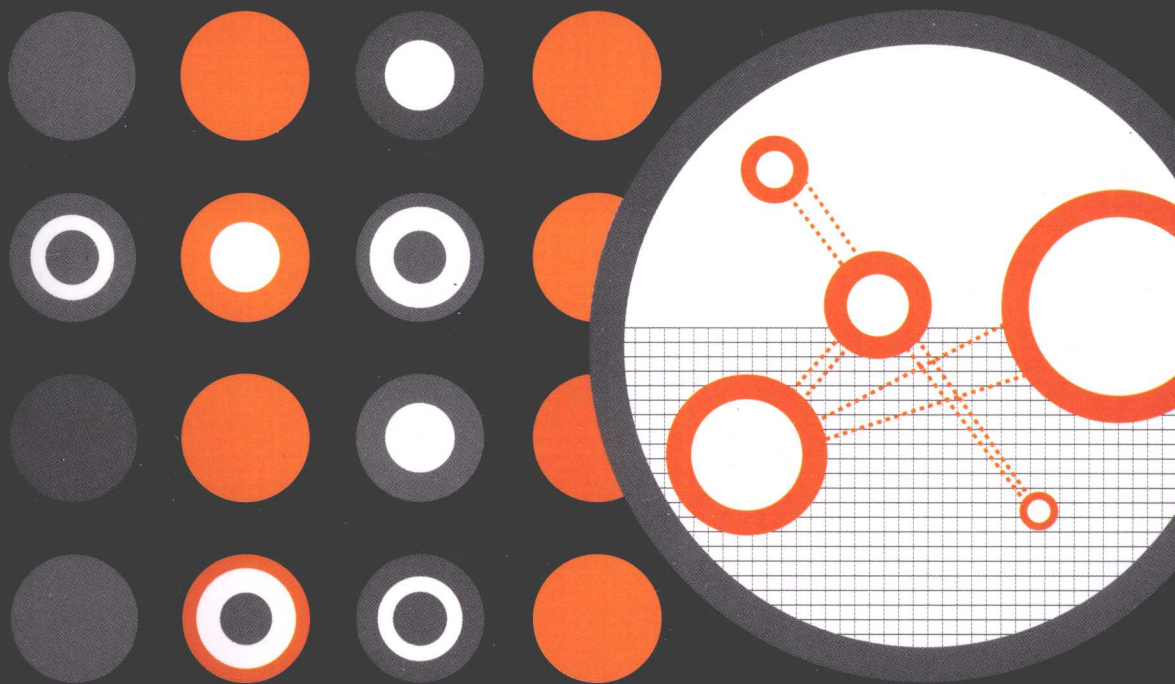


无线传感器 网络安全技术概论

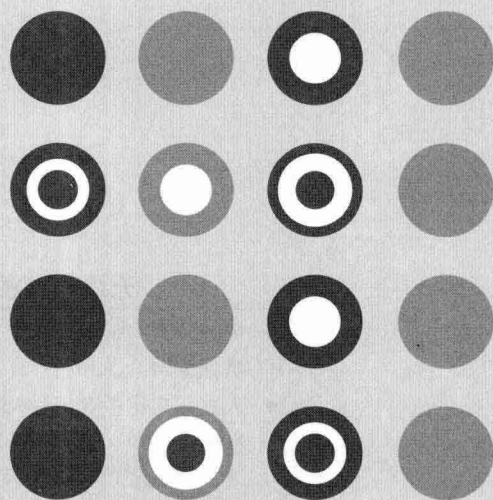
■ 沈玉龙 裴庆祺 马建峰 庞辽军 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

无线传感器 网络安全技术概论

■ 沈玉龙 裴庆祺 马建峰 庞辽军 编著



人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

无线传感器网络安全技术概论 / 沈玉龙等编著. --
北京: 人民邮电出版社, 2010. 8
ISBN 978-7-115-23232-8

I. ①无… II. ①沈… III. ①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107237号

内 容 提 要

本书系统地介绍了近几年来无线传感器网络安全技术相关方面的最新研究成果,在简单介绍无线传感器网络的基础上,从数据监测与收集、传感器网络数据传输和处理、传感器网络接入外部网络及服务提供3个环节,深入地分析了无线传感器网络面临的安全问题,阐述了解决这些问题基本思路和现有的相关技术。

本书内容丰富、覆盖面广,叙述深入浅出,既可以作为相关专业的研究生教材,也可以供对传感器网络安全技术感兴趣的广大技术人员参考。

无线传感器网络安全技术概论

- ◆ 编 著 沈玉龙 裴庆祺 马建峰 庞辽军
责任编辑 戴如梅
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 700×1000 1/16
印张: 15
字数: 285千字
- 2010年8月第1版
2010年8月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-23232-8

定价: 36.00元

读者服务热线: (010)67119329 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前 言

近年来无线传感器网络因其广泛的应用前景成为国内外广泛关注的焦点。无线传感器网络的重要性已经在各种预测、报告、文章和书籍中得到了比较充分的讨论。伴随着无线传感器网络的发展，其信息安全一直是研究的热点问题。

无线传感器网络的广泛应用前景使得人们对其抱有极大的期望，美国加州大学伯克利分校的大鸭岛环境监测以及香港科技大学主导的“绿野千传”，对大规模传感器网络应用起到了重要的促进作用。但是，由于其能量、计算、存储严格受限的基本特性及大规模网络的应用壁垒，目前无线传感器网络的应用离人们的期望还有相当大的距离。目前，对无线传感器网络研究的主要工作依然集中在网络搭建和技术验证阶段。无线传感器网络的安全问题是其大规模广泛应用的主要瓶颈之一。同时无线传感器网络作为物联网的重要组成部分，在各个环节均具有强烈的安全需求。

西安电子科技大学长期从事网络安全技术的研究，于2004年成立了无线传感器网络安全技术研究团队，开始系统地研究无线传感器网络的安全技术。随着传感器网络应用的不断深入，研究团队详细分析了大规模无线传感器网络面临的安全挑战，在身份认证、广播认证、访问控制、密钥管理、安全节点定位等方面提出了一系列的解决方案。

在本团队已有成果的基础上，本书从数据监测与收集、传感器网络数据传输和处理、传感器网络接入外部网络及服务提供三个环节，深入地分析了其面临的安全问题，系统、详细地阐述了解决这些问题的基本思路和现有的相关技术。总体上，本书涵盖了无线传感器网络安全技术的各个方面，内容丰富，既可以作为相关专业的研究生教材，也可以供对传感器网络安全技术感兴趣的广大技术人员参考。

本书受到国家“863”计划（2009AA01Z204）、国家自然科学基金项目（60633020，60803150，60803151，60874085）、国家自然科学基金委员会——广东省联合基金重点项目（U0835004）、陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目（SJ08F13）、中国博士后科学基金项目（20090451495、20090461415）以及中央高校基本科研业务费专项基金（JY10000903005）的资助。本书在编写过程中得到总参第六十一研究所的尹浩、徐启建、唐宏、吴作顺等同志，以及西安电子科技大学的冯海林、刘志宏等同志的精心帮助和指点，他们为本书的完成起到了重要的作用。

作 者

目 录

第一部分 概 述

第 1 章 分布式无线传感器网络综述	2
1.1 体系结构	2
1.2 传感器网络协议栈	5
1.3 网络特点	17
1.4 应用前景	18
参考文献	19
第 2 章 分布式传感器网络安全	22
2.1 传感器网络安全介绍	22
2.2 安全目标	26
2.3 传感器网络安全体系结构	28
2.4 传感器网络安全设计	29
参考文献	32

第二部分 无线传感器网络监测数据安全技术

第 3 章 无线传感器网络监测数据的可信性管理	39
3.1 信任管理及其分类	40
3.2 无线传感器网络中信任管理框架	42
参考文献	48
第 4 章 无线传感器网络数据安全的管理	50
4.1 分布式传感器网络数据管理的安全要求	50
4.2 无线传感器网络数据管理的安全体系结构	51
4.3 无线传感器网络数据管理的安全技术	52
参考文献	52

第 5 章 无线传感器网络恶意节点入侵检测	55
5.1 恶意节点入侵检测体系框架	55
5.2 入侵检测和策略算法	56
参考文献	58

第三部分 无线传感器网络安全技术

第 6 章 传感器网络安全协议	62
6.1 SNEP: 数据机密性, 认证, 完整性和新鲜度	63
6.2 μ TESLA: Authenticated Broadcast	67
6.3 SPINS 的实现	71
6.4 SPINS 的应用	74
参考文献	76
第 7 章 分布式传感器网络密钥分配和管理	79
7.1 安全管理	79
7.2 预共享密钥模式	80
7.3 随机密钥预分布模式	81
7.4 使用部署知识的密钥预分配模式	86
7.5 其他密钥管理和分配模型	95
7.6 无线传感器网络弹性分析	103
参考文献	112
第 8 章 分布式传感器网络广播认证协议	116
8.1 分层 μ TESLA	117
8.2 多基站分层 MM μ TESLA	137
参考文献	144
第 9 章 无线传感器网络安全支撑	147
9.1 分布式传感器网络管理体系结构	147
9.2 分布式传感器网络安全 MAC 协议	151
9.3 分布式传感器网络安全顽健的时间同步机制	153
9.4 分布式传感器网络安全定位	154
9.5 一种容忍攻击的传感器网络定位算法 AtLoc	169
参考文献	175

第 10 章 分布式传感器网络安全体系结构: TinySec	177
10.1 TinySec 综述.....	177
10.2 TinySec 的设计目标.....	178
10.3 TinySec 设计.....	179
10.4 安全设计.....	183
参考文献.....	185
第 11 章 TinyPK: 分布式传感器网络安全公钥技术	189
11.1 数据访问设计.....	189
11.2 数据访问执行.....	191
11.3 密钥交换.....	192
11.4 节点认证.....	193
参考文献.....	193
 第四部分 无线传感器网络与外网互联及业务提供的安全技术	
第 12 章 无线传感器网络接入 Internet 及服务提供	196
12.1 传感器网络接入 Internet 概述.....	196
12.2 传感器网络接入 Internet 体系结构.....	202
12.3 传感器网络服务提供方法.....	207
12.4 传感器网络接入 Internet 方法分析.....	211
参考文献.....	212
第 13 章 无线传感器网络访问控制机制	214
13.1 访问控制机制概述.....	214
13.2 基于单向密钥链的传感器网络访问控制机制.....	217
13.3 传感器网络访问控制机制的分析和比较.....	228
参考文献.....	231

第一部分 概述

无线传感器网络是能够自主实现数据采集、融合和传输的智能网络，它使得逻辑上的信息世界和真实的物理世界紧密结合，真正实现“无处不在的计算”模式。无线传感器网络具有广泛的应用前景，能够应用在军事国防、工农业控制、城市管理、环境监测、抢险救灾、反恐反恐、危险区域远程控制等诸多领域。由于无线传感器网络具有规模大、无人值守、资源严格受限等特性，因此在数据采集、数据传输、服务提供等环节面临巨大的信息安全挑战。

在研究无线传感器网络的各项安全技术之前，必须系统地了解传感器网络的基本知识以及安全需求和现状。本部分对无线传感器网络进行系统的概述。在此基础上，系统地阐述了无线传感器网络面临的安全需求、安全目标和安全体系结构。

在无线传感器网络概述方面，从传感器网络体系结构、传感器节点结构、协议栈结构、传感器网络特点和典型应用等方面勾勒出无线传感器网络的概貌，使读者对传感器网络有一个直观、感性的认识。

在无线传感器网络安全方面，主要针对传感器网络自身特性，阐述了无线传感器网络的安全需求、安全目标以及其对安全技术的特殊要求。针对传感器网络能量严格受限、节点数量较大的特点，阐述了无线传感器网络安全体系结构。在此基础上，分析了传感器网络各个网络层次面临的安全威胁以及相应的解决方法。

本部分的内容是理解后面 3 部分论述的无线传感器网络安全技术的基础。

第 1 章 分布式无线传感器网络综述

人类进入 21 世纪以来,微电子机械系统(MEMS, Micro-Electro-Mechanism System)、计算机、通信、自动控制和人工智能等学科的飞速发展孕育了一种新型的测控网络——无线传感器网络(WSNs, Wireless Sensor Networks)。

无线传感器网络是继因特网之后,对 21 世纪人类生活方式产生重大影响的热点技术之一。无线传感器网络理论和技术的研究受到世界各国的广泛关注。最早开始传感器网络技术研究的是美国军方。1978 年美国国防部高级计划局在卡耐基梅隆大学成立了新一代传感器网络工作组,此后又联合美国自然科学基金委员会设立多项传感器网络项目。这些研究推动了以网络技术为核心的新军事革命,诞生了网络中心战的思想。传感器网络是网络中心战体系中面向武器装备的网络系统,是 C4ISRT(Command, Control, Communication, Computing, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance and Targeting)的重要组成部分。在学术界,传感器网络最早的代表性论述出现在 1999 年,其中心思想为“传感器走向无线时代”。随后,在美国的移动计算和网络国际会议上,提出了传感器网络是下一个世纪面临的发展机遇。1999 年,美国《商业周刊》将传感器网络列为 21 世纪最具影响的 21 项技术之一。2003 年,《MIT 技术评论》在预测未来技术发展报告中,将其列为改变世界的十大新技术之一。同年,美国《商业周刊》在“未来技术专版”中发表文章指出,传感器网络是全球未来的四大高技术产业之一。2004 年《IEEE Spectrum》杂志发表专刊《传感器的国度》,论述传感器网络的发展和可能的广泛应用。

本章主要介绍分布式无线传感器网络的体系结构、节点的结构、协议栈的结构,以及无线传感器网络的特点和典型的应用,使得读者能够了解无线传感器的技术特点,为研究无线传感器网络的安全提供基础。

1.1 体 系 结 构

1.1.1 传感器节点结构

传感器网络节点有 4 个主要的组成部分:感测单元、处理单元、收发单元和

供电单元，如图 1-1 所示。

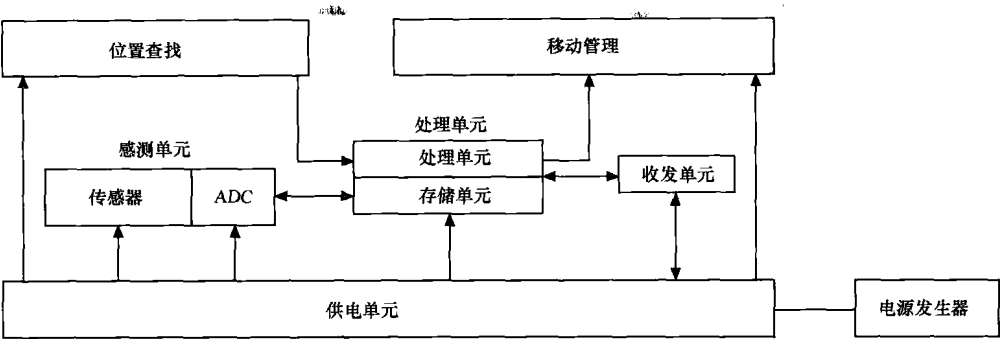


图 1-1 传感器节点结构

感测单元通常由传感器和模数转换器两个子单元组成。其中，传感器用于感测环境的模拟信号；模数转换器将其转换成数字信号，并传输给处理单元。处理单元管理程序使传感器节点和其他节点能够协作完成分派的任务。收发单元负责数据的发送和接收。电源确定传感器网络的生命周期，是传感器节点最重要的组件之一。另外，为了获取精确的位置以及对移动状态进行管理，传感器网络需要相应的应用支撑单元，包括位置查找和移动管理单元。

典型的传感器网络节点的体积较小，可能小于 1 cm^3 ，往往被部署在无人照看或者恶劣的环境中，无法更换电池，节点能量严格受限。目前典型的实用化传感器节点有加州大学伯克利分校研制的 Mica 系列、EYES、Medusa MK-2、Imote 等。各类节点采用的技术和性能指标见表 1-1。

表 1-1 典型传感器节点采用的技术和性能指标

节 点 类 型	Berkeley mote				EYES	Medusa MK-2	Imote
	WeC	Rene2	Dot	Mica			
CPU	AT90S8535		ATmeg a163	ATmega103	MSP 430F149	40MHz ARM THUMB	ARM core 12MHz
程序存储	8 kbyte		16 kbyte	128 kbyte	60 kbyte	1 Mbyte	512 kbyte
RAM	0.5 kbyte		1 kbyte	4 kbyte	2 kbyte	136 kbyte	64 kbyte
通信类型	RFM TR1000 916MHz			RFM TR1001 868.35 MHz		RFM TR1000 916 MHz	BT 2.4GHz
通信速率	10 kbit/s			10/40 kbit/s	115 kbit/s	115 kbit/s	100 kbit/s

1.1.2 传感器网络体系结构

典型的传感器网络通常包括传感器节点、汇聚节点和管理节点。随机部署在

监测区域内的大量传感器节点通过自组织方式构成网络。传感器节点的监测数据沿着其他节点逐跳传输，监测数据可能被多个节点处理，经过多跳后被路由到汇聚节点，最后通过互联网或者卫星到达管理节点和用户。管理节点对传感器网络进行配置和管理。传感器网络的体系结构如图 1-2 所示。

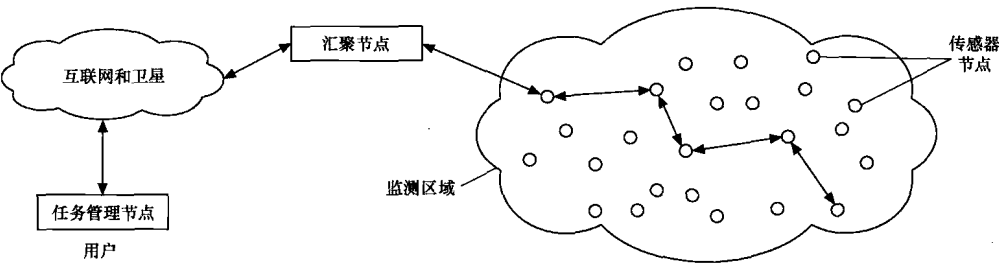


图 1-2 传感器网络的体系结构

无线传感器网络是以数据为中心的应用驱动型网络，其关键技术和具体的应用紧密相关，不同的应用场景其技术差别较大。目前，分布式传感器网络多为分簇形式，将传感器节点分成多个簇，每个簇中存在一个簇头节点，负责簇内的管理和数据的融合。分簇结构的分布式传感器网络的体系结构如图 1-3 所示。

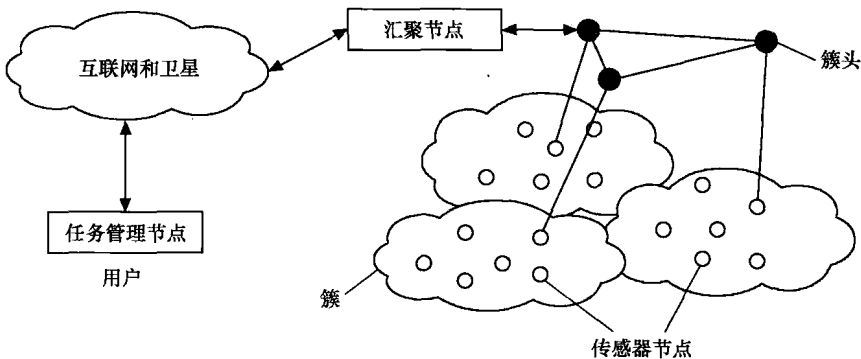


图 1-3 无线传感器网络分层体系结构

随着无线传感器的进一步发展，目前逐渐形成了以无线传感器网络为服务提供者，传统计算机网络为服务使用者的网络体系。无线传感器网络是以数据为中心的网络，其网络连接传输分为 3 个层次：传感器网络层、传感器网络汇聚互联层以及管理和用户层，如图 1-4 所示。

传感器网络层由传感器节点组成，主要功能为监测区域的信息采集。
传感器网络汇聚互联层由汇聚节点、基站、卫星以及部分充当基站的移动节点组成。它的主要功能为：向传感器网络发布网络配置信息和环境监测请求；监测数据的收集、融合和处理以及传感器网络和外部网络的互联。

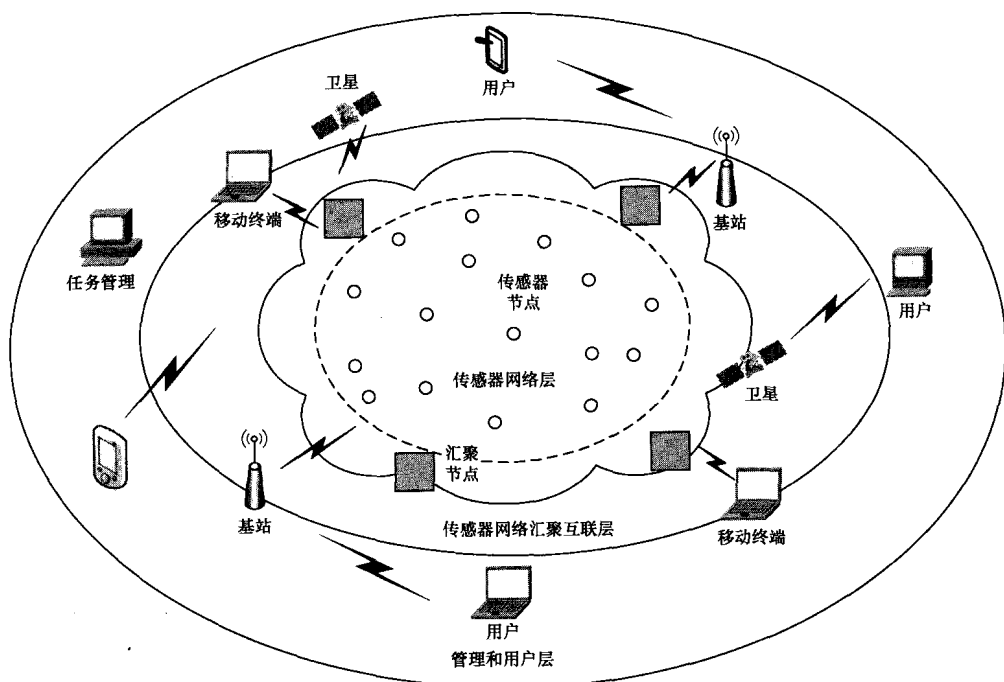


图 1-4 无线传感器网络数据传输安全体系结构

管理和用户层指传感器网络之外的网络，如 Internet，该层次上的节点被分为两类：一是任务管理节点，主要功能为对传感器网络进行配置和管理；二是用户节点，使用传感器网络提供的服务，用户既可以通过管理节点、基站或者汇聚节点和传感器网络通信，也可以直接和传感器网络通信。

1.2 传感器网络协议栈

在分布式传感器网络的发展过程中，其 Sink 节点和感知节点所使用的协议栈逐渐趋于一致。目前，所使用的协议栈多为如图 1-5 所示的协议栈。

这个协议栈结合了能量消耗、移动管理、网络协议的数据融合，通过相应机制保证能量高效地进行无线通信，提高传感器节点的协作能力。其协议栈由物理层、数据链路层、网络层、传输层、应用层、能量管理平面、移动管理平面和任务管理平面组成。在物理层需要简单的、具有顽健性的调制、传输和接收技术。既然传感器节点有噪声且可能是移动的，那么媒体接入控制 (MAC, Medium Access Control) 协议必须是节约能量的，并且需要最小化的邻居广播冲突。网络层主要关心的是为

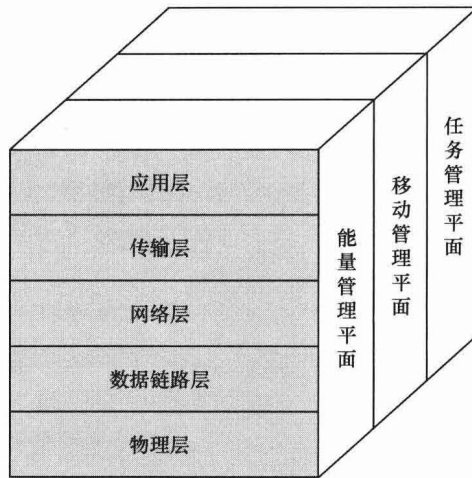


图 1-5 传感器网络协议栈

传输层的数据提供路由功能。传输层在传感器网络应用层需要的情况下，有助于维护数据流。依靠感知的任务，不同类型的应用软件可以在应用层建立和使用。另外，能量、移动和任务管理平面监控传感器节点之间的能量、移动性和任务的分派。这些平面有助于传感器节点之间协调任务以及降低整体能量消耗。

能量管理平面管理传感器节点如何使用其能量。例如：传感器节点在从其邻居节点接收到信息之后，就可能关闭其接收装置，这样就避免了重复接收信息。当传感器节点的能量变得比较低的时候，传感器节点通过广播方式通知其邻居节点，不能够参与路由过程，剩下的能量被保留下来做信息感知用。移动管理平面探测和注册传感器节点的移动，这样传感器节点可以保持对邻居节点的跟踪。通过知道邻居节点是谁，传感器节点可以平衡它们的能量消耗和协调任务的执行。任务管理平面是用来平衡和计划给定区域内的感知任务的。并不是区域内的所有传感器节点都需要在同一时间内执行感知任务，应该根据其能量的多少、任务的需求、传感器节点执行的任务而有所不同。任务管理平面使得传感器网络能够高效地利用能量，实现网络更好的协同工作，在网络中进行数据路由以及在网络之间进行资源共享。

需要特别指出的是，基本上所有的传感器节点都是由物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层组成；对传输层目前考虑得很少，甚至有些结构中就没有考虑传输层；分布式传感器网络协议栈中的层次关系和传统网络的层次关系是有区别的，为了减少能量消耗，各层之间的界限比较模糊，通常采用协议的跨层设计。协议栈中的管理平面对传感器网络的负载和能量的消耗有着一定的影响，需要保持网络的管理和可用性之间的平衡，以及网络的安全性和可用性之间的平

衡。具体的传感器网络协议栈的逻辑层次如图 1-6 所示。



图 1-6 传感器网络协议栈的逻辑层次

分布式传感器网络的逻辑结构分为物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层。从物理层可以看出传感器网络的通信方式包括无线电、红外线和光波。物理层主要负责频率选择、执行频率产生、信号检测、调制和数据加密。数据链路层的主要功能有信道接入、拓扑生成、差错控制、介质控制和数据帧监测等。网络层主要负责路由数据包和拓扑管理。传输层主要是传输控制和协同工作。应用层主要是数据管理（TinyDB）、数据融合、操作系统（TinyOS）、密钥管理（TinySec）以及封装低层的所有组件，为应用开发提供网络服务接口、网络管理接口、网络配置接口和应用开发环境的传感器网络节点中间件。另外，传感器网络的支撑包括贯穿各个层次的能量管理、安全机制以及网络管理、任务管理、QoS保障、移动管理、时间同步和节点定位等。

1.2.1 物理层

物理层负责频率选择、执行频率产生、信号检测、信号调制和数据加密。915 MHz 工业、科学和医疗频段（ISM）被广泛建议用于传感器网络。频率产生、信号检测、底层硬件和传输设计有很大的关系。后面的讨论主要集中在无线传感

器网络的信号传输、能量和调制模式上。

不论是在能量还是在实现的复杂度方面,长距离的无线通信可能是非常昂贵的。当为传感器网络设计物理层的时候,能量的最小消耗是最重要的。一般情况下,在距离为 d 上传输信号所需的最小输出功率与 d^n 成正比,这里 $2 \leq n < 4$ 。对于近地天线,其系数 n 接近于 4。无线传感器网络通信也是如此,这个可能归结于部分信号因地面的反射而消弱。相关文献进行了相应的信号测量讨论。测量表明,能量在短的距离上会以更高的系数衰减。传感器网络中的多跳通信可以有效克服阴影和路径丢失的影响。要是节点密度足够高的话,类似的当传输丢失或者信道容量受限的情况下,可以重复使用频率空间,实现多跳的数据传输。能量高效的物理层方案目前成为许多研究者研究的热点。

选择一个好的调制模式,对于无线传感器网络的可用性是非常重要的。对比二进制和 M-ary 调制模式,当 M-ary 模式进行压缩数据传输时,通过每个字符发送多个比特,结果导致电路复杂化和无线功率消耗增加;相反,二进制调制具有更好的能量效率。

UWB (Ultra Wideband) 或者 IR (Impulse Radio) 已经用于基带脉冲雷达和距离修正系统。UWB 使用的是基带传输,需要内部媒介和无线承载频率,一般使用 PPM (Pulse Position Modulation)。UWB 的主要好处就是多路径。低的传输能量和简单的传输电路使得 UWB 对传感器网络具有很大的吸引力。

在分布式传感器网络中,物理层有着巨大的未研究的空间。开放研究的范围从能量高效的传输设计到调制模式。

- 调制模式。需要为传感器网络研究简单的、低功率的调制模式。调制模式为基带,如 UWB 或者是通频带。
- 克服信号传输效率过低的策略。
- 硬件设计:需要设计微型的、低功耗、低价格的传输、感测和处理单元,以及高效的硬件管理策略。

1.2.2 数据链路层

数据链路层主要负责数据流的多路技术、数据帧监测、媒体控制和错误控制,在通信网络中保证点到点、点到多点的可用性。

(1) 媒体接入控制 (MAC)

在无线、多跳、自组织传感器网络中的 MAC 协议必须完成两个目标。第一,创建网络的基础设施。既然数千个传感器节点稠密地部署在传感器区域内,MAC 协议必须为数据传输建立通信链路,这形成了传感器网络的基础设施,完成跳到跳的无线通信,实现了无线传感器网络的自组织性。第二,传感器节点之间公平、高效地共享通信资源。

(2) 现存的 MAC 不适合传感器网络

在分布式传感器网络中, 需要新的协议和算法来有效解决资源受限和满足传感器网络应用需求。

在蜂窝通信系统中, 基站形成了一个有线的骨干。一个移动的节点对于最近的基站仅仅是一个单跳节点, 但是这种类型的网络是基于相应的基础设施的。在这样的系统中, MAC 协议的主要目标就是提供高的 QoS 和有效的带宽。既然基站存在无限的能量提供, 基站的能量节约往往是不重要的。另外, 在部分节点, 如手机, 移动用户可以对其补充电池能量, 因此媒体接入总是倾向于资源分配策略。既然这里没有像基站一样的中心控制代理, 那么, 蜂窝通信系统的媒体接入控制协议对传感器网络来说是不切实际的。缺乏有效的网络基础设施使得网络范围内的同步是一个技术难题, 而且在传感器网络中, 能量的效率直接影响传感器节点的生命期。

蓝牙 (Bluetooth) 和 MANET (Mobile Ad hoc Network) 对于分布式无线传感器网络是最接近的。蓝牙是一个短距离的无线通信系统的基础设施, 倾向于取代使用 RF 链接的电子用户终端的电缆。蓝牙网络的拓扑结构是一个星型的网络, 一个主接点可能无线链接 7 个从节点, 形成一个微微网, 每一个微微网都是用中间分配的时分多址 (TDMA) 模式和跳频模式进行通信的。传输能量典型的大约为 20 dBm, 传输的范围约为 10 m。MANET 的 MAC 协议具有形成网络基础设施和维护其移动性的功能, 因此主要的目标就是在移动的环境下提供高的 QoS。

对比这两个系统, 无线传感器网络由大量的传感器节点组成, 通过无线多跳的方式实现自组织通信。在无线传感器网络中, 拓扑改变更加频繁, 这主要是节点的移动、失效和能量耗尽所造成的, 移动的速度可能低于 MANET。本质上, 在传感器网络中通过能量节约来维持网络的生命是最重要的, 这就意味着现存的蓝牙或者 MANET 的 MAC 协议不能直接应用在无线传感器网络中。

在无线传感器网络的 MAC 方面, 到目前为止, 已经提议了媒体接入的固定分配和随机接入。总体上节约操作模式和设置时间超时能够实现能量节约。另外一些被提议的 MAC 协议将在下面讨论。

(3) SMACS 和 EAR 算法

在无线传感器网络中, SMACS (Self-Organizing Medium Access Control for Sensor Networks) 完成网络启动和链路层组织, EAR (Eavesdrop-and-Register) 算法能够实现移动节点的无缝链接。

SMACS 是一个分布式的基础设施, 构建的协议能够使节点发现它们的邻居, 并且在不需要任何位置信息或者全局主节点的情况下建立发送或接收模式。在这个协议中, 邻居发现和信道分配相位是联合起来的, 以至于在节点听到其所有邻居时, 能够自组织形成一个连通的网络。一个通信链接由随机选择的一对时间槽

组成,但是对于固定的频率(或者是调频序列),既然可用的带宽大大高于传感器节点的最大数据率,这对传感器网络来说是合适的选择。这样的模式避免了网络范围内同步的必要性,尽管在子网内通信时邻居需要时间同步。通过在链接阶段的随机唤醒模式,以及在空闲时间槽上关闭无线电收发装置,实现能量节约。

EAR 协议试图对移动节点提供持续的服务,不论是在移动的条件下,还是在静止的条件下。这里移动节点控制链接过程,同时决定何时断开链接,因此具有最小的信息开销。EAR 对于 SMACS 是透明的,因此 SMACS 具有指导移动节点进入网络的功能。在这个模型中,假设网络主要是静态的,也就是说,任何移动节点在它的周围都有许多静态的节点。可以看出,时间槽分配的缺点就是属于不同子网的成员可能从来都得不到链接。

(4) 基于 CDMA 的媒体接入

载波感知多址 CSMA (Carrier Sensor Multiple Access)。既然它们都做一个基本的假设:随机分布通信和趋向于独立提供点到点的通信,传统的基于 CSMA 模式被认为是不适当的。相反,传感器网络的 MAC 协议必须能够支持可变性以及高的相关性和占优势的周期通信。任何基于 CSMA 的媒体接入模式都有两个重要的组件: Listening Mechanism 和 Backoff Scheme。持续监听周期是能量有效的,引入的随机延时提供了反对重复冲突的顽健性。在网络中,固定窗口和二进制指数后退模式维持了一个公平的比例。在网络中成功发送每个单元所消耗的能量可能被看做能量效率的指示器。

适应传输率控制 (ARC) 模式,通过平衡发起频率和路由通信来实现媒体接入的公平性,ARC 控制了节点的数据产生率。一个前进的信号机制可以用来通知节点降低它的数据产生率。ARC 使用了线性增加和乘法减少的方法。线性增加导致更好的竞争信道,乘法减少控制传输失败处罚。这种模式的计算特性可以比使用无线电的信息握手方式能够更加有效地利用能量。ARC 试图在多跳网络中简化隐藏节点的问题,通过连续地调整通信速率和执行相位改变,使数据流很少重复碰撞。

① 基于混合的 TDMA/FDMA

在设计传感器网络 MAC 协议时,传感器网络系统由能量受限的传感器节点组成,这些节点单独与具有较高能量的基站进行通信。结合 TDMA 和 FDMA 的特点,综合考虑容忍数据延时,混合的 TDMA/FDMA 媒体接入模式被提议。TDMA 模式致力于单个传感器网络的完整带宽,FDMA 给每个节点分配最小带宽。尽管 TDMA 模式最小化传输时间槽是事实,但由于消耗了时间同步带来的代价,所以并不是首选。相关文献在给定最低系统的能量消耗情况下,找出了最适宜数量的信道,因此混合 TDMA/FDMA 模式具有较好的性能。要是传送者消耗太多的能量,TDMA 模式是有利的;要是接收者消耗较多的能量,则更加倾向于 FDMA。