为历史遗迹的演进提供数据支持。此外,无线传感网的预警系统、智能交通、军事侦察等都需要数据的可靠传输。

数据可靠传输是指源节点感知并采集到的数据应正确传输到 sink 节点。