

大数据与网络安全研究丛书

面向低占空比无线传感器 网络的数据传输协议研究

史培中 葛春鹏 古春生 著
景征骏 钱 进 审



科学出版社

大数据与网络安全研究丛书

面向低占空比无线传感器网络的 数据传输协议研究

史培中 葛春鹏 古春生 著

景征骏 钱进 审

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以睡眠调度节能机制对无线传感器网络数据传输带来的影响和挑战为出发点,分析睡眠调度节能机制对数据聚集、多跳广播和端到端通信三种基本数据传输模式的影响,解决面向动态传送协作树的数据聚集时碰撞和干扰问题、面向周期性同步睡眠调度模式下的多跳广播问题、面向低功耗监听的异步睡眠调度模式下的多跳广播问题和面向异步睡眠调度模式下端到端时延控制问题,旨在为睡眠调度无线传感器网络的应用提供能效性的数据传输协议。

本书可作为高等院校物联网工程专业、网络工程专业以及计算机类专业的高年级本科生、研究生的教学参考用书,也可供从事相关行业的工程技术人员与研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

面向低占空比无线传感器网络的数据传输协议研究/史培中,葛春鹏,古春生著. —北京:科学出版社,2019.3

大数据与网络安全研究丛书

ISBN 978-7-03-059653-6

I. ①面… II. ①史… ②葛… ③古… III. ①无线电通信-传感器-数据传输-传输协议-研究 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 262260 号

责任编辑:刘 博 霍明亮 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:迷底书装

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>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16
2019 年 3 月第一次印刷 印张:8

字数:158 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着微传感技术、射频技术、无线通信技术日新月异的发展,信息产业进入以物联网(Internet of Things, IoT)、无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)为代表的第三次浪潮,人类社会将进入人与人、人与物、物与物沟通的新时代,“感知中国”“智慧地球”的设想将会成为现实。

许多高校都为本科生或研究生开设 WSN 课程,同时 WSN 是很多研究论文和科研项目的关注点。本书不同于现在的一些关于 WSN 基本概念、原理和设计框架的书籍,而是在国内外无线传感器网络的理论和技术发展的基础上,结合该领域内的研究热点,分析睡眠调度节能机制引入对无线传感器网络数据传输带来的影响。采用“问题引入”“问题建模”“算法及协议设计”和“实验验证”的主线,分别在数据聚集、多跳广播和端到端通信三种基本数据传输模式下,吸收了国内外同行的研究方法及成果,总结了自己的研究及学习,形成了本书的内容。

在本书的研究和完成过程中,感谢我的导师汪芸教授,是她把我引入了这个研究领域,并给予悉心指导和帮助;感谢在香港城市大学研修期间,赵建良教授的悉心指导和项目组成员的帮助;感谢景征骏教授和钱进教授对本书的审阅工作;感谢学校领导汤建石书记、张玉娟书记、叶飞跃院长和同事给予的关心和帮助。感谢我的爱人对我工作的支持和对家庭的默默付出,还有宝贝儿子给家庭带来的快乐和幸福。

本书是在国家自然科学基金青年科学基金项目“面向低占空比无线传感器网络的跨层 QoS 保障协议研究”(61602216)、国家自然科学基金青年科学基金项目“支持多条件复杂匹配的条件代理重加密研究”(61702236)、国家自然科学基金面上基金项目“密码学中的多线性映射构造研究”(61672270)和常州市应用基础研究计划项目“支持多条件布尔运算的代理重加密研究”(No. CJ20179027)的经费资助下完成。同时,本书还得到江苏省重点学科建设项目的资助。

由于作者水平有限,不足之处在所难免,恳请广大读者给予批评指正。

作 者

2018 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 无线传感器网络概述	2
1.1.2 无线传感器网络特点	4
1.1.3 无线传感器网络节能协议研究的必要性	5
1.2 节能通信协议研究现状及分析	6
1.2.1 基于睡眠调度的 MAC 协议	8
1.2.2 面向睡眠调度的数据传输协议研究意义	11
1.2.3 面向睡眠调度的数据传输面临的主要挑战	11
1.3 本书的主要研究工作及组织结构	13
1.3.1 主要研究工作及创新点	13
1.3.2 本书的组织结构	16
第 2 章 面向动态传送协作树的动态时隙分配协议	18
2.1 引言	18
2.2 相关研究工作	19
2.3 网络模型与问题描述研究	22
2.4 D-TDMA 协议设计	24
2.4.1 D-TDMA 概述	24
2.4.2 Slot 分配算法设计	24
2.4.3 目标跟踪数据聚集	26
2.4.4 节点的动态加入/退出	28
2.4.5 调度策略的维护	30
2.5 D-TDMA 协议性能分析	32
2.5.1 能量消耗分析	32
2.5.2 端到端时延分析	36
2.5.3 能耗和时延性能比较	37
2.6 D-TDMA 协议实验结果与对比	39
2.7 本章小结	42

第 3 章	基于分布式准同步机制的可靠广播协议	43
3.1	引言	43
3.2	相关研究工作	44
3.3	模型假设与研究问题	47
3.3.1	系统模型	47
3.3.2	广播转发条件分析	49
3.3.3	准同步机制	50
3.4	DQSB 协议设计	51
3.4.1	分布式准同步广播协议设计	51
3.4.2	协议各状态关系分析	56
3.4.3	DQSB 协议性质分析	57
3.4.4	低时延路由	58
3.5	DQSB 协议实验结果与分析	59
3.5.1	基于 The ONE 仿真平台的扩展	59
3.5.2	不同的占空比下性能对比	60
3.5.3	不同网络规模下性能对比	61
3.5.4	不可靠链路下可靠性测试	62
3.5.5	低时延单播汇聚路由测试	63
3.5.6	参数 λ 分析	63
3.6	本章小结	65
第 4 章	时延受限和能量均衡的多跳广播协议	66
4.1	引言	66
4.2	相关研究工作	67
4.3	研究问题	69
4.3.1	问题描述	69
4.3.2	问题建模	71
4.4	DCEB 协议设计	73
4.4.1	能量均衡广播主干的构建	74
4.4.2	广播转发时间的确定	78
4.4.3	时延约束广播报文的转发	82
4.4.4	DCEB 协议实现	83
4.5	DCEB 实验结果与分析	85
4.5.1	实验设置	85

4.5.2	性能指标	86
4.5.3	性能比较分析	86
4.6	本章小结	90
第 5 章	基于跨层的自适应占空比控制协议	91
5.1	引言	91
5.2	相关研究工作	92
5.3	研究问题	94
5.3.1	问题描述	94
5.3.2	系统模型	95
5.4	CLA-DC 协议设计	96
5.4.1	单跳时延模型	96
5.4.2	单跳通信时延分析	97
5.4.3	自适应占空比控制算法设计	99
5.5	CLA-DC 实验结果与分析	102
5.5.1	单跳时延控制验证	103
5.5.2	端到端时延控制对比	104
5.6	本章小结	106
第 6 章	总结和展望	108
6.1	主要研究工作	108
6.2	进一步的研究方向	110
参考文献		113

第 1 章 绪 论

无线传感器网络涉及现代传感器技术、无线通信技术、微电子、嵌入式计算、分布式信息处理技术等多个学科领域，它是以数据为中心的无线网络，是构建普适理论新环境、实现普适控制的一种新兴的多学科交叉研究领域，是前沿研究热点之一。本章介绍面向睡眠调度下无线传感器网络数据传输协议研究的背景，提出睡眠调度节能机制在无线传感器网络中的重要性，总结相关节能协议的研究现状，分析面向睡眠调度节能机制对数据传输协议的影响和挑战，最后给出本书的主要研究工作及组织结构。

1.1 研究背景

受益于微电子技术、嵌入式计算机技术、无线通信技术的飞速发展和日益成熟，无线传感器网络的发展开启了新的篇章。作为一种特殊的无线移动网络，无线传感器网络是大规模分布的无线传感器节点构成的无线自组织网。经典的无线传感器网络的定义是：无线传感器网络由部署在监测区域内大量的廉价的微型传感器节点组成，每个节点都具有信息采集、数据处理和无线通信等功能，这些节点通过无线通信方式形成一个多跳的自组织网络系统，可自主完成指定任务。其目的是协作感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息，并发送给观测者。无线传感器网络在军事侦察、环境科学、医疗卫生、工业自动化、商业应用领域的广泛运用，使得实现“无处不在的计算机”这一理念成为可能，革命性地改变人们日常生活以及物理世界的交流。美国商业周刊和麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 技术评论，将无线传感器网络列为 21 世纪最有影响的二十一项技术和改变世界的十大技术之一。

无线传感器网络作为一种跨领域的综合性技术，在基础理论研究和工程技术研究等方面为科研工作者提供了丰富的课题。分组无线网 (Packet Radio Network) 是无线传感器网络的前身，源于军事通信的需要而发展起来的无线传感器网络的研究已经持续了四十余年。早在 1972 年，美国国防高级研究计划局 (Defense Advanced Research Project Agency, DARPA) 就启动了分组无线网项目，专门研究将分组无线网应用在战场环境下的数据通信中。加利福尼亚大学伯克利分校为嵌入式无线传感器网络设计开发的开源系统 TinyOS 被广泛地应用于无线传感器网络的研究。同样由加利福尼亚大学伯克利分校开发的软件模拟平台 NS2 被用于网络协议仿真和性

能分析。麻省理工学院对无线传感器信号处理技术、哈佛大学对无线传感器通信技术的研究也分别在无线传感器网络的相关领域做出了很大贡献。2009年,欧洲联盟(简称欧盟)发布《欧盟物联网战略研究路线图》,推动《欧盟物联网行动计划》,以确保欧洲在构建新型互联网的过程中起主导作用。日本也提出了“U-Japan”战略,推广物联网在电网、远程监测、智能家居、汽车联网和灾难应对等方面的应用。韩国通信委员会出台了《物联网基础设施构建基本规划》,将物联网市场确定为新增长动力。

《中国未来20年技术预见》一书对无线传感器网络提出七个方面研究内容,占全部提出课题的5%。从2002年开始,国家自然科学基金(Natural Science Foundation of China, NSFC)和其他政府机构开始资助无线传感器网络方面的研究项目。国家“十五”科技攻关项目将无线传感器网络列为重大研究项目。《国家“十一五”科学技术发展规划》和《863计划“十一五”发展纲要》将无线传感器网络技术列入自组织网络与通信技术专题方面的前沿探索研究。“十二五”期间,中华人民共和国工业和信息化部根据中华人民共和国《国民经济和社会发展的第十二个五年规划纲要》和国务院《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》制定了《物联网“十二五”发展规划》,将无线传感器网络的信息传输技术作为重点工程之关键技术创新工程,加强无线传感器网络、移动通信网、互联网、专网等各种网络间相互融合技术的研发,实现异构网络的稳定、快捷、低成本融合。国家科技重大专项“新一代宽带无线移动通信网”、《863计划“十二五”发展纲要》、中华人民共和国科学技术部发布的《国家“十二五”科学和技术发展规划》和《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》均涉及无线传感器网络的研究内容。易观国际发布的《中国物联网白皮书——无线传感器网络的机遇与挑战》中将无线传感器网络产业作为现阶段物联网发展的核心,并明确指出无线传感器网络的发展将会带动其他物联网产业,为其提供更丰富的市场机会和更明确的应用方向。

目前很多的高校和科学机构对无线传感器网络展开了深入研究。中国科学院上海微系统与信息技术研究所、中国科学院计算技术研究所信息网络实验室、清华大学、哈尔滨工业大学、南京大学和上海交通大学等研究机构和大学也在节点配置、能量优化、可信路由交换、网络协议、数据融合、编译等无线传感器网络所涉及的关键技术方面做出了许多贡献。

1.1.1 无线传感器网络概述

无线传感器网络与其他移动网络最根本的区别在于无线传感器网络中的传感器节点具有报文转发能力,节点间的通信可能经由多个中间节点的转发,即经过多跳(MultiHop)。节点通过分层的网络协议和分布式算法进行相互协调,从而实现无线传感器网络的自组织和运行。图1-1表明了无线传感器网络的体系结构。大范围分布的传感器节点负责采集监测信息,并通过一定的路由算法以多跳方式传送到汇聚

节点。在传送信息的过程中,传感器节点也会负责对信息进行数据融合等处理。汇聚节点则主要负责转换传感器网络与外部网络中使用的两种不同的通信协议,它可以是具有增强的存储、处理和通信能力的普通传感器节点或是仅包括无线通信接口的特殊网关设备。传感器网络采集的信息,最终由汇聚节点通过互联网和卫星将信息传送至管理节点。至此,用户便可以通过管理节点与无线传感器网络进行交互活动,主要包括收集获取信息、发布新的信息监测任务、管理和配置无线传感器网络等。

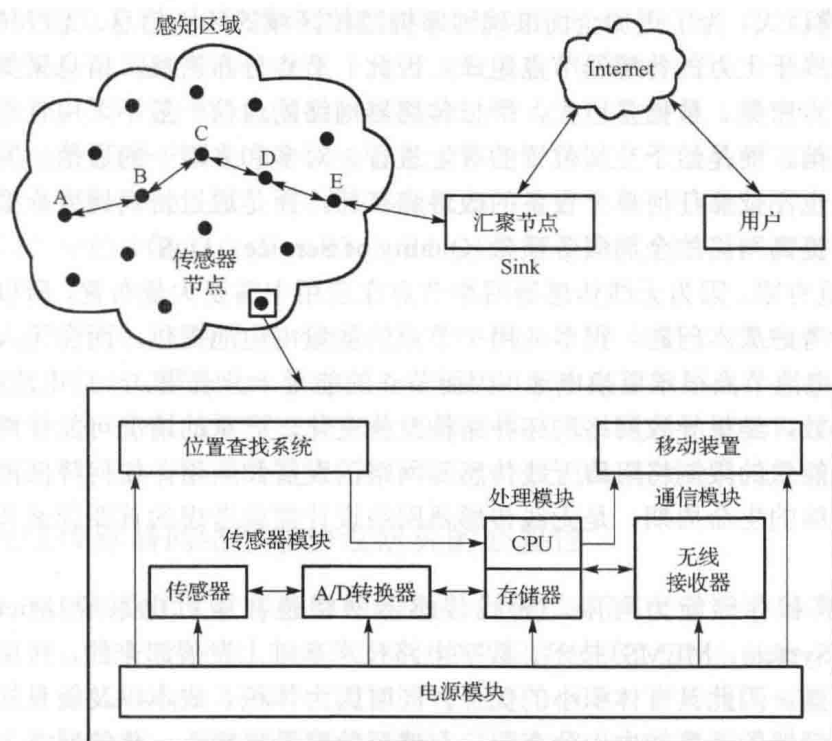


图 1-1 无线传感器网络体系结构

节点的典型硬件结构主要包括传感器、A/D 转换器、微处理器(CPU)、存储器、无线接收器、电池及电源管理电路等。传感器和 A/D 转换器负责采集监控区域内的信息,把模拟信号转换成数字信号,以便进一步处理。微处理器负责控制整个传感器节点的操作。存储器存储采集到的数据和其他节点转发的数据。无线接收器负责与其他传感器节点进行无线通信,交换控制信息和收发采集数据。电源模块主要为节点供电,一旦电源耗尽,节点就失去了工作能力。为了最大限度地节省能耗,在硬件设计方面,要尽量采用低功耗器件,在没有通信任务的时候,切断通信模块电源;在软件设计方面,各层通信协议都应该以节能为中心目标,必要时可以牺牲其他的一些网络性能,以获得更高的节能效果。

1.1.2 无线传感器网络特点

无线传感器网络是一种智能监控网络技术,这决定了它与传统网络技术有着明显的区别。无线传感器网络不是传统 Internet 技术和无线通信技术的简单叠加,而是对传统计算机网络的设计、计算以及控制模式的颠覆和革新。这也不是一个简单的理论概念,它与实际应用紧密相连,需要根据应用和用户的技术需求不断调整和改进自身的技术属性与性能。因此,无线传感器网络具有鲜明的自身特点。

(1) 规模巨大。为了更加全面准确地掌握监控区域的环境信息,无线传感器网络系统一般由成千上万的传感器节点组成。因此,节点分布密集,信息采集和交换频繁。因为节点密集、数据量巨大,所以传感器网络的通信一般不采用任意两点之间的点对点通信,而是给予空间位置的寻址进行一对多和多对一的通信。同时,网络性能的提升也不依靠任何单个设备的改进和革新,而是通过协调调度众多传感器节点协同工作提高网络的全局服务质量(Quality of Service, QoS)。

(2) 能量有限。因为无线传感器网络节点在应用中需要大量布置,所以节点在设计时要充分考虑成本问题。很多应用中节点的能量由电池提供,而在无人值守的监控环境中,电池节点很难更换电池,因而节点的能量十分有限。一旦电池能量用完,该节点将失效,结果导致网络的拓扑结构发生变化,严重的情况可能使网络中断。传感器节点能量的限制将阻碍无线传感器网络的发展和应用。如何降低网络能量消耗,延长网络的生命周期,是无线传感器网络设计需要考虑的首要因素和最重要的目标之一。

(3) 计算和存储能力有限。无线传感器网络是在微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)技术、数字电路技术基础上发展起来的,传感节点各部分集成度很高,因此具有体积小的优点。同时因为体积、成本以及能量的限制,所以嵌入式处理器的计算能力十分有限,存储器的容量也较小。传统网络上成熟的协议和算法对传感器网络而言开销太大,难以使用,必须重新设计简单有效的协议及算法。

(4) 自组织性,抗毁性强。无线传感器网络自身的应用特性决定了网络在很多情况下需要被布置在没有任何基础设备、条件相对恶劣的无人值守区域中。网络的构建方式很多时候是随机部署的,因而节点位置信息不能预先精确设定,节点的数目和相互间的关系也无法预先求得,这需要无线传感器网络能够自动配置自身的运行属性,基于一定的算法规则协调节点确定各自的地理位置和相互关系(自动定位和路由自建),建立合理的网络拓扑结构和通信模式。任何节点失效或新节点加入都不会影响整个网络的运行,具有很强的可扩展性和抗毁性。

(5) 多跳路由模式。传感节点通信距离有限,一般在几十到几百米范围内。要访问通信范围以外的节点,需要通过中间节点进行多跳路由。固定网络的多跳路由使

用网关和路由器来实现,而无线传感网络没有专门的路由设备,多跳路由是由传感节点完成的,每个节点既是信息的发起者,也可以是信息的转发者。

(6) 拓扑结构动态变化。因为能量和环境因素的影响,所以无线传感器网络的拓扑结构很难保持稳定不变。节点因能量耗尽或发生故障而失效,会造成网络拓扑结构的变化;而特定情况下新节点突然加入也会影响网络的拓扑和通信。因此,无线传感器网络必须具有一定的容错能力和拓展能力,能够在一部分节点失效或者突然有新节点加入时,迅速保持相对稳定的工作状态。

(7) 以数据为中心。传统网络的运行模式是以地址为中心的,即网络设备具有明确的网络地址,而网络关心的是某个地址的设备提供的数据或命令要求。而在无线传感器网络中,大量的节点部署使提供数据的节点之间在特征上没有明显差异,网络关心的不是数据源于哪个节点,而是数据本身。因此,无线传感器网络需要网内分布式数据处理技术的支持。任何传感数据都不是在汇聚节点处进行处理整合的,数据传输过程中的中继节点(Intermediate Nodes)要对数据包进行必要的整合、过滤或压缩。

(8) 与应用相关。无线传感网络应用广泛,因为不同的应用对系统的要求必然会有很大差别,所以传感器网络不能像 Internet 和无线电话网一样,有统一的通信协议平台。针对每一个具体应用来研究传感器网络技术,这是传感器网络不同于传统网络的显著特征。只有让系统更贴近应用,才能做出最高效的目标系统。

1.1.3 无线传感器网络节能协议研究的必要性

无线传感器网络由大量传感器节点组成,根据应用需要节点数目从数十至数千不等,节点间使用无线通信,动态组网,通过多跳传递进行数据传输。与现有无线自组网(Ad Hoc Network)不同,节点数目往往更为巨大,分布更为密集。无线自组网中节点移动性较强,而传感器网络中静止节点和移动节点相混合,大多数节点静止不动。且运算处理能力,数据存储能力、通信能力,尤其是节点能量十分有限。传统无线网络更注重服务质量的提升和高效的带宽利用率,其次才考虑节能;而在无线传感器网络中通过节能延长网络寿命是首要设计目标,这是与传统无线网络最重要的区别之一。

近年来许多研究者关注能量补给技术的研究,能量补给技术主要包括:①环境能量收集。指从背景无线电信号(Background Radio Signal)、无线电频率(Radio Frequency)、环境光能、环境热能、振动能等中转换和提取能量。②增量部署。例如,文献增量部署一些新的传感器节点来替代能量耗尽的节点;文献利用移动节点或者人力,在部署新节点的同时,对能量耗尽的节点进行回收,因而更加环保。③无线充电。即利用充电节点靠近需要充电的传感器节点,通过无线充电的方式对其进行充电。然而,环境能量收集受环境影响很大,能量补给效率很难得到保障;增量部

署依靠增加替换节点,需要额外增加成本代价,甚至耗费大量的人力;无线充电技术需要成熟的硬件充电设备和可行的充电规划方案支持,现有的研究成果大部分还停留在理论证明和实验阶段。因此,从软件入手,设计高效节能的通信协议是目前最为可行的解决方案。

1.2 节能通信协议研究现状及分析

降低能耗、延长网络生命周期是无线传感器网络所有研究工作的基础。从节点角度而言,能耗涉及组成硬件的每一个部分;从网络协议角度而言,从最底层的物理层到最上层的数据管理,都可能成为节能的优化对象。目前的节能机制研究热点基本集中在与通信协议相关的各个层面,大体上分为三类:功率控制、数据融合和睡眠调度。

(1)功率控制。功率控制是指节点通过设置或动态调整节点的发射功率,在保证网络拓扑连通、双向连通或者多连通的基础上,使得网络中节点的能量消耗最小。通过采用功率控制机制,能够让密集分布的传感节点在保证一定服务质量的前提下以较小的干扰无线共享信道,通过空分复用允许多个节点同时发送数据,降低了节点的发射功率以及无谓的空闲监听能耗,延长了网络的寿命,提高了整个网络的容量。功率控制对提高系统的性能有很大的帮助,但是真正实现它要求硬件和软件必须提供相应的支持,从而增加系统的复杂度。

(2)数据融合。为了确保健全的覆盖,散布的传感器经常是互相交叠的。因此一个事件可能触发多个传感器。所有的传感器都将向用户报告监测,如果这种数据能在返回给用户之前被融合到一个二元值(某个事件发生),一个区域(在某监测区域事件的发生),则通信和能量消耗都能减少。数据融合通过去除冗余信息、减少射频传输的数据量来节省能量。但数据融合的应用相关性较强,对目标跟踪、数据查询类应用的效果较好,而对持续监测的应用效果就不太明显。数据融合的拓扑适应性较差,如果由于节点失效或移动造成拓扑变化,重新构造融合树的通信开销和延迟开销都不能忽略。

(3)睡眠调度。在许多传感网络应用中,节点长时间处于空闲状态,应该尽可能将其关闭(即置于睡眠状态)以减少空闲监听能耗。因此,在 MAC 层设计睡眠调度节能机制以最小化由于空闲监听而消耗的能量。根据节点间睡眠协调的方式不同,可以将睡眠调度方式分为两种:一种方式是周期性让节点进入睡眠和唤醒状态,需要同步协议支持完成数据传输;另一种方式是睡眠和唤醒机制中采用前导序列或信标报文,实现低功耗监听(Low Power Listening)。

如图 1-2 所示,周期性让节点进入睡眠和唤醒状态,每个节点周期性地休眠然后醒来看是否有其他的节点想和它通信。在睡眠期间,节点关闭它的射频,并且设

置一个定时器在一段时间后唤醒它。这种机制需要保证节点之间的同步(如 S-MAC 协议),使节点尽可能多地处于睡眠状态。而在需要通信时,能够自动唤醒并开启射频设备,完成数据传输任务。

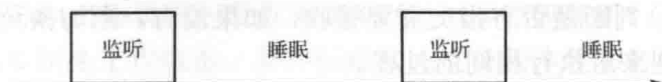


图 1-2 需要同步协议支持的周期性睡眠调度节能机制

与该周期性睡眠和唤醒机制类似的是基于 Slot 的监听模式。它将时间划分成连续且相等的时间片,节点以 n 个时间片为周期,在其中选择一个或多个时间片作为监听时段,其余的则作为睡眠时段。在这种模式中,因为相邻节点的监听时段并不一致,所以节点在进入监听之前先发送指示帧来宣布自己接下来的状态。如图 1-3 所示,以 6 个时间片为唤醒周期的睡眠调度 Slot 监听模式,节点大部分时间都处于睡眠状态,并周期性地被唤醒来监听信道以接收来自其他节点的数据。

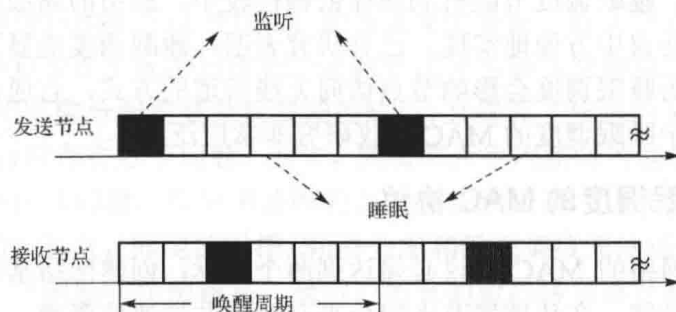


图 1-3 基于 Slot 的周期性睡眠和唤醒调度机制

前导序列是每个报文在发送时需要先发送一个足够长的前导序列(该前导序列长度与节点的睡眠调度时间间隔有关),以便于接收节点在信道检测时知道有节点发送数据,如图 1-4 所示的 B-MAC 协议。这种方式的不足之处在于需要节点在任何时刻监听到该前导序列时都要醒来,而不管此次传输的目的接收方是不是自身消耗了大量的能量。而且在密集型的多跳无线传感器网络中,如果信道采样率较低,这种技术的端到端报文接收成功率很低。



图 1-4 基于前导序列的低功耗监听方式(B-MAC 协议)

如图 1-5 所示的 RI-MAC 协议，采用基于信标报文的唤醒通知属于一种接收端发起 (Receiver-Initiated) 的通信机制，它能够让有报文需要发送的节点知道接收端已经处于唤醒状态。节点唤醒后，进行一段时间的空闲信道评估 (Clear Channel Assessment, CCA) 判断是否有报文需要接收，如果没有，则切换至睡眠状态，直至下一个唤醒周期到来后执行相同的过程。

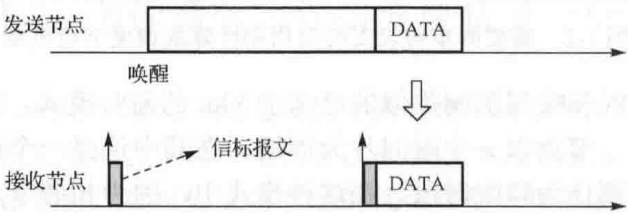


图 1-5 基于信标的接收端发起的低功耗监听方式 (RI-MAC 协议)

睡眠调度节能机制通过尽量减少射频的空闲监听来降低节点能耗。与功率控制和数据融合相比，睡眠调度节能机制硬件依赖性较小，适用的高层应用几乎不受限制，可以在通信协议中方便地实现。已有研究表明，睡眠调度能显著减少空闲监听和降低能耗。因为睡眠调度会影响节点访问无线信道的方式，它通常在 MAC 协议中实现，所以基于睡眠调度的 MAC 协议研究非常广泛。

1.2.1 基于睡眠调度的 MAC 协议

无线传感器网络的 MAC 协议必须达到两个目标：创建网络基础设施，即为数据传输建立通信链路；在传感器节点间公平有效地共享通信资源。节点能耗高依然是制约大规模长期部署和应用无线传感器网络的主要因素，然而在无线传感器网络 MAC 协议设计中，主要通过节点睡眠调度进行节能。而采用睡眠调度节能机制的最大问题在于，节点由于进入睡眠状态而无法接收数据。因此，研究基于睡眠调度节能机制的高效 MAC 协议成为无线传感器网络的研究重点之一。面向睡眠调度的无线传感器网络的 MAC 协议需要对节点的睡眠和唤醒的时间进行调度，并采用相应的协调机制支持节点之间的数据传输，以保证目标节点不会因睡眠而错过数据的接收，并且满足网络的 QoS 性能保障。根据是否需要时间同步，无线传感器网络的 MAC 协议大致分为同步调度和异步调度两种。

1) 同步调度的 MAC 协议

在同步调度的 MAC 协议中，需要通过精确的时钟控制对节点进行睡眠调度，使网络中的传感器节点在同一时刻周期性地被唤醒，与邻居传感器节点进行数据包交换，能有效地减少空闲监听和降低能耗。在这种唤醒机制实现中，传感器节点的邻居节点基于存储的同步时钟信息来建立相同的工作调度表。因为全网范围内的同步难度极大且效率不高，所以同步调度通常在局部范围内实现。同步调度的 MAC

协议根据信道访问方式又可以进一步划分为载波监听多路访问(Carrier Sense Multiple Access, CSMA)、时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)和混合型三类。

S-MAC 是第一个为无线传感器网络设计的基于同步调度和采用 CSMA 方式的 MAC 协议。在 S-MAC 协议中,节点周期睡眠以减少空闲监听。相邻节点形成虚拟簇,簇内节点同步切换工作状态,并在活跃状态交换同步包和数据包。为避免冲突和串音, S-MAC 采用与 802.11 类似的 CSMA 机制交换数据包。S-MAC 成功实现周期睡眠调度,显著减少了空闲监听。其后,大多数基于同步调度的协议延续这一思想,并将其作为基准协议进行比较。但 S-MAC 协议帧长度和占空比固定,帧长度受限于时延要求和缓存大小,活跃时间主要依赖于消息速率,特别是当网络负载较小时,空闲监听时间仍然过长。周期睡眠造成通信延迟累加。尽管 S-MAC 的改进版本 T-MAC 采用流量自适应监听机制,增强应对变化数据流量的能力,同时将睡眠延时减少一半以上,但周期睡眠造成的传输时延仍然十分显著。

在文献提出的 TDMA 协议中,相邻节点组织成簇,每个簇选举产生簇头,簇内节点的无线信道访问由簇头以 TDMA 的方式集中分配。簇头节点一直处于活跃状态,而非簇头节点仅在分配的时隙处于活跃状态并与簇头交换数据。分簇避免了传统 TDMA 协议中时隙分配需要全局视图的缺点,且提高了信道的空间复用度。但是,分簇的 TDMA 协议存在以下问题。首先,簇头节点空闲监听的能耗很高。虽然簇头轮换可以部分解决该问题,但空闲监听的总能耗依然较高,且簇头的选举和轮换会带来额外的开销。其次,固定的时槽(Slot)分配和睡眠调度无法适应网络流量变化,网络负载越小,空闲监听比例越高。最后,所有的数据转发路径必须经过簇头,这极大地限制了路由的灵活性,降低了路由的效率。

Z-MAC 是一种基于同步调度的 CSMA/TDMA 混合 MAC 协议。在低流量条件下使用 CSMA 信道访问方式,可提高信道利用率并降低时延;在高流量条件下使用 TDMA 信道访问方式,可减少冲突和串扰。与 TDMA 协议不同, Z-MAC 中节点能在任何时隙发送数据,但时隙拥有者优先级更高。当时隙拥有者不发送数据时,其邻居节点以 CSMA 方式竞争信道。Z-MAC 通过收集两跳内邻居信息,然后采用分布式着色算法为每个节点分配时隙。IEEE 802.15.4 标准也采用了与 Z-MAC 相类似的 TDMA/CSMA 信道混合访问方式。

另外,与以上三种信道访问机制不同, SCP-MAC 结合了低功耗监听机制和同步的方式,令所有节点同时唤醒。节点能够知道邻居节点的唤醒时间,能够避免低功耗监听中长时间前导信号的发送。但所有节点同时唤醒使得一个周期中只有一对节点能够进行数据传输,增大了传输延迟,降低了网络利用效率。因此, SCP-MAC 协议采用提前唤醒下一跳节点的方式弥补延迟过大的缺陷。

同步调度的 MAC 协议需要节点周期性地切换到活跃状态并交换同步数据包,这种周期性的同步负担使得节点难以进一步降低空闲监听的比

2) 异步调度的 MAC 协议

异步调度的 MAC 协议不需要网络中的节点采用相同的同步周期。每个传感器节点都有自己的工作调度表,并且每个节点之间的工作调度表是相互独立的。因此,异步调度的 MAC 协议关键在于收发双方之间的握手机制设计。为了避免节点因睡眠而错过接收数据,有两类解决方法:一类是在传输数据时,连续发送信号,直至接收节点醒来(睡眠时间间隔结束)进行数据传输,如 B-MAC 和 X-MAC;另一类是发送节点并不连续发送信号,而是保持监听状态,节点在唤醒时发送一个信号报文(称为信标报文 BEACON),发送节点监听到目的节点的信号时开始传输数据,如 RI-MAC 和 A-MAC。

B-MAC 协议使用扩展前导和低功率监听技术实现按需同步。节点在发送数据前先发送一段固定长度的前导序列(扩展前导)。为避免分组空传,前导序列长度大于接收节点睡眠时间。周围邻居节点醒来后,监听到前导序列,则保持活跃状态直到前导序列结束。序列结束后,接收节点接收数据分组,而非接收节点转入睡眠状态。邻节点在监听到前导序列后,必须等到序列结束,才能判断自己是否为接收节点。因此,前导序列会让所有邻居节点处于空闲监听状态,这会浪费大量的能量。此外,固定长度的前导序列效率不高,即使接收方已被提前唤醒,数据发送也必须在前导序列结束后才能进行。为解决以上两个问题,X-MAC 协议中的节点发送若干较小的频闪前导,其中包含接收节点的地址。非接收节点在收到前导序列后立即进入睡眠状态。接收节点在醒来后,利用频闪前导之间的时间间隔,向发送节点回复确认消息。发送节点收到确认消息后立即发送数据分组,从而缩短前导序列的长度和避免接收节点的过度监听。在 B-MAC 和 X-MAC 协议中,发送节点在接收节点醒来前,需要广播足够长的前导序列,从而保证接收节点能够监听到并保持唤醒状态。这种方式不仅消耗了大量的发送能量,也较长时间地占用无线共享信道,使得信道利用率较为低下。

RI-MAC 采用接收节点发起(Receiver-Initiated)的握手机制来缩短同步期间对信道的占用时间,从而提高网络的吞吐量。在 RI-MAC 协议中,节点周期性地睡眠调度,非发送节点在醒来时广播长度很短的 BEACON 消息包(称为信标报文),并等待短暂时间以确定是否需要接收数据。发送节点则一直处于空闲监听模式,等待接收节点的 BEACON 消息包。为减少节点的空闲监听,发送节点收到 BEACON 后立即发送数据包。RI-MAC 占用信道时间比 B-MAC 和 X-MAC 更少,因而吞吐量更大。但是,RI-MAC 协议中,非发送节点需要先发送 BEACON 消息包再监听信道,活跃时间比 B-MAC 和 X-MAC 更长。A-MAC 在 RI-MAC 的基础上进行改进,接收节点发送探测报文(Probe)后,发送节点监听到该报文时需要 ACK 确认,使接收节点能够决定是继续保持唤醒状态还是转入睡眠状态。基于该通信模型,A-MAC 提供了支持单播、广播和同步唤醒等服务的统一链路层架构。

两种睡眠调度节能机制相比,使用异步睡眠调度节能机制开销非常小,灵活性强而且操作非常方便,能够有效地减少能量的消耗,非常适合在动态变化的网络拓