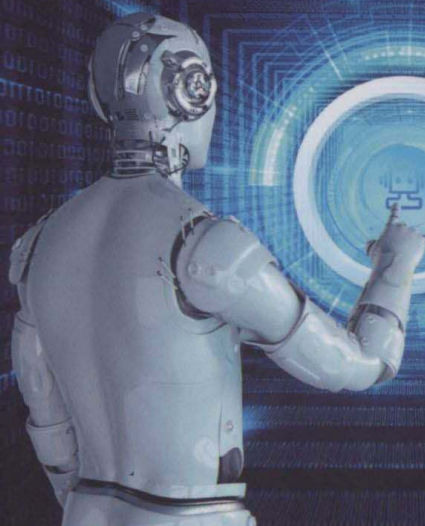




智 / 能 / 感 / 知 / 技 / 术 / 丛 / 书

无线传感器网络的 低功耗共存技术

郑霄龙 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



智 / 能 / 感 / 知 / 技 / 术 / 丛 / 书

无线传感器网络的 低功耗共存技术

郑霄龙 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书系统地介绍了无线传感器网络低功耗共存技术的各个方面。全书内容包含8章,包括无线传感器网络概述、无线共存、共存环境下的低功耗能量管理方法、共存环境下的介质访问控制协议设计、共存环境下的数据分发协议设计、跨技术通信,以及对未来共存技术发展的展望。

本书既包含无线传感器网络的基础知识,又包含当前热门的无线共存技术。本书从共存问题缘由分析出发,介绍针对共存问题的代表性工作和跨技术通信等前沿技术,深入浅出。

本书适合作为无线传感器网络协议设计相关领域的高年级研究生、科研人员和实践工程师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络的低功耗共存技术 / 郑霄龙编著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2022. 7
ISBN 978-7-5635-6634-1

I. ①无… II. ①郑… 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(2022)第 064185 号

策划编辑: 姚 顺 刘纳新 责任编辑: 满志文 责任校对: 张会良 封面设计: 七星博纳

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码: 100876

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 唐山玺诚印务有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 7.5

字 数: 196 千字

版 次: 2022 年 7 月第 1 版

印 次: 2022 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-6634-1

定 价: 36.00 元

· 如有印装质量问题, 请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

智能感知技术丛书

顾问委员会

宋俊德 彭木根 田 辉 刘 亮 郭 斌 王卫东

编 委 会

总主编 邓中亮

编 委 周安福 郑霄龙 刘 杨

赵 东 张佳鑫 范绍帅

崔高峰

总策划 姚 顺

秘书长 刘纳新

前 言

人类从未停止过对物理世界的观测与探索。为了衔接物理世界和数字世界,多样化的传感器不断被设计和研发。为了满足智能化感知的需求,随着电子技术和无线技术的发展,无线传感器网络(Wireless Sensor Network)迅速发展,广泛应用在农业监控、环境监控、入侵检测、火灾监测、智能建筑等物联网应用系统。低功耗、自组织运行的分布式传感器网络可以在单节点失效的情况下保持正常的运行,大大降低了网络的部署和维护成本。无线传感器网络的蓬勃发展,极大地拓展了对物理世界的感知范围,是实现泛在智能感知的有效手段。

目前无线传感器网络的研究工作在网络拓扑规划与控制、协议设计等方面都已经产生了较为丰富的研究成果。但是随着物联网的不断发展,多样化的无线技术不断地被提出。例如WiFi、蓝牙等常见的无线技术均与无线传感器网络运行在同样的频段上,当部署在同一物理空间,就会不可避免地形成共存问题。共存在同一物理空间的多制式无线技术彼此无法感知到彼此的存在,无法解码彼此的信息,导致无线传感器网络的运行面临能效失控、传输失效的严重问题。这些问题促使研究人员在无线传感器网络各方面进行新的研究和设计,提出共存技术,使无线传感器网络在共存环境下能正常运行工作。

本书就是瞄准无线传感器网络共存这一问题,面向研究人员介绍低功耗共存技术的前沿进展。本书较为系统地介绍了无线传感器网络面临的共存问题的由来和挑战,并针对低功耗能量管理方法、介质访问控制协议设计、数据分发协议设计展开代表性共存技术的介绍,同时对跨技术通信等前沿技术进行介绍。

全书从结构上共分为8章。第1章是无线传感器网络概述,详细地介绍了无线传感器网络的体系结构、节点、协议栈,并简述了无线传感器网络的发展历史和典型应用。

第2章介绍无线传感器网络面临的无线共存问题。首先介绍无线传感器网络遵循的IEEE 802.15.4标准,然后介绍共存在2.4 GHz频段上的其他无线技术,并进一步讨论无线共存问题的由来和挑战。

第3章介绍共存环境下的低功耗能量管理方法设计。首先介绍现有低功耗能量管理方法和其在共存环境下面临的能效失控的严重问题。进而,针对观察到的问题,介绍一种干扰免疫的低功耗能量管理技术,包括基于短时能量序列的有效传输识别方法和低功耗运行方法,并介绍该方法在真实环境中的性能。

第4章介绍共存环境下的MAC协议设计。首先介绍无线传感器网络MAC协议设计需要考虑的设计特点,并对面向数据汇聚收集的MAC协议进行总结和介绍,讨论共存干扰对MAC协议带来的影响。进而,介绍一种基于信道相关性的跳频传输方法,包括共存环境下信



道相关性模型和基于信道相关性的层级式跳频传输方法。

第 5 章介绍共存环境下的数据分发协议设计。首先介绍常见的数据分发应用和现有的数据分发协议及常见的技术,然后介绍一种基于选择性洪泛的数据分发技术。

第 6 章介绍共存环境下的抗干扰跨技术通信。首先介绍跨技术通信原理,并分析其在共存环境下面临的挑战。然后,介绍一种抗干扰的跨技术通信方法。

第 7 章介绍面向共存环境下低功耗无线网络的跨技术机会转发。首先分析共存环境中跨技术干扰的影响和利用异质网元实现跨技术转发的优势。然后,介绍一种基于跨技术通信的跨技术机会转发方法,将跨技术干扰转变为数据转发的协作者。

第 8 章对本书进行总结,并对无线共存技术的发展进行展望。

在本书的写作过程中,得到了许多老师和同学的帮助和指正,也得到了北京邮电大学出版社的鼎力相助,在此谨表谢意。由于时间仓促和撰写水平有限,书中的不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 无线传感器网络概述	1
1.1 无线传感器网络体系结构	1
1.1.1 无线传感器网络的基本结构	1
1.1.2 无线传感器网络体系结构	2
1.1.3 无线传感器网络的特点	3
1.2 无线传感器网络节点	4
1.2.1 无线传感器网络节点的组成结构	4
1.2.2 常见的无线传感器网络节点平台	5
1.3 无线传感器网络协议栈简介	6
1.3.1 物理层	7
1.3.2 数据链路层	7
1.3.3 网络层	8
1.3.4 传输层	8
1.3.5 应用层	9
1.3.6 管理层面	9
1.4 无线传感器网络的发展历史	9
1.5 无线传感器网络的应用	10
本章参考文献	10
第 2 章 无线共存	12
2.1 IEEE 802.15.4 标准概述	12
2.2 运行在 2.4 GHz 频段的常见无线技术	13
2.2.1 WiFi 协议/IEEE 802.11	13
2.2.2 蓝牙协议/IEEE 802.15.1	13
2.2.3 其他无线技术	14
2.3 无线共存问题的由来	14
2.4 无线共存带来的挑战	15
第 3 章 共存环境下的低功耗能量管理方法设计	17
3.1 无线传感器网络低功耗设计的必要性	17
3.2 现有的低功耗能量管理模式	17
3.2.1 低功耗监听	18
3.2.2 低功耗探测	18



3.3	共存干扰对低功耗能量管理模式的影响	18
3.3.1	对低功耗监听模式的影响	18
3.3.2	对低功耗探测模式的影响	19
3.4	干扰免疫的无线传感器网络低功耗技术	20
3.4.1	工作流程概览	20
3.4.2	采样和分割	22
3.4.3	短时能量序列特征提取	22
3.4.4	基于短时能量序列的有效 ZigBee 传输识别	25
3.4.5	理论性能分析	29
3.4.6	技术实现	31
3.4.7	实际性能评估	32
	本章参考文献	37
第 4 章	共存环境下的 MAC 协议设计	38
4.1	无线传感器网络 MAC 协议设计特点	38
4.1.1	公平性	38
4.1.2	能耗	38
4.1.3	低延迟	39
4.1.4	可靠性	39
4.1.5	可扩展性	39
4.2	无线传感器网络面向数据收集的 MAC 协议简介	39
4.2.1	基于信道竞争的 MAC 协议	39
4.2.2	基于时分复用的 MAC 协议	41
4.2.3	基于频分复用的 MAC 协议	42
4.3	共存干扰对 MAC 协议的影响	43
4.3.1	对基于竞争的 MAC 协议的影响	43
4.3.2	对无竞争的 MAC 协议的影响	43
4.4	共存环境下的信道相关性	43
4.4.1	信道相关性测量	43
4.4.2	无线共存环境下信道相关性的产生原因	44
4.4.3	信道相关性建模	45
4.5	基于信道相关性的跳频传输技术	46
4.5.1	层级式的跳频传输方法	46
4.5.2	基于信道相关性的信道选择方法	47
4.5.3	轻量级的信道协商机制	48
4.5.4	实际性能评估	49
	本章参考文献	54
第 5 章	共存环境下的数据分发协议设计	56
5.1	常见的无线传感器网络数据分发协议简介	56



5.1.1 数据分发协议的要求	56
5.1.2 基于泛洪的数据分发协议	57
5.1.3 基于协商的数据分发协议	57
5.2 分发协议的常用技术	58
5.2.1 数据分块技术	58
5.2.2 流水线技术	58
5.2.3 编码技术	59
5.2.4 现有数据分发协议在共存环境下的不足	59
5.3 基于选择性泛洪的数据分发协议设计	60
5.3.1 现有数据分发协议的性能分析	60
5.3.2 选择性协商机制的完成时间建模分析	61
5.4 选择性泛洪的数据分发协议设计	64
5.4.1 基于模型的最优策略选择方法	64
5.4.2 节点状态转移设计	65
5.4.3 技术实现	65
5.5 实际性能评估	67
本章参考文献	73
第 6 章 共存环境下的抗干扰跨技术通信	74
6.1 概述	74
6.2 相关工作	76
6.3 共存干扰对 CTC 的影响分析	76
6.4 系统设计	77
6.4.1 抗干扰的编码机制——iCoder	78
6.4.2 基于干扰感知的解码机制——iDecoder	79
6.5 实验评估	83
6.5.1 实验设置	83
6.5.2 整体性能评估	84
6.5.3 参数估计精确性评估	84
6.5.4 干扰消除的准确性评估	85
6.5.5 符号窗口长度的影响	86
6.5.6 干扰速率的影响	86
6.5.7 距离的影响	88
6.6 总结	89
本章参考文献	89
第 7 章 低功耗无线网络的跨技术机会转发	92
7.1 概述	92
7.2 相关工作	94
7.3 研究动机	95



7.3.1	跨技术干扰对低功耗机会转发的影响	95
7.3.2	未被充分利用的跨技术干扰	95
7.4	系统设计	97
7.4.1	系统架构	97
7.4.2	跨技术转播	98
7.4.3	转发协议	98
7.4.4	ACK 应答(ACK Replying)	101
7.5	实验评估	102
7.5.1	实验设置	102
7.5.2	跨技术转发节点上下行链路性能评估	102
7.5.3	真实场景的性能评估	104
7.5.4	睡眠周期对系统性能的影响	104
7.5.5	包传输速率对系统性能的影响	105
7.5.6	对传统 WiFi 流量的影响	105
7.6	总结	106
	本章参考文献	107
第 8 章	总结与未来发展趋势展望	109

第 1 章

无线传感器网络概述

人类从未停止对物理世界的观测与探索。随着信息技术的发展,传感器成为连接物理世界和信息世界的桥梁,对物理世界多样化的物理现象和广泛的物理量实现了感知和监测,并将这些信息数字化,以便后续的计算、存储和使用。无线技术和微电子系统等技术的发展,推动了低功耗无线传感器的发展,使得微型、低功耗、廉价的无线传感器成为可能。这些可执行计算的传感器通过无线通信技术互联,形成无线传感器网络^①(Wireless Sensor Network, WSN),能够系统化地监测一个区域内人们感兴趣的物理世界信息。通过无线通信,无线传感器网络可以部署在人迹罕至以及恶劣的野外环境中。集成了传感器、数据处理单元和无线通信模块的无线传感器网络节点^②通过自组织的形式形成多跳网络,搭配不同的传感器,就可以探测包括温度、湿度、振动、空气质量、气体浓度、土壤成分、光强、压力等众多物理世界的信息。因此,无线传感器网络在军事、应急、环境监测、农业、林业、交通运输、医疗、工业等诸多领域具有广阔的应用空间。

1.1 无线传感器网络体系结构

1.1.1 无线传感器网络的基本结构

无线传感器网络的基本结构如图 1-1 所示,通常由普通无线传感器网络节点(node)、汇聚节点(sink)、互联网组成。在监控区域,部署着众多无线传感器网络节点,彼此之间通过无线通信的方式进行互联,自组织形成无线网络。每一个节点将感知到的感知数据回传到汇聚节点,汇聚节点将数据传输到互联网远端的管理者,并面向用户提供服务。为了协助汇聚节点接入互联网,通常还会使用一台主机或互联网接入模块与汇聚节点互联,在互联网和无线传感器网络之间进行数据转发。

① 本书如无特殊说明,“无线传感器网络”简称为“传感器网络”或“传感网”。

② 本书如无特殊说明,“无线传感器网络节点”简称为“传感器节点”或“节点”。

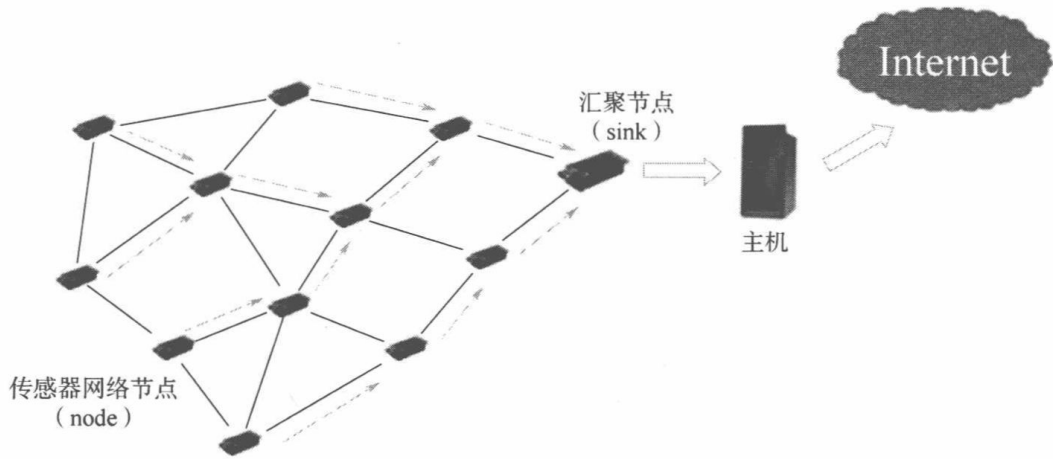


图 1-1 无线传感器网络的基本结构

作为物理世界的感知者和数据的采集者,传感器节点广泛分布在监测区域,通过搭载不同的传感器,实现多样化的数据采集能力。由于无线传感器网络通常采用多跳的网络传输,所以每个节点也可以作为其他节点的转发节点(relay node),为其他节点转发感知数据。

汇聚节点(sink)又称为基站节点(base station),是无线传感器网络的网关节点,负责将网络中每个节点的感知数据转发到互联网上。一个传感器网络中可以有一个或多个汇聚节点。汇聚节点可以采用串口与主机通信,利用主机的联网能力将数据上传到服务器,也可以采用如WiFi、移动运营商网络等网络将数据上传到服务器。

1.1.2 无线传感器网络体系结构

早期的传感器网络使用过 IEEE 802.11 协议标准来作为通信方法。虽然 IEEE 802.11 的通信能够提供较高的带宽,但是其能耗对于低功耗的无线传感器网络而言过大。因此,IEEE 802.15.4 协议标准应运而生。IEEE 802.15.4 是专门针对低功耗无线传感器网络的短距离通信需求提出的协议标准,被广泛地采用。

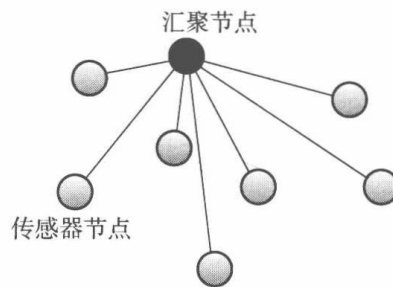


图 1-2 星形拓扑结构(单跳传输)

传感器网络为了保证低功耗,其节点传输距离通常非常有限。在较大范围内部署时,节点难以直接连接到汇聚节点,无法形成如图 1-2 所示的星形拓扑结构。因此,传感网通常采用多跳传输并形成网状拓扑结构(mesh topology)。为了可靠高效地通过多跳传输数据到汇聚节点,路由协议必不可少。通常路由协议将构建出如图 1-3 所示的树形网络结构。当然,如果传感器网络应用在较小的环境中,每个节点都可以直接跟汇聚节点通信,网状拓扑也可以自动变成星形拓扑结构。

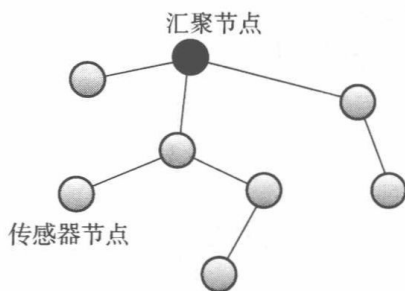


图 1-3 树形网络结构(多跳传输)

除了平面化的网状拓扑结构,也有一些传感网构建层级化的网络拓扑结构。比如图 1-4 所示的基于簇(cluster)的层级化网络结构,每个簇有一个簇头(cluster head)与汇聚节点相连通信,其他传感器节点属于某一个簇并与簇头进行通信,由簇头转发其数据到汇聚节点。簇头除了为本簇内的节点转发,还可以与其他簇头进行通信,转发其他簇头的的数据。

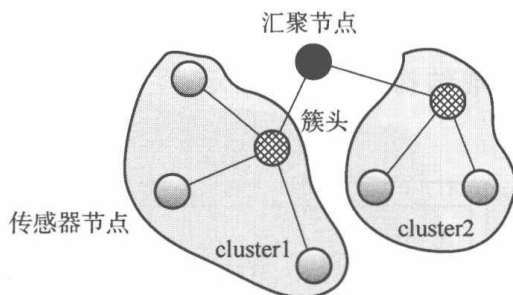


图 1-4 基于簇的层级化网络结构

1.1.3 无线传感器网络的特点

在无线传感器网络中,将传感器节点部署在人迹罕至的监控环境是非常常见的。比如在火山监控中,部署环境非常不稳定且恶劣,管理人员难以到达现场进行维护。因此,与传统的无线网络系统相比,无线传感器网络具有以下突出特点。

(1) 大规模。与例如无线局域网的无线网络系统期望覆盖网络的最后一跳不同,无线传感器网络是面向一个应用目标,部署在目标区域,形成一个自组织的独立网络系统。而由于传感器节点的通信距离有限,当应用的待监控区域较大时,部署的传感器节点可能会非常多,使网络规模变得非常大。

(2) 自组织网络。无线传感器网络是通过网络内的节点之间相互协同,实现自组织和自管理的网络。因此,网络需要具有自修复能力,当网络部分节点或局部区域失效时,能够自行恢复,形成新的网络继续执行监测任务。

(3) 长期运行。一般来说,无线传感器网络期望部署后,在下次维护前能够工作足够长的时间而不失效。过短的生命周期会导致较差的可用性,限制应用场景。

(4) 有限资源。传感器节点通常是有电池供电的,电能有限。通常不能搭载高性能的计算模块,也不能使用大存储空间的存储模块。因此,计算性能和数据存储空间都是受限的。

(5) 低功耗。由于电能有限,又要运行足够长的时间,传感器节点通常都需要低功耗运行。除了选用低功耗的器件外,还需要采用低功耗的运行模式。较为耗能的模块会采用周期性工作的模式。比如,无线通信模块比较耗能,传感器节点会在大部分时间关闭无线通信模块,周期性地唤醒接收数据,保障低能耗。



(6) 动态网络。传感器网络是自组织网络,点和点之间的连通性是动态变化的。因此,传感器网络的拓扑也是不断变化的。此外,外界环境的变化也会影响网络的稳定性,使传感器网络具有较大的动态性。

1.2 无线传感器网络节点

无线传感器网络节点是传感器网络的组成单元,是实现物理世界感知的终端,是其他节点的数据转发者。根据这些功能角色,传感器节点需要具备感知、计算、通信能力。本节将介绍传感器节点的结构和特点,以及常见的传感器节点硬件平台。

1.2.1 无线传感器网络节点的组成结构

无线传感器节点的基本组成结构如图 1-5 所示,主要包括了四个部分:感知、通信、处理、供电模块。

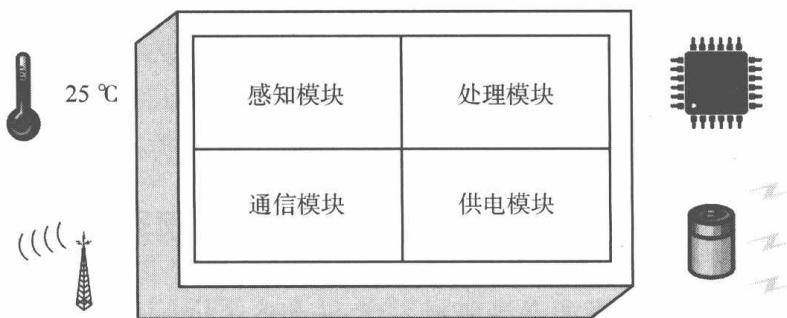


图 1-5 无线传感器网络节点的基本组成结构

感知模块主要由传感器和模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)组成。感知模块通过传感器感知特定的信息,并通过 ADC 将感知到的模拟信息转换为数字信号,便于进一步存储、计算和传输。

处理模块通常是微控制器(Microcontroller Unit, MCU),具备数据处理等计算处理能力,负责协调控制节点各部分的运行。考虑到传感器网络的低功耗特性,通常选用低功耗的 MCU,比如 TI 公司的 MSP430 系列超低功耗处理器。

通信模块采用遵循如 IEEE 802.15.4 通信标准的低功耗、短距离无线通信模块,负责与其他传感器节点进行通信,完成数据的收发、转发功能。比较常见的通信模块有 Chipcon 公司的 CC2420、CC2520、CC1000 等。

供电模块为以上功能模块提供能量供应。目前常见的无线传感器网络节点通常采用 AA 型电池供电。在一些应用系统中,也有使用太阳能发电配合蓄电池等其他方式作为能量供应的补充手段。

除了上述的基本模块之外,视传感器网络的应用不同,还会添加其他辅助功能模块。比如 GPS 定位模块可以用于需要精确地理位置的监测数据获取应用,扩展存储模块用于扩大节点的数据本地存储能力。



1.2.2 常见的无线传感器网络节点平台

目前常见的无线传感器网络节点平台主要包含以下几种,详细的介绍可以参考综述文章^[1]。

1. Mica 系列节点平台

Mica 系列平台包括 Mica、Mica2、MicaZ 节点。Mica 系列是 Crossbow 公司生产的。图 1-6 所示的是 Mica2 节点平台,是 Crossbow 公司生产的第三代传感器节点平台,搭载了主频为 8 MHz 的 Atmel AVR 微控制器,具有 4 KB 的 RAM 和 128 KB 的可编程 Flash 存储空间,使用了 Chipcon 公司的 CC1000 无线通信模块,可以运行在 433 MHz 和 916 MHz 频段上。当使用最大传输功率时,无线通信模块的功耗为 27 mA,当无线模块睡眠时,功耗小于 1 μ A。

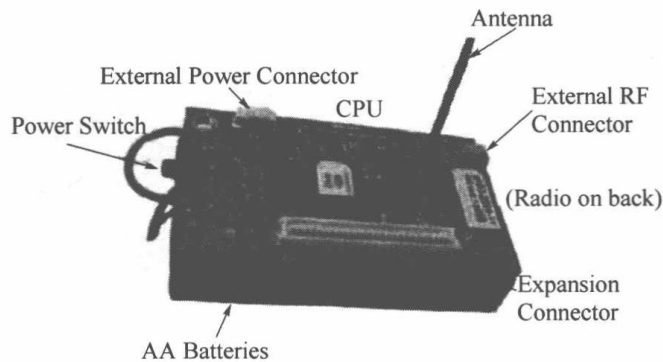


图 1-6 Mica2 节点平台

2. TelosB 节点平台

TelosB 节点是由 UC Berkeley 大学研发的专门针对无线传感器网络的节点硬件平台,如图 1-7 所示。TelosB 节点搭载了 16 bit 的 MSP430F1611 低功耗处理器,具有 10 KB 的 RAM 和 16 KB 的 EEPROM 存储。TelosB 节点使用了 Chipcon 公司提出的符合 IEEE 802.15.4 协议标准的 CC2420 作为无线通信模块,运行在 2.4 GHz 频段上,能够提供 250 kbit/s 的传输速率。当使用最大传输功率时,无线通信模块的能耗为 23 mA,空闲模式的能耗仅为 21 μ A,睡眠模式下,功耗可降为 1 μ A。提供 USB 接口用于串口数据获取和编程,方便开发者调试和使用。

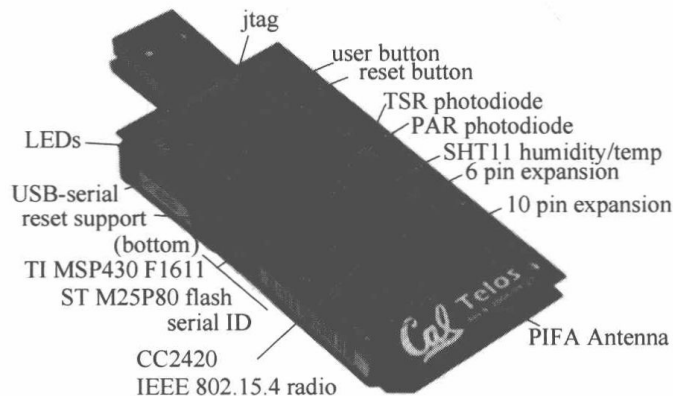


图 1-7 TelosB 节点平台



3. IMote/IMote2

IMote 和 IMote2 节点平台是由 Intel 公司开发的无线传感器网络节点平台。图 1-8 所示为 IMote2 节点平台的正面和背面。IMote2 集成了 PXA271XScale CPU 和 Chipcon 公司的 CC2420 无线模块。节点具有 32 MB 的 Flash 存储和 32 MB 的 SDRAM 存储,可以运行 Linux 内核。IMote2 节点还采用了 DSP(Digital Singal Processor),可以支持视频处理操作。IMote2 提供了包括 I2C、两个串口 SPI、3 个 UART、USB 接口、红外接口、摄像头接口等多种 I/O 接口,能够灵活地支持不同类型的传感器。IMote2 可以使用 AAA 电池供电,也可以采用充电电池。当处理器低频运行(13 MHz)时,可以降低运行电压到 0.85 V,保持低功耗;当需要高性能计算时,处理器主频可以增至 416 MHz。

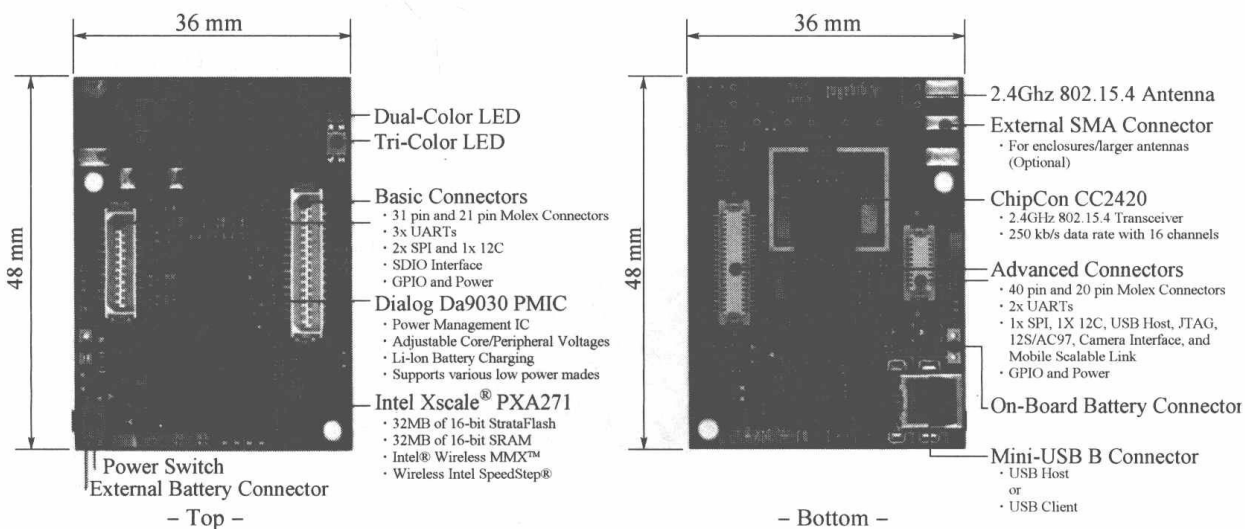


图 1-8 IMote2 节点平台

1.3 无线传感器网络协议栈简介

无线传感器网络协议栈模型既参考了现有的 OSI 标准模型和 TCP/IP 模型,也考虑了无线传感器网络特有的特性。如图 1-9 所示,无线传感器网络协议栈模型主要包括物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层,并包括能量管理、移动管理和任务管理三个管理层面。

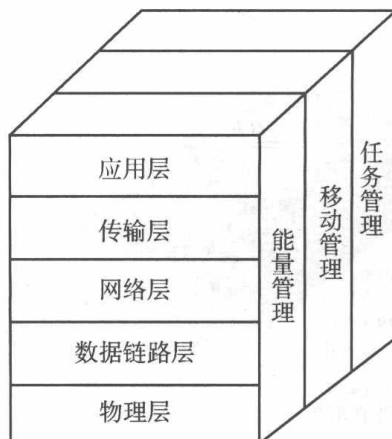


图 1-9 无线传感器网络协议栈模型

1.3.1 物理层

传感器网络的物理层提供健壮的信号调制和无线收发技术,并规范无线通信的工作频段、数据调制、信道编码等,负责产生载波信号等工作。物理层的设计直接影响传输能耗,通常需要考虑低成本、低功耗的设计原则。

图 1-10 所示为无线传感器网络物理层通信模块框图。待传输数据首先通过信道编码模块,通过预先定义的编码模式或增加冗余数据,来增强数据对噪声和干扰的抵抗能力。在信号失真时,信道编码可以帮助识别错误并恢复原始数据。编码后的符号(symbol)通过调制器(modulator)将基带信号调制到载波信号。通过将低频基带信号调制到高频载波信号上,可以降低使用的天线尺寸。调制后的载波信号通过功率放大器,使用天线转换为电磁信号发射出去。

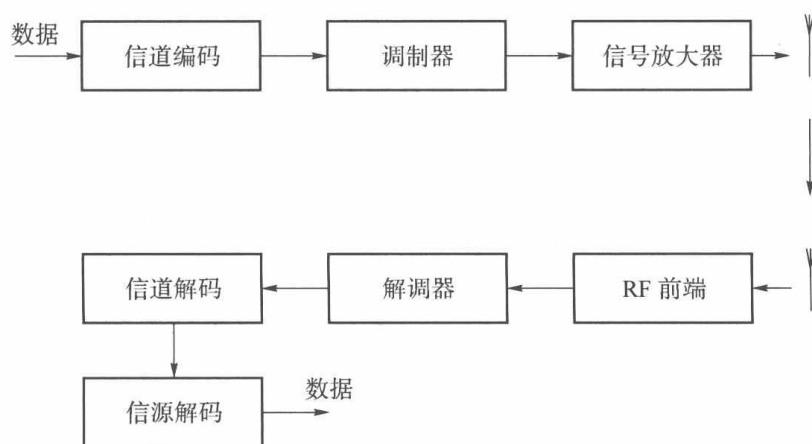


图 1-10 无线传感器网络物理层通信模块框图

接收端通过接收天线对特定载波频率上的信号进行耦合,捕获信号。然后通过滤波器、放大器等接收电路对接收信号整形,通过解调器提取基带信号。解调后的基带信号将通过信道解码和信源解码器,提取出原始信息的数据比特。

1.3.2 数据链路层

数据链路层主要负责数据成帧、帧检测、差错校验和媒体访问控制(Medium Access Control, MAC)。由于无线信道广播的特性,任何无线信号都可以被其他节点捕获到,环境噪声、多点冲突等现象无法避免。但是过多的冲突和干扰会导致大量的传输失效,影响网络性能,且损害能量效率。如果冲突过多,为了保障传输可靠性,数据重传将难以避免,这会导致耗能较高的无线通信模块一直处于工作状态,降低能量效率。因此,在数据链路层,如何设计一个 MAC 协议高效地协调多个节点对于共享的信道资源的使用请求,对于无线传感器网络的性能至关重要。

传感器节点的无效能耗主要来自空闲侦听(idle listening)。由于节点并不知道有效数据何时会产生或从其他节点来,因此节点必须长时间处于工作状态,不断监听监测信道上是否有数据包发送过来。而无线收发模块在侦听状态的能耗与接收数据包的耗能相当,略小于最大发射功率下发包的能耗。这就导致节点一直处于较高的能耗状态,却没有收到有效的信息,造成能量浪费。因此,传感器网络的 MAC 协议通常采用低功耗醒睡(low-power duty cycling)