

无线传感器网络 MAC协议分析与实现

杨志军 谢显杰 丁洪伟 著



科学出版社

无线传感器网络 MAC 协议 分析与实现

杨志军 谢显杰 丁洪伟 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

作为一种获取信息的新型技术,无线传感器网络已成为网络研究的热点。在无线传感器网络中,媒体接入控制层是影响网络运行的关键技术,它不仅决定着无线信道中资源的分配情况,影响着网络中各节点所携带的有限能源的使用,与此同时还必须满足网络动态变化以及一些突发业务的需求。本书在分析研究已有的无线传感器网络 MAC 协议基础上,对 MAC 协议的轮询控制机制进行研究。一直以来轮询系统特性的精确解析是 MAC 协议研究的难点,尤其是对其二阶特性的精确解析,其过程相当复杂且难度非常大。本书采用嵌入式 Markov 链和概率母函数的分析方法对无线传感器网络轮询系统进行研究,分别精确分析了基本的轮询系统、区分忙/闲环的并行调度轮询系统、非对称完全轮询服务系统、区分优先级的双队列多服务台排队系统、两级优先轮询系统等。并在此基础上开展对系统的实施进行研究,采用无线传感器网络操作系统 TinyOS 以及 FPGA 来进行新系统的实现,在实现过程中对 MAC 帧结构、轮询控制流程等都做了详细的设计,以求用实际的应用场景来验证无线传感器网络的 MAC 协议轮询控制系统的分析结果,并对比分析各类轮询系统的优劣性。

本书适合计算机类、通信类、信息类等专业的高年级本科生和研究生,以及相关领域的科研人员及工程师学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络 MAC 协议分析与实现/杨志军,谢显杰,丁洪伟著. —北京:科学出版社,2018.12

ISBN 978-7-03-059436-5

I. ①无… II. ①杨… ②谢… ③丁… III. ①无线电通信-传感器-计算机网络-研究 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 254013 号

责任编辑:胡庆家 钱 俊 孔晓慧/责任校对:彭珍珍

责任印制:吴兆东/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 12 月第 一 版 开本:720 × 1000 B5

2018 年 12 月第一次印刷 印张:13 1/2

字数:270 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



杨志军，1968年生，博士，研究员，云南大学信息学院硕士生导师，云南省教育科学研究院副院长，被授予“云南省技术创新人才”，中国教育技术协会信息技术教育专业委员会常务理事，中国教育学会中小学信息技术教育专业委员会理事，云南省教育体制改革咨询委员、教育信息化专家委员会成员，云南省计算机科学与技术专业教学指导委员会副主任。1990年毕业于浙江大学计算机系，2008年成为云南大学信息类专业的首名博士。

曾到美国乔治·华盛顿大学作为访问学者和瑞典参与国际项目。长期以来致力于无线网络、轮询控制系统和教育信息化等研究工作，编撰了《云南省教育信息化发展规划（2013—2015）》，主持制订了《云南教育数据中心建设方案》等。同时，结合实践在信息技术领域开展深入研究，参与国家高技术研究发展计划（“863”计划）项目一项，主持国家自然科学基金项目一项，参与三项。工作和研究过程中取得了一系列成果，在《电子学报》《Tsinghua Science and Technology》（《清华大学学报》）《中国电化教育》等国内外核心期刊及会议上发表论文三十多篇，其中二十多篇被SCI、EI收录，出版专著两部。作为主持人，2013年获云南省科学技术奖自然科学奖二等奖，2015年获云南省信息通信科学技术奖三等奖和云南省教育科研成果奖三等奖，2017年获中央军委军队科学技术进步奖三等奖。

前 言

无线传感器网络 (WSN) 是现阶段国际领域颇受重视的多学科交叉热点学科, 无线传感器网络实现了数据采集、处理和传输等多方面的功能, 其使用的传感器节点存在着重量轻、体积小和功率低、无人值守等一系列良好的特性, 因此拥有良好的发展前景, 尤其是在军事、环境监测、健康护理、城市交通、仓储管理等领域发挥出了非常积极的作用。而无线传感器网络多路访问控制 (MAC) 协议不仅决定着无线信道中资源的分配情况, 还影响着网络中各节点所携带的有限能源的使用方式, 能够对动态变化以及一些突发业务的需求提供帮助, 因此许多研究人员专注于对无线传感器网络 MAC 协议的研究。

1999 年, 在中国科学院发布的《信息与自动化领域研究报告》中, 其中“知识创新工程试点领域方向研究”强调了未来我国在此领域的技术发展, 提出无线传感器网络是这一领域建设的五大核心项目之一。2006 年初所颁布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》明确地提出了智能感知、自组织网络和 WSN 技术三方面的发展方向。2011 年工业和信息化部所提出的《物联网“十二五”发展规划》中把 WSN 视作发展的一项核心产业内容。现阶段, 国内在此领域的研究尚处于初级阶段, 商用还相当有限, 同时无法满足实用的需要, 所以我国在此领域的研究不仅面临着机遇, 更面临着一系列的挑战。

本书在分析研究传统无线传感器网络 MAC 协议的基础上, 针对轮询系统进行研究, 从三类最基本的轮询方式开始, 研究了区分忙/闲环的并行调度轮询系统、非对称完全轮询服务系统、区分优先级的双队列多服务台排队系统、基于 TinyOS 的区分优先级轮询系统、基于现场可编程门阵列 (FPGA) 的区分优先级混合服务两级轮询系统。针对不同的轮询系统, 先通过分析研究系统的数学模型, 能够得到系统的平均排队队长、平均查询周期、平均等待时间等系统关键参数理论值, 再在仿真平台 MATLAB、实际环境应用平台 TinyOS+CC2538、FPGA 上进行实验研究, 以证明建模分析的可行性, 以及各类模型的优劣情况。希望此书对 MAC 协议、轮询系统的深入分析研究能够为读者在研究无线传感器网络领域提供理论和现实意义的借鉴。

全书由 7 章组成: 无线传感器网络 MAC 协议概述、无线传感器网络 MAC 协议基本轮询系统模型、区分忙/闲环的并行调度轮询系统分析研究、非对称完全轮询服务系统研究、区分优先级的双队列多服务台排队系统研究、基于 TinyOS 的无线传感器网络 MAC 协议分析研究、基于 FPGA 的区分优先级混合服务两级轮询

系统分析研究。

苏杨、丁阳洋、路秀迎、陈传龙、熊家龙、张伟锋和任杰对本书的编写给予了大力支持，并提供了实验分析，在此表示衷心感谢。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目“无线网络中轮询控制系统分析与改进的研究”(项目批准号: 61461054) 和“融合式多址通信网络理论与控制协议研究”(项目批准号: 61461053) 的支持。

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

作 者

2018 年 5 月

目 录

前言

第一章 无线传感器网络 MAC 协议概述	1
第一节 无线传感器网络简介	1
一、无线传感器网络体系结构	1
二、无线传感器网络的特性	2
三、无线传感器网络的主要应用	4
第二节 无线传感器网络 MAC 协议简介	5
一、无线传感器网络 MAC 协议设计原则	6
二、无线传感器网络 MAC 协议研究现状	7
第二章 无线传感器网络 MAC 协议基本轮询系统模型	16
第一节 基本轮询系统模型	16
第二节 门限服务系统	17
一、平均排队队长	18
二、平均查询周期	18
三、平均等待时间	18
第三节 完全服务系统	19
一、平均排队队长	19
二、平均查询周期	19
三、平均等待时间	20
第四节 限定 ($k = 1$) 服务系统	20
一、平均排队队长	20
二、平均查询周期	21
三、平均等待时间	21
第五节 三种基本的轮询服务系统性能的分析 and 比较	21
本章小结	23
第三章 区分忙/闲环的并行调度轮询系统分析研究	24
第一节 区分忙/闲环的并行调度轮询系统模型	24
一、系统模型分析	24
二、平均排队队长	27
三、平均查询周期	27

四、平均等待时间	28
五、数值理论分析及实验分析	29
六、改进后模型与单一门限服务的比较	38
第二节 区分忙/闲节点的无线传感器网络轮询控制机制研究	43
一、帧的设计	44
二、接入控制过程描述	45
三、区分忙/闲环的并行调度轮询控制的调度机制	48
四、实验分析	50
五、模型的电池损耗节能分析	56
本章小结	58
第四章 非对称完全轮询服务系统研究	59
第一节 非对称完全轮询服务系统模型	59
一、数学模型的构建	59
二、仿真及实验分析	63
第二节 两级优先级非对称轮询服务系统研究	71
一、两级优先级非对称轮询数学模型	72
二、仿真实验及性能分析	80
第三节 非对称及区分优先级非对称轮询系统研究	87
第四节 基于轮询系统的数据采集方案	99
一、点对点通信实现数据采集的形式	99
二、轮询系统实现数据采集	102
本章小结	104
第五章 区分优先级的双队列多服务台排队系统研究	105
第一节 经典排队模型分析	105
一、经典排队论概述	105
二、两个重要分布	109
三、Little 定理	109
四、Markov 链	110
五、几种常见的排队模型	111
第二节 具有两种会话类型的多服务台排队系统分析	115
一、系统模型描述	116
二、模型分析	117
三、系统的稳态方程	118
四、不同会话类型的平均用户数和阻塞率	119
五、仿真实验分析	121

第三节 区分优先级的双队列排队系统分析	123
一、区分优先级的双队列单服务台排队模型分析	123
二、区分优先级的双队列双服务台排队模型分析	128
三、区分优先级的双队列多服务台排队模型分析	134
本章小结	143
第六章 基于 TinyOS 的无线传感器网络 MAC 协议分析研究	144
第一节 TinyOS 系统概述	144
一、TinyOS 的特点	144
二、TinyOS 体系结构	147
第二节 基于 TinyOS 的 MAC 协议设计	147
一、MAC 协议及文件组织结构	148
二、超帧结构	150
三、MAC 层帧结构	151
四、无线传感器网络轮询控制功能设计	156
第三节 基于 TinyOS 的轮询控制 MAC 协议实施	159
一、传感器节点的选择与结构	160
二、Cortex-M3 处理器简介	163
三、CC2538 内部及外围电路	164
第四节 基于 TinyOS 的无线传感器网络 MAC 协议实现	166
一、message_t 消息结构体	166
二、CC2538 射频通信实现	168
三、基于 TinyOS 的轮询控制功能实现	171
第五节 三类轮询控制系统实施研究	178
一、实施系统工作条件	178
二、三类轮询控制系统实施结果分析	179
第六节 基于 TinyOS 的区分优先级轮询控制系统模型研究	180
一、系统模型	180
二、平均排队队长分析	183
三、平均时延分析	185
四、区分优先级的轮询控制系统设计研究	185
本章小结	192
第七章 基于 FPGA 的区分优先级混合服务两级轮询系统分析研究	193
第一节 区分优先级的混合服务两级轮询系统模型	193
一、系统模型	193
二、平均排队队长分析	195

三、平均时延分析·····	196
第二节 基于 FPGA 的区分优先级混合服务两级轮询系统实现·····	197
一、信源模块·····	197
二、站点模块·····	197
三、控制模块·····	198
四、接收模块·····	199
五、系统实现及仿真分析·····	199
本章小结·····	201
参考文献·····	202

第一章 无线传感器网络 MAC 协议概述

第一节 无线传感器网络简介

无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSN) 是现阶段国际领域颇受重视的多学科交叉热点学科, 其融合了传感器、嵌入式、现代网络和分布式的处理方法, 可以利用各式各样的微传感器实现对监测对象的数据采集工作以及监控。作为一种获取信息的新型技术, 无线传感器网络已成为网络研究的一个热点。无线传感器网络能够实时性获取周围环境参量, 对所测数据进行分析 and 融合处理, 因此能够为人类研究物理世界提供一种新型的人与客观世界之间的交互方式。尤其是随着当今科学技术领域中传感器技术、无线通信网络、微机处理系统、信号处理和数据分析、超大规模集成电路等技术的不断发展, 无线传感器的发展在越来越多的领域中有巨大的应用价值和更为广阔的应用前景, 引起了国内外各领域研究机构的极大关注, 并且取得了越来越多的研究成果。在人们对其越来越深入的研究和更加广泛的应用热潮中, 无线传感器网络将会深入到人类生活的各个领域当中, 对人类的生

一、无线传感器网络体系结构

无线传感器网络主要包含传感器节点 (sensor node)、汇聚节点 (sink node) 和管理节点 (manager node)。图 1.1 为无线传感器网络体系结构, 如图所示, 当各节点被随机分布于所要监测的区域内并采用自组织的方法构成网络后, 传感器节点对周围的目标对象进行监测并定时将监测收集到的数据经由其他传感器节点按照特有的路由协议以逐跳的方式来进行传送。被监测收集的数据在到达汇聚节点的传送过程中可能要经过多个节点的有效处理, 最后再通过因特网 (Internet) 或卫星传送到管理节点。这样实现了用户借助于管理节点对各个传感器节点进行监测, 以便于对数据进行采集、分析和决策, 从而对传感器网络进行有效的配置和管理。

传感器节点在无线传感器网络中用来收集、转发监测到的信息。传感器节点基本结构如图 1.2 所示, 由传感器模块 (传感器、AC/DC)、处理器模块 (处理器、存储器)、无线通信模块 (网络、多路访问控制 (MAC)、收发器) 和能量供应模块四个部分组成, 其中传感器模块负责监测区域内信息的采集和数据转换; 处理器模块负责控制整个传感器节点的操作、存储及处理采集的数据和其他节点发来的数据; 无

线通信模块负责与其他传感器节点进行无线通信，交换控制消息和收发采集数据；能量供应模块为整个传感器节点的运行提供能量，其通常采用微型电池。

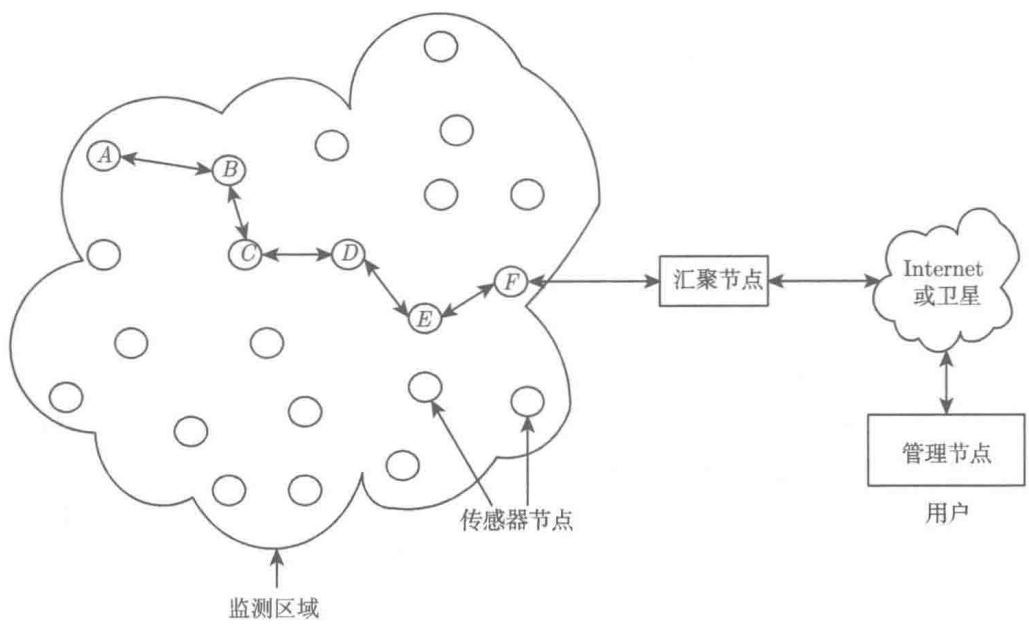


图 1.1 无线传感器网络体系结构

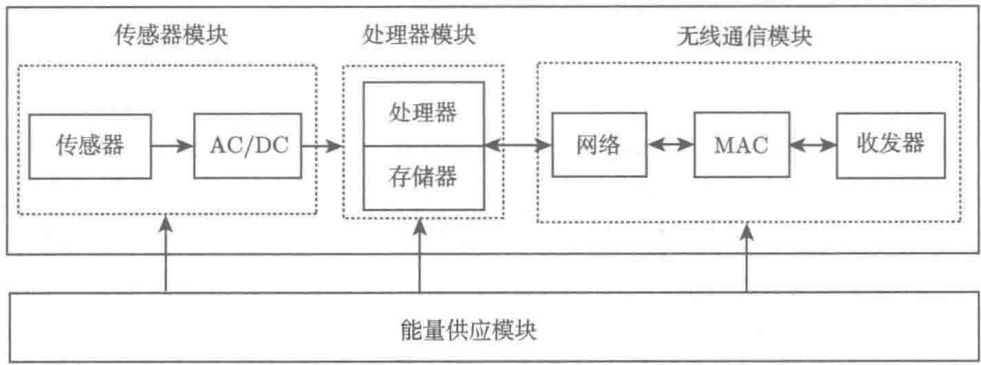


图 1.2 传感器节点基本结构

二、无线传感器网络的特性

无线传感器网络自身的特性决定了其与传统的网络技术有着明显的不同之处。无线传感器网络并非是现有的 Internet 技术和无线通信技术的简单叠加，它是对传统计算机网络的计算模式和设计模式的全面革新，有其自身的特点。

1. 节点数目巨多

由于受单个传感器节点通信能力、自身能量和数据处理等条件的限制，我们通

常需要把成千上万个传感器节点抛撒在监测区域, 以此使获得的信息具有很高的准确度, 此外大量节点能够增大覆盖的监测区域, 减少洞穴或者盲区。这种大规模性不仅体现为所要部署的区域很大, 还体现为在不大的区域内部署众多的传感器节点来获取该区域内更多维度的监测数据。随着部署节点规模的扩大, 可以尽可能多地覆盖到更多的监测区域。在提高监测精度的同时还可以降低单个传感器节点的精度要求。因为部署得非常密集, 所以存在很大的冗余, 还可以增强系统容错性。

2. 自组织网络

在传感器网络应用中, 无线传感器网络节点通常被随机抛撒到面积广阔的区域或随意放置到人不可到达的区域, 这些地方基本上没有基础设备。在这样的情况下, 我们无法知道节点的具体位置, 也不知道传感器节点之间的关系。这种情况下就需要传感器节点具有一定的自组织能力, 在被部署到我们很难到达的地方后可以自己进行管理, 形成一个可以自我监测并向外传送数据的自组织传感器网络。

3. 动态性网络

在实际应用中, 有时候一些传感器节点由于自身能量耗尽而失效, 有时候为了一些新的需求需要在传感器网络中加入一些特殊的节点或者由于外在原因一些节点位置发生变动, 这些因素都会导致网络拓扑结构发生变化, 这就要求无线传感器网络要能够适应这种变化, 具有动态的系统可重构性。

4. 网络的可靠性

因为传感器更适合工作在外界环境条件恶劣的地方, 在此种情况下传感器节点非常容易遭受人为或者自然的损坏, 所以传感器节点要足够坚固, 不易被破坏, 在恶劣的外界条件下能够正常工作。由于工作条件恶劣, 且部署的节点数量非常多, 网络的维护变得非常困难。为了避免采集到的信息被盗用, 整个网络的安全性和保密性也同样重要。因此整个网络硬件必须具有一定的可靠性。

5. 以数据为中心

无线传感器网络属于任务型网络, 单独地讨论传感器节点而不考虑传感器网络是没有意义的。因为节点是随机部署在监测区域内的, 所以传感器节点与节点的编号之间的关系并不是确定不变的, 而是动态的, 也就是说节点的编号与其所处的位置没有必然的联系。当我们通过传感器网络查询某一事件时, 不是通知某个确定的节点而是直接通知给传感器网络本身, 传感器网络在获取到与事件相关的消息后反馈给观察者, 所以传感器网络是一种以数据为中心的网络。

6. 网络的多跳路由

节点的通信距离一般为几十到几百米, 节点几乎只能和与它相邻的节点进行直接通信。如果要和其覆盖范围外的节点进行相互通信, 就需要中转节点进行路由。相比于固定网络通过网管和路由器来实现, 无线传感器网络则通过普通节点来

完成多跳路由。在这种情况下,每个普通节点不但可以作为信息的发送点,同时也可以作为中转点为其他节点转发信息。

7. 通信能力有限性

无线传感器网络的通信依赖于不同传感器节点间的无线链路,由于缺少固定的基础设施和中继节点,再加之功率和能耗均为传感器网络中的重要影响因素,单个节点到网络的通信能力和资源就变得相对有限和稀少。一般情况下,节点供电方式采取的是电池供电,在实际应用场合往往不能实现节点的电池更换或充电。所以一旦电池能量耗尽,该节点即失去作用。同时,传感器节点很容易受诸如高山、建筑物等地势地貌因素以及风雨雷电等自然因素的影响,从而无线通信性能较差,通信能力有限。

虽然与传统网络技术相比无线传感器网络自身的特点鲜明,但是传感器节点在实现网络协议时还是存在一定的约束性。首先,电池能量十分有限,因为传感器节点一般都是大批量部署在环境恶劣甚至是人很难接近的区域,此种情况下节点就要成本低廉并且在部署之后不能够更换电源,所以在通常情况下单个节点的体积小,本身只能携带很小的电池。节点能源消耗主要发生在发送、接收数据以及空闲监听三种状态,因此在设计传感器网络协议时,首先需要注意的就是,尽量减少不必要的信息收发,以及在无信息处理时尽早结束空闲监听进入睡眠状态。其次,受传输距离和能源消耗之间的关系影响(随传输距离的增大,能源的消耗会激增),以及障碍物和节点自身天线对信号质量的影响,单个节点的无线通信距离一般在100m内。最后,由于对传感器能耗和价格方面的要求,其自身所携带的处理器处理能力不会太强,并且存储空间也相对较小,所以有限的计算和存储能力也是对传感器节点完成各种任务的一种很大限制。

三、无线传感器网络的主要应用

根据无线传感器网络的应用,无线传感器网络可以分为两类:室内无线传感器网络和室外无线传感器网络。室内无线传感器网络可以部署在建筑物、房屋、医院、工厂等地,室外无线传感器网络可以用于战场、环境监测、森林火灾探测、气象或地球物理研究、洪水监测、环境的生物复杂性绘图、污染研究等。无线传感器网络的发展最初是由战场监视等军事应用推动的,随着科技的发展,无线传感器网络现在也被用于多种民用应用领域,包括环境和栖息地监测、医疗应用、家庭自动化和交通控制等方面。下面列举了一些无线传感器网络的应用。

1. 军事应用

在军事应用方面,无线传感器网络可以构成一个集军事指挥、控制、通信、计算、情报、监视、侦察和定位于一体的军事系统。如可以将传感器安装在每一个部队、车辆、装备和关键弹药上,传感器节点就会采集设备的状态数据,通过汇聚节

点进行收集并发送给数据中心,这样指挥官或领导人可以不断监测战场上装备和弹药的状况及可用性。除此之外,无线传感器网络可以结合到智能弹药的制导系统中,也可以用于攻击前或攻击后的战斗损伤评估等方面。

2. 环境应用

无线传感器网络的各种环境应用包括跟踪鸟类、昆虫等小动物的移动,监测环境影响作物和牲畜的条件,灌溉,行星探索,化学/生物检测,精准农业,海底、土壤和大气环境监测,森林火灾探测,气象或地球物理研究,洪水监测,环境的生物复杂性绘图和污染研究等方面。

3. 健康应用

通过远程监测人体生理数据、追踪和监测医院内的医生和病人,可以方便对医院进行管理。当然无线传感器网络也可用于卫生领域,其中比较典型的应用是可穿戴无线身体局域网 (WBAN),WBAN 由便宜、轻便和小型的传感器组成,可以实现长期隐藏式的动态健康监测,并即时反馈患者当前的健康状况和近乎实时地更新用户的医疗记录。这种系统可以用于各种条件下的计算机监督康复,甚至可以及早发现医疗状况。

4. 家庭应用

随着技术的进步,智能传感器节点和执行器可以无缝安装在家用电器中,如吸尘器、微波炉、冰箱和录像机。这些设备可以通过因特网或卫星与外部网络进行交互,从而使终端用户更容易在本地和远程管理家庭设备。传感器节点可以嵌入家具和设备中,并且可以互相通信,也可以与房间服务器进行通信。房间服务器还可以与其他房间服务器进行通信,以了解它们提供的服务,如打印、扫描和传真。

第二节 无线传感器网络 MAC 协议简介

无线传感器网络属于新兴技术,人们在此领域尚未创建起统一的规范。当前的网络技术规范,如 Ad Hoc 网络和轮询控制系统都不能够全面适应于无线传感器网络的实际需求,两者都强调低功耗的网络结构,然而其在工作模式方面存在着一定的区别。轮询系统的工作模式通过网络中的全部节点,把数据集中于汇聚节点,也就是多对一的通信方式,这使得其余节点之间的数据交换变得非常有限。Ad Hoc 网络和其他的部分传统无线网,如同“比特搬运工”,网络内的节点只是简单地使用存储、转发的方法来搬运数据,并不对数据进行实际的处理,对于无线传感器网络而言,网络仅实现信息分组的传输是不够的,需要对信息分组进行一定的处理,例如,在无线传感器网络中,当多个节点观测到相同事件发生时,其会分别给汇聚节点发送分组数据包,就汇聚节点而言,其仅需要能够获得其中的一个分组便可以,而其余的分组都是没有必要的。假若无线传感器网络当中的节点可以对相同信

息分组实现过滤和聚合,能够合理地降低由重复传送分组导致的能量耗损,这将会对网络起到优化的作用。另外,无线传感器网络中功能的达成和节点之间的数据交互关系密切,在网络结构规模不大的情况下,只需要针对特定的范围采集有限的数据,使用普通的 MAC 协议就能够良好地应对节点所面临的数据通信问题。然而伴随无线传感器网络功能领域的不断发展,在一些领域,传统的 MAC 协议已经无法满足人们的需求,比如手机实时语音、视频方面,对于时延有着较高的要求,较高的时延会带来很差的服务质量 (QoS),又比如数据中心采用的高精度温度监测,其网络当中的节点密度非常大时,节点相互干扰较大,同时在传输数据包的过程中往往会出现碰撞,如何有效地避免数据包传输过程中的碰撞问题也成了亟待解决的问题。现阶段大部分无线传感器网络 MAC 协议主要是通过竞争的方法实现信道访问,在网络的带宽相对较为有限、信道规模不大的情况下使用竞争的方法具备较为优秀的性能,然而在规模或是业务量有所提升的情况下,以竞争协议为基础的性能将会大幅降低。例如 S-MAC 协议,在网络数据规模不大的情况下,可以切实地降低节点的空闲侦听时长,由此减少能量耗损,而在数据规模较大的情况下,网络性能会由于数据包冲突而明显有所减弱,控制开销所造成的能耗代价要远超过节约的能耗,从而难以实现节能的目标。

在无线传感器网络中,MAC 协议决定无线信道的使用方式,为节点合理分配通信资源,避免多个节点同时使用信道发生碰撞冲突。MAC 协议处于无线传感器网络协议的底层,对网络的性能有较大的影响,MAC 协议决定着信道的利用率、网络的延迟性,最重要的是它决定能量的消耗。因此它是保证无线传感器网络高效通信的关键网络协议之一,成为无线传感器网络协议研究的热点。

一、无线传感器网络 MAC 协议设计原则

无线传感器节点在自身携带的能量、数据存储能力和通信距离等方面存在缺陷,单个节点功能也相对较弱。因此在设计 WSN MAC 协议时,我们应从以下因素考虑:

(1) 节省能量。无线传感器网络节点通常采用干电池作为电源为其工作提供能量,由于电源本身携带能量有限再加上无线传感器网络往往被抛撒在人难以到达的地方和节点数目众多,很难为它们更换电池或者充电。因此要在满足应用的前提下尽可能延长无线传感器网络的生命周期,节省能量是设计无线传感器网络 MAC 协议首要考虑的问题。

(2) 可扩展性和适应性。在实际应用中,一些传感器节点由于自身能量的耗尽而失效,还有时为了一些新的需求需要在传感器网络中加入一些特殊的节点或者由于外在原因一些节点位置发生变动,这些都会导致无线传感器网络的拓扑结构发生变化,所以 MAC 协议应该也具有扩展性以适应这种网络拓扑变化。

(3) 网络效率。网络效率主要包括网络的吞吐量、网络的公平性、带宽利用率以及实时性等。一个网络的生命周期的长短与能量的供养紧紧相连,给无线传感器节点提供能量的电池由于很难更换或者充电,所以在以上三个因素中节省能量成了设计 MAC 协议最重要的因素,其次为剩余的两个因素。

鉴于能量在无线传感器网络中的重要地位,为了更好地节省能量,提高网络的性能,我们需要知道在无线传感器网络中哪些因素导致了能量的浪费。在 WSN 中造成网络能量浪费的主要因素包括以下几方面:

(1) 在无线传感器网络中,由于节点之间传输信息时间的不确定性,为了不发生信息的丢失,节点会一直对其信道进行侦听,这种无效的侦听会浪费大量的能量。

(2) 在数据发送的过程中会出现一个节点同时接收到多个数据包的情况,数据包之间会发生冲突造成数据包的损坏,这时会造成两方面的能量浪费:发送和接收该数据的节点所消耗的能量;重发数据消耗的能量。

(3) 当节点发送数据给其目的节点时,在其通信范围内的其他节点也有可能接收到该数据,此数据对其来说是没有任何意思的,对这些无用信息的接收和处理会造成能量的浪费。

(4) 在 MAC 协议中,维护协议正常运行需要节点之间相互交换一些控制信息,而这些控制信息中没有包含有用的数据,因此这些信息的交换也损耗一定的能量。

(5) 有时候当节点向目的节点发送信息时,目的节点没有做好接收的准备,就会要求再次发送,这会造成能量浪费。

考虑上面列举的无线传感器网络中能量浪费的方面,有助于我们设计出更加节能的 MAC 协议。比如:为了减少无效的侦听带来的能量损耗,研究者提出了一种周期性的侦听/睡眠机制;为了减少数据冲突造成的能量浪费,提出了一种 RTS/CTS/DATA/ACK 握手机制。

二、无线传感器网络 MAC 协议研究现状

无线传感器网络最早是由美军提出的,同时被普遍投入军事实用层面,较为有名的有“战术远程传感器网络系统”“协同交战能力系统”。1994 年,加州大学的 William J. Kaiser 教授向美国国防高级研究计划局 (DARPA) 提交了 *Low Power Wireless Integrated Microsensors* 建议书,对无线传感器网络的建设和长效发展起到了里程碑式的标志性意义。1999 年,在美国召开的移动计算和网络国际会议提出 21 世纪将会是实现无线传感器网络持续发展的重要时代。在迈入 21 世纪之后,伴随微电子和无线通信技术的持续高速发展,无线传感器网络的研究在一系列领域均获得了相当大的发展。2003 年,美国《商业周刊》杂志也将其视作未来的四大高新技术之一。2004 年,美国政府提升了在此领域的研究力度和投入规模。2010