

无线传感器网络安全

杨庚 陈伟 曹晓梅 著

 科学出版社
www.sciencep.com

无线传感器网络安全

杨 庚 陈 伟 曹晓梅 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了无线传感器网络安全的基本概念、基本理论与技术,内容包括安全需求、密钥管理、认证与访问控制、安全路由、数据融合与安全、安全定位与时钟同步、入侵检测、容侵与容错等方面的基本概念与研究成果。

本书从无线传感器网络安全的特征与需求出发,注重基本概念和对需要解决的科学问题的描述,层次清楚、突出重点,尽可能反映当前的研究成果与现状,便于相关人员了解和掌握该研究领域的相关内容,为进一步的深入研究打下基础。

本书可作为高等院校相关专业中无线传感器网络与安全等相关课程的教材,也可作为其他专业师生和科技工作者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络安全/杨庚,陈伟,曹晓梅著. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-029369-5

I. ①无… II. ①杨…②陈…③曹… III. 无线电通信-传感器-安全技术
IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 210786 号

责任编辑:王志欣 任 静 / 责任校对:桂伟利

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕 者

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>

丽 源 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年11月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010年11月第一次印刷 印张: 21

印数: 1—3 000 字数: 412 000

定 价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

以互联网为标志的计算机网络的发展,改变了人们的生活方式,引起了巨大的社会变革。而计算机网络与通信技术的融合为我们展现了更广泛的应用前景。微电子技术、计算技术和无线通信技术等方面的不断发展与融合,推动了低功耗多功能传感器的快速发展,研制开发出了具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器,而无线传感器网络就是由部署在一定区域的传感器节点组成,通过无线通信的方式形成一个多跳的自组织网络系统。

无线传感器网络从最初的军方需求,扩展到一般社会与民用领域,涉及环境质量、交通管理、医疗救助、智能家居、自动化生产等各个方面,引起世界各国的极大关注。美国《商业周刊》认为无线传感器网络是全球未来四大高技术产业之一,我国与国际同步地开展了相关研究。在《中国未来 20 年技术预见研究报告》中,有 7 项技术课题直接论述了传感网络。2006 年初发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》为信息技术确定了三个前沿方向,其中有两个与无线传感器网络研究直接相关,并将其列为信息产业及现代服务业的优先发展主题之一。国内越来越多的企事业单位开始关注并研制了相关的传感器节点与应用系统。

另一个方面,近几年人们又提出了物联网(Internet of Things, IOT)的概念,它可以认为是“物物相连的互联网”,通过把感应器、处理器和无线通信模块等设备嵌入到电网、铁路、桥梁、建筑、电器等各种物体中,使它们相互连接,构成物联网。国际上多个国家和地区已经启动了相应的研究计划,如我国的“感知中国”概念、美国的“智慧地球”、日本的 U-Japan 计划、韩国的 U-Korea 计划等,而欧洲智能系统集成技术平台(EPoSS)在 Internet of Things in 2020 报告中分析预测,未来物联网的发展将经历四个阶段:2010 年之前 RFID 被广泛应用于物流、零售和制药领域,2010~2015 年物体互联,2015~2020 年物体进入半智能化,2020 年之后物体进入全智能化。

作为物联网的重要组成部分,无线传感器网的研究与应用显示了重要的理论研究意义和巨大的应用价值。在传感器网络发展的初期,人们更多关注的是节点、体系结构、路由协议、定位等,而在理论与技术发展到一个层次以后,安全问题就显得尤为重要,就像与互联网的发展过程一样,当今的网络安全已成为互联网最具挑战性的课题之一,已渗透到社会的各个阶层以及国家的各个方面。因此,对无线传感器网络安全所涉及的内容进行总结和概括是一件很有意义的工作,这也是本书的出发点。

本书系统地介绍了无线传感器网络安全的基本概念、基本理论与技术,内容包括安全需求、密钥管理、认证与访问控制、安全路由、数据融合与安全、入侵检测与容错容侵、定位与安全等方面的基本概念与研究成果,各章后附有参考文献,以便进一步学习研究。

全书共8章。第1章主要介绍无线传感器网络的基本概念和发展历史。第2章侧重无线传感器网络面临的安全攻击和安全需求。第3章讨论了密钥管理问题,是无线传感器网络安全的基础。第4章是认证与访问控制。第5章介绍了安全路由,包括基本概念、路由协议和一些算法。第6章为数据融合与安全,讨论感知信息在汇聚与融合过程中涉及的安全问题。第7章涉及安全定位与时钟同步问题,是传感器网络应用的一个重要形式。最后第8章介绍了入侵检测、容侵与容错等相关的内容。

参与本书编写工作的还有王卉、陈燕俐、祁正华、李建波、董梦丽等,全书由杨庚老师负责统稿。感谢国家自然科学基金委员会对本书出版的支持,书中还引用了其他同行的工作成果,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,敬请读者批评指正。

作者

2010年7月于南京邮电大学

目 录

前言

第 1 章 无线传感器网络概述	1
1.1 发展概况	1
1.2 通信与组网技术	3
1.2.1 网络体系结构	3
1.2.2 物理层	6
1.2.3 MAC 层协议	7
1.2.4 路由协议	14
1.2.5 IEEE 802.15.4 标准	18
1.3 无线传感器网络的支撑技术	23
1.3.1 定位技术	23
1.3.2 时钟同步技术	26
1.3.3 数据融合	27
1.3.4 能量管理	29
1.3.5 安全机制	30
1.4 应用场景	32
1.4.1 环境监测	33
1.4.2 军事应用	34
1.4.3 物联网及其应用	35
1.5 无线传感器网络仿真平台	38
1.5.1 NS-2	38
1.5.2 OPNET	39
1.5.3 OMNET++	39
1.5.4 TinyOS	40
1.6 本章小结	41
参考文献	41
第 2 章 安全问题概述	47
2.1 无线传感器网络的特征	47
2.2 安全需求	48
2.3 安全攻击与威胁	50

2.4 安全机制	55
参考文献	56
第3章 密钥管理	57
3.1 概述	57
3.2 基于对称密钥体制的密钥管理方案	60
3.2.1 基于密钥分配中心方式	60
3.2.2 基于预分配方式	68
3.2.3 基于分组分簇方式	79
3.3 基于非对称密钥体制的密钥管理方案	83
3.3.1 基于 ECC 的加解密算法	84
3.3.2 基于身份标识的密钥管理方案	86
3.4 对称与非对称混合密钥管理方案	89
3.5 广播组播密钥管理	91
3.5.1 广播密钥管理需求分析	91
3.5.2 组播密钥管理策略	94
3.5.3 几种组播广播加密方案	101
3.6 本章小结	112
参考文献	113
第4章 认证与访问控制	119
4.1 网络认证概述	119
4.1.1 身份认证	119
4.1.2 消息认证	121
4.1.3 广播认证	122
4.1.4 无线传感器网络认证的特点	123
4.2 无线传感器网络中的身份认证	126
4.2.1 基于非对称加密算法的身份认证	126
4.2.2 基于对称加密算法的身份认证	131
4.2.3 分布式的身份认证	132
4.3 无线传感器网络中的消息认证	133
4.3.1 μ TESLA 协议	134
4.3.2 多级 μ TESLA 协议	138
4.3.3 MM μ TESLA——多基站传感器网络广播认证协议	140
4.3.4 基于身份标识加密的广播认证	142
4.4 访问控制	146
4.4.1 无线传感器网络中的访问控制	146

4.4.2 访问控制方法	148
4.5 本章小结	153
参考文献	154
第5章 安全路由	158
5.1 安全路由概述	158
5.2 路由协议的安全威胁	160
5.3 典型路由协议及安全性分析	162
5.3.1 泛洪式路由协议	163
5.3.2 以数据为中心的路由协议	165
5.3.3 基于位置的路由协议	175
5.3.4 层次式路由协议	181
5.4 安全路由	185
5.4.1 路由攻击的防范	186
5.4.2 安全路由协议分类	189
5.4.3 安全路由协议	191
5.5 本章小结	207
参考文献	208
第6章 数据融合与安全	214
6.1 数据融合技术概述	214
6.1.1 数据融合必要性	214
6.1.2 数据融合方案分类	216
6.2 数据融合的安全问题	219
6.2.1 攻击种类	219
6.2.2 安全需求及挑战	220
6.3 安全数据融合协议	221
6.3.1 点到点(hop-by-hop)安全数据融合协议	222
6.3.2 端到端(end-to-end)安全数据融合方案	231
6.3.3 虚假数据注入攻击的检测和响应机制	235
6.4 本章小结	235
参考文献	236
第7章 安全定位与时钟同步	240
7.1 概述	240
7.2 无线传感器网络的节点定位系统	241
7.2.1 基于测距的定位方法	242
7.2.2 无须测距的定位方法	244

7.3	节点定位系统的安全问题	248
7.3.1	节点定位系统所受攻击的分析	248
7.3.2	节点定位系统安全措施的分析与比较	251
7.4	时钟同步技术	258
7.4.1	时钟同步机制	258
7.4.2	时钟同步机制的安全问题	265
7.4.3	时钟同步攻击的解决方案	269
7.5	本章小结	275
	参考文献	276
第8章	入侵检测、容侵与容错	282
8.1	概述	282
8.1.1	入侵检测	282
8.1.2	容侵与容错	283
8.2	无线传感器网络中的入侵检测	285
8.2.1	入侵检测体系结构	285
8.2.2	入侵检测机制	294
8.3	容侵与容错	300
8.3.1	容侵度和容错度	301
8.3.2	无线传感器网络中的容侵技术	302
8.3.3	无线传感器网络中的容错技术	311
8.4	本章小结	316
	参考文献	316
缩略语		320

第 1 章 无线传感器网络概述

20 世纪 90 年代以后,以因特网为代表的计算机通信与网络技术得到了飞速的发展,改变了人们的生活方式,引起了社会、经济、工业生产以及传媒等多方面的变革,因特网已成为很多人日常生活中不可缺少的部分。

随着微电子技术、计算机技术和无线通信技术等方面的不断发展与融合,推动了低功耗、多功能传感器的快速发展,研制开发出了具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器,而无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)就是由部署在一定区域的传感器节点组成,通过无线通信的方式形成一个多跳的自组织网络系统。

本章主要介绍无线传感器网络的发展概况、基本概念、传感网络通信与组网技术、传感网络的支撑技术以及其应用场景,并介绍了作为新兴的物联网关键技术之一,无线传感器网络在其中的应用。

1.1 发展概况

无线传感器网络是一种多跳自组织网络,综合了传感器技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术和无线通信技术,能够协作地实时监测、感知和采集网络分布区域内的各种环境或监测对象的信息,并对这些数据进行处理,获得详尽而准确的信息,并传送给需要这些信息的用户。因此传感器网络被认为是 21 世纪最重要的技术之一,将会对人类未来的生活方式产生巨大影响^[1]。

早在 1999 年,在美国召开的移动计算和网络国际会议就已经提出“传感网是下一个世纪人类面临的又一个发展机遇”。美国《商业周刊》认为无线传感器网络是全球未来四大高技术产业之一,是 21 世纪世界最具有影响力的 21 项技术之一。2003 年,麻省理工学院(MIT)的《技术评论》(*Technology Review*)杂志指出,无线传感器网络技术是对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术,并将是这十种新技术之首^[2]。无线传感器网络作为一个新兴的应用领域,在基础理论和工程技术两个层次向科技工作者提出了大量的挑战性研究课题。近年来国内外开展了大量的基础理论研究,取得了大量的研究成果。从技术发展的角度来看,最近几年来,无线通信、集成电路、传感器和微机电系统等技术得到飞速发展,从而使得低成本、低功效和多功能的微型传感器的大量生产成为可能。这些传感器在微小体积内集成了信息采集、数据处理和无线通信等多种功能。由于

微型传感器的体积小、重量轻,因而人们又称无线传感器网络为“智能尘埃(smart dust)”。

关于无线传感器网络的研究从 20 世纪 90 年代在美国开始,主要是基于军方电子战的需求。从 21 世纪开始,随着技术的成熟和硬件成本的降低,推动着无线传感器网络向大规模、低功率的方向发展,应用的范围也扩展到环境质量、交通管理、医疗救助、智能家居、自动化生产等各个方面,引起各国对无线传感器网络技术的极大关注。美国国家科学基金委员会在 2003 年制定了无线传感器网络研究计划,美国国防部和各军事部门都对无线传感器网络给予了高度重视,微软公司、英特尔公司等信息工业巨头也都设立或者启动了相应的计划。美国著名的院校几乎都有研究小组从事无线传感器网络相关技术的研究,如加州大学洛杉矶分校、康奈尔大学、麻省理工学院和加州大学伯克利分校。随后日本、欧洲等国家与地区也都对无线传感器网络展开了广泛深入的研究。

我国关于无线传感器网络的研究与国际同步开展。在《中国未来 20 年技术预见研究报告》中,有 7 项技术课题直接论述了无线传感器网络。2006 年初发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》为信息技术确定了三个前沿方向,其中有两个与无线传感器网络研究直接相关,并列为信息产业及现代服务业的优先发展主题之一。“传感器网络系统的基础软件及数据管理关键技术的研究”已被列为国家自然科学基金委员会、信息科学部与微软亚洲研究院正式签署的第二期联合资助项目之一。国家“十五”科技攻关项目也把无线传感器网络列为重大项目。并且,国家自然科学基金委员会每年都资助多项与无线传感器网络有关的研究项目。

国内相当一部分高等院校、科研院所和企业都进行了大量的研究工作,研究内容主要包括通信协议的分层和网络节点的设计、无线通信协议栈、同步和定位中间件、数据融合、低功耗与高安全性设计、网络管理、质量保证技术以及特定行业的应用研究等^[3],中国计算机学会传感器网络专委会是近几年最为活跃的学术组织之一,吸引并推动了更多的院校及研究所加入到无线传感器网络的研究中来。国内也有越来越多的企事业开始关注无线传感器网络技术的发展,推出针对无线传感器网络及 Zigbee 的解决方案,以及以应用为驱动的应用研究方案,如电力控制、交通收费、移动目标定位等。预计到 2015 年,无线传感器网络将大规模推广使用。相信随着研究工作的不断深入和发展,各种无线传感器网络将最终遍布我们的生活环境,从而真正实现“无处不在的计算”!

无线传感器网络作为一种新的信息获取和处理技术,在许多特殊的领域有着其他传统信息获取技术不可比拟的优势,因此也必将开辟出更加新颖而有价值的商业应用。尽管无线传感器技术目前仍处于初步应用阶段,但已经展示出了非凡的应用价值,相信随着相关技术的发展和推进,一定会得到更大的应用。如果说

因特网构成了逻辑上的信息世界,改变了人与人之间的沟通方式,那么无线传感器网络就是将逻辑上的信息世界和客观上的物理世界融合在一起,将改变人类与自然界的交互方式,特别是作为物联网的主要组成部分,更显示出了其不可估量的发展前景。

1.2 通信与组网技术

1.2.1 网络体系结构

无线传感器网络与传统的无线网络(如 WLAN 和蜂窝移动电话网络)有着不同的设计目标,后者在高度移动的环境中通过优化路由和资源管理策略最大化带宽的利用率,同时为用户提供一定的服务质量保证。而在无线传感器网络中,除了少数节点需要移动以外,大部分节点都是静止的。一个典型的无线传感器网络结构如图 1-1 所示,主要由传感器节点、无线传输信道、汇聚节点、因特网或无线通信网络和信息处理中心(用户)等部件组成。

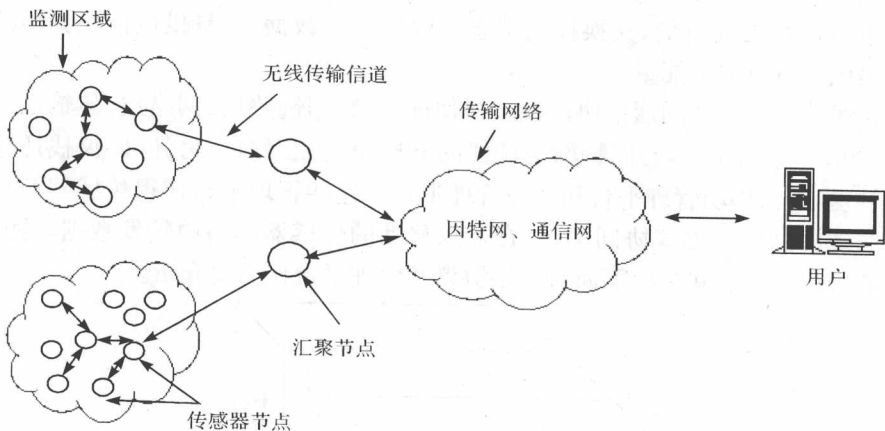


图 1-1 无线传感器网络体系结构

传感器节点收集的数据沿着其他传感器节点逐跳地进行传输,通过自组织的方式构成网络,在传输过程中监测数据可能被多个节点处理,经过多跳后路由到汇聚节点,最后通过因特网或其他无线通信网络(如移动通信网 GSM、卫星通信网等)到达管理节点,用户通过管理节点对无线传感器网络进行配置和管理,收集监测数据。

无线传感器节点是传感网的基本组成单元,一般由传感器模块、处理器模块、

无线通信模块和能量供应模块四部分组成^[4],如图 1-2 所示。

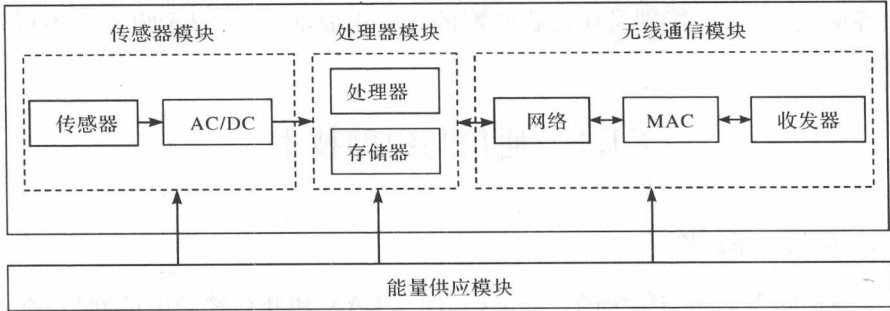


图 1-2 无线传感器网络节点的结构

传感器模块主要用来采集各类信息,如温度、湿度、声音、加速度、全球定位信息等,并负责将模拟信息量转换为数字信息,传递给其他模块进行处理;处理器模块负责控制整个传感器节点数据的操作。被监测对象为物理信号的形式决定了传感器的处理器通常选用嵌入式中央处理器(CPU);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;能量供应模块为传感器节点提供运行所需的能量。

无线传感器网络的通信协议栈包括物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层,如图 1-3 所示^[5],与因特网协议栈的五层协议相对应。另外,协议栈还包括能量管理平台、移动管理平台和任务管理平台。这些管理平台使得传感器节点能够按照能源高效的方式协同工作,在节点移动的传感器网络中转发数据,并支持多任务执行和资源共享。下面对各层协议和管理平台作简要介绍。

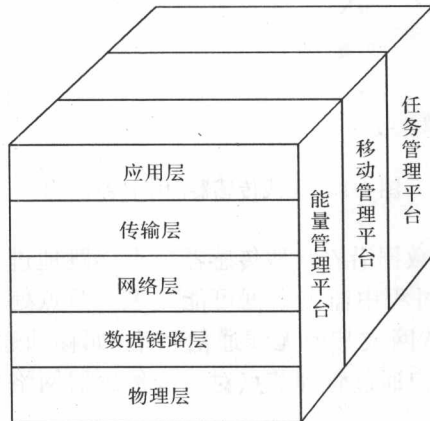


图 1-3 无线传感器网络协议栈

1) 物理层

物理层负责信号的调制、发送与接收、频段的选择以及数据的加密等。对于距离较远的无线通信来说,从实现的复杂性和能量的消耗来考虑,代价都是很高的。

2) 数据链路层

数据链路层用于解决信道的多路传输问题。数据链路层的工作集中在数据流的多路技术、数据帧的监测、介质的访问和错误控制,它保证了无线传感器网络中点到点或一点到多点的连接可靠性。

3) 网络层

网络层负责对传输层提供的数据进行路由。大量的传感器节点散布在监测区域中,负责采集数据的传感器节点和基站节点之间,以及传感器节点之间的数据传输都要进行路由决策,因此,需要设计一系列路由协议来保证数据报选路由的正确性与可靠性。

4) 传输层

传输层是用于维护无线传感器网络中的数据流,保证通信服务质量的重要部分。结合无线传感器网络协议栈图来进行分析:当传感器网络需要与其他类型的网络连接时,例如基站节点与任务管理节点之间的连接就可以采用传统的 TCP 或者 UDP 协议。但是在无线传感器网络的内部是不能采用这些传统协议的,这是因为传感器节点的能源和内存资源都非常有限,它需要一系列代价较小的协议。

5) 应用层

应用层根据应用的具体要求不同,可以添加不同的应用程序,包括一系列基于监测任务的应用软件。

管理平台包括能量管理平台、移动管理平台和任务管理平台。这些管理平台分别用来监控无线传感器网络中能量的利用、节点的移动和任务的管理。它们可以帮助传感器节点在较低的能耗前提下协作完成某些监测的任务。管理平台可以管理一个节点怎样使用它的能量。例如,一个节点接收到它的一个邻近节点发送过来的消息之后,它就把它接收器关闭,避免收到重复数据。同样,一个节点的能量太低时,它会向周围节点发送一条广播消息,以表示自己已经没有足够的能量来帮助转发数据,这样它就可以不再接收邻居发送过来的需要转发的消息,进而把剩余能量用于自身消息的发送。移动管理平台能够记录节点的移动。任务管理平台用来平衡和规划某个监测区域的感知任务,因为并不是所有节点都要参与到监测活动中,在有些情况下,剩余能量较高的节点要承担多一点的感知任务,这时需要任务管理平台负责分配与协调各个节点的任务量的大小。有了这些管理平台的帮助,节点可以以较低的能耗进行工作,可以利用移动的节点来转发

数据,可以在节点之间共享资源等。

本节主要介绍无线传感器网络的通信与组网技术。通信部分主要位于无线传感器网络体系结构的最底层,包括物理层和 MAC 层两个子层,主要是解决如何实现数据的点到点或点到多点的传输问题,为上层组网提供通信服务,同时还需要满足无线传感器网络大规模、低成本、低功耗、稳健性等方面的要求。组网技术是通过无线传感器网络通信体系的上层协议实现的,以底层通信技术为基础,建立一个可靠的且功耗预算严格的通信网络,向用户提供服务支持。

1.2.2 物理层

物理层处于 OSI 参考模型的最底层,是整个开放系统的基础,向下直接与物理传输介质相连,实现数据流的传输。物理层的协议是各个网络设备进行互连时必须遵守的底层协议。设立物理层的目的是实现两个网络物理设备之间的二进制比特流的透明传输。它负责在主机之间传输数据位,为在物理介质上传输的比特流建立规则,以及确定需要何种传输技术在传输介质上发送数据。物理层对数据链路层屏蔽物理传输介质的特性,以便对高层协议有最大的透明性,但它定义了数据链路层所使用的访问方法。

无线通信的物理层通信协议研究主要集中在传输介质选择、传输频段选择、无线电收发器的设计和调制方式等方面,核心问题是能量有效性或节省能量。

目前无线传感器网络使用的传输介质主要包括无线电波、红外线和光波等。无线电波是目前最主要的无线传感器网络传输介质,但需要解决频段选择、调制方式选择等问题。ISM(industrial, scientific and medical)频段已经被人们普遍采用,文献[6]给出了基于 433MHz 和 915MHz 这两个频段的无线电收发器的设计方法。ISM 频段的优点在于它是自由频段,无需注册,可选频谱范围大,并且在全球范围内都具有可用性;同时也没有特定的标准,给设计传感器节点的节能策略带来了更多的灵活性和空间。缺点主要是功率受限,另外与多种现有无线通信应用存在互相干扰问题。红外通信也无需注册,且受无线电设备的干扰较小。基于红外线的接收机成本更低,也更容易设计。主要缺点是穿透能力差,要求发送者和接收者之间存在视距关系。这就导致了红外线难以成为无线传感器网络的主流传输介质。光学介质传输不需要复杂的调制解调机制,传输功率小,但也同样存在视距限制。

传输频段选择时需要考虑的主要问题是:

(1) 在公共 ISM 频段,由于没有使用的限制,任何一个系统都会受到来自这个频段中其他系统的干扰,这些系统可能使用相同的或不同的技术。例如,许多系统共享 ISM 的 2.4GHz 波段,包括 IEEE 802.11b^[7,8], 蓝牙^[9] 以及 IEEE

802.15.4 的 WPAN^[10]等,这些系统在同一频段内共存。因此,在这个频段中的所有系统必须具有抵抗来自其他系统干扰的稳健性,否则就不能正常工作。要实现共存则需要在系统的物理层和 MAC 层做适当的处理^[11]。而且,向无线电频谱管理机构为某个特定的无线传感器网络单独申请一段频谱范围,也往往是不容易的。

(2) 天线效率(antenna efficiency)是传输系统的一个重要参数,定义为辐射功率(radiated power)与天线输入总功率之比。通常较小的无线传感器节点使用较小的天线。例如,频率为 2.4GHz 的无线电信号波长为 12.5cm,比传感器节点的直径要长得多。一般来说,当天线的尺寸比波长小时,要实现一个高效率的天线是很困难的。随着天线效率的降低,要得到一定的辐射功率,就必须为天线提供更多的能量。这些问题在参考文献^[12]中进行了详细的讨论。

调制和解调技术是无线通信系统的关键技术之一。调制通过改变高频载波的幅度、相位或频率,使其随着基带信号幅度的变化而变化。解调是将基带信号从载波中提取出来以便预定的接收者(信宿)处理和理解的过程。调制对通信系统的有效性和可靠性有很大的影响,它使得信号和信道相匹配,增强电波的有效辐射,以便频率分配,减少信号干扰。所以,采用何种方法调制和解调往往在很大程度上决定着通信系统的质量。

扩频通信技术是指一种信息的传输方式,其信号所占有的频带宽度远大于所传信息所必需的最小带宽;频带的扩展是通过一个独立的码序列来完成,用编码及调制的方法来实现,与所传数据信息无关;在接收端用同样的码进行相关同步接收,解扩和恢复所传信息数据。

扩频技术的优点包括:易于重复使用频率,提高了无线频谱利用率;抗干扰性强,误码率低;隐蔽性好,对各种窄带通信系统的干扰很小;可以实现码分多址;抗多径干扰;能精确地定时和测距;适合数字语音和数据传输,以及开展多种通信业务;安装简便,易于维护。对于无线传感器网络来说,选择适当的调制解调和扩频机制是实现可靠通信传输的关键。

1.2.3 MAC 层协议

媒体介质访问控制(media access control, MAC)协议处于无线传感器网络协议的底层部分,主要用于在传感器节点间公平有效地共享通信媒介,对无线传感器网络的性能有较大影响,是保证无线传感器网络高效通信的关键网络协议之一。无线传感器网络的性能如吞吐量、延迟性能等完全取决于所采用的 MAC 协议。

无线传感器网络的强大功能是由众多节点协作实现的,多个节点间的通信需要 MAC 协议协调其间的无线信道分配。在设计一个无线传感器网络的 MAC 协

议时,应该考虑以下几个方面:

(1) 节省能量。每个传感器节点由电池供电,受环境和其他条件的限制,节点的电池能量通常难以进行补充。MAC 协议能够解决单节点的节能问题,即让传感器节点尽可能的处于休眠状态,以减少通信时的能耗。

(2) 可扩展性。无线传感器网络中的节点在数目、分布密度和位置方面很容易发生变化,或者由于节点能量耗尽及新节点的加入引起的网络拓扑结构的变化。设计 MAC 协议时也应具有可扩展性,以适应拓扑结构的动态性。

(3) 网络效率。网络效率包括网络的公平性、实时性、网络吞吐量、低接入时延(即数据分组到达与初次发送该分组的时间间隔)、低发送时延(即数据分组到达与成功发送之间的时间间隔)以及较小的开销等。

传感器节点无线通信模块的状态包括发送、接收、侦听和休眠四种状态,目前的 MAC 协议在降低功耗方面主要集中在增加节点的休眠时间,减少节点对信道的侦听。目前针对不同的无线传感器网络应用,研究人员从不同的方面提出了多种 MAC 协议。

1. 基于竞争的 MAC 协议

基于竞争的 MAC 协议采用按需使用信道的方式,基本思想是当节点需要发送数据时,通过竞争方式使用无线信道,如果发送的数据产生了碰撞,就按照某种策略重发数据,直到数据发送成功或放弃发送。多数分布式 MAC 协议采用载波侦听或冲突避免机制并附加信令控制消息来处理隐藏和暴露节点问题。

1) IEEE 802.11 MAC 协议^[13]

该协议采用带冲突避免的载波侦听多路访问(carrier sensor multiple access with collision avoidance, CSMA/CA)是典型的基于竞争的 MAC 协议。基于 CSMA/CA 的 MAC 协议主要应用于无线局域网。IEEE 802.11 MAC 协议是在分布式协调(distributed coordination function, DCF)工作模式下的一种协议。在 DCF 工作模式下,节点在侦听到无线信道忙之后,采用 CSMA/CA 机制和随机退避算法,实现无线信道的共享。

2) S-MAC 协议^[14]

S-MAC(sensor-MAC)协议是较早针对无线传感器网络节省能量需求而提出的一种 MAC 协议,S-MAC 协议采用了低占空比的周期性睡眠/侦听,为了使 S-MAC 协议具有良好的扩展性,在覆盖网络中形成众多不同的虚拟簇。对于无线信道,传输差错与包长度成正比,短包成功传输的概率要大于长包成功传输的概率。在 S-MAC 协议中消息传递技术将长包分成若干短包,利用 RTS/CTS 握手机制,一次性发送整个长包,这样既提高了发送成功率,又减少了控制消息。流量自适应侦听机制:传感器节点在与邻居节点通信结束后不立即进入睡