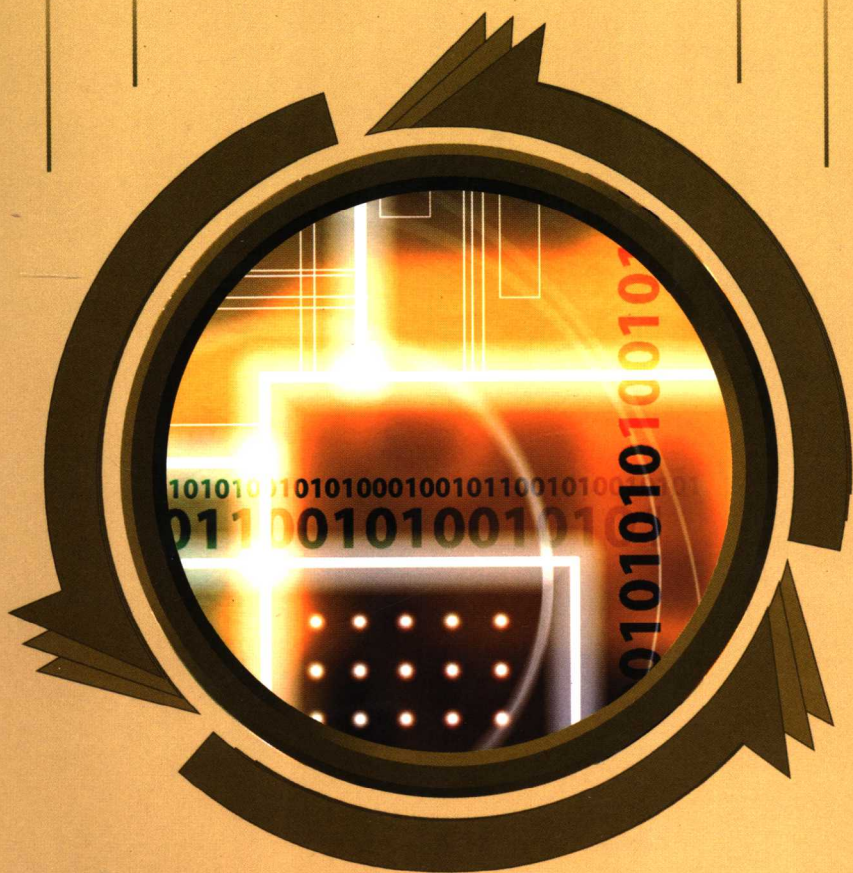


现代通信高技术丛书

# 无线传感器网络与安全

周贤伟 主编  
覃伯平 徐福华 编著



国防  
National Defense



现代通信高技术丛书


# 无线传感器 网络与安全

Wuxian Chuanganqi  
Wangluo Yu Anquan



周贤伟 主编

覃伯平 徐福华 编著

 国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

## 内 容 简 介

本书从实用和科研的角度出发,比较全面、系统地介绍了无线传感器网络及相关安全技术的最新发展。

全书在组织结构上包括两大部分,共分11章:第1部分对无线传感器网络进行全面的概述,详细分析了其基本特点与应用环境、体系结构、路由协议、差错控制技术、时间同步和定位技术;第2部分介绍无线传感器网络安全问题,主要分析其安全目标和安全特性,解析面临的安全威胁,并描述相应的安全策略,包括无线传感器网络的安全认证技术、密钥管理方案和入侵检测机制。

本书内容翔实,深入浅出,覆盖面广,具有先进性、科学性和很高的实用价值,适合于高等院校计算机、通信、信息等专业师生和对无线传感器网络感兴趣的科研人员和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络与安全/周贤伟主编;覃伯平,徐福  
华编著. —北京:国防工业出版社,2007.6  
(现代通信高技术丛书/周贤伟,邓忠礼,郑雪峰主编)  
ISBN 978-7-118-05156-8

I. 无… II. ①周…②覃…③徐… III. 无线电通信—传  
感器—安全技术 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 060554 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

腾飞印刷厂印刷  
新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 12 $\frac{1}{4}$  字数 282 千字  
2007年6月第1版第1次印刷 印数 1—4000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422  
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474  
发行业务:(010)68472764

## 《现代通信高技术丛书》编委会

名誉主任 周炯槃(院士)

总 编 宋俊德

主 编 周贤伟 邓忠礼 郑雪峰

副主编 曾广平 景晓军 雷雪梅 王丽娜 杨裕亮 马伍新  
王祖珮 班晓娟 刘蕴络 王昭顺 王建萍 黄旗明  
李新宇 杨 军 覃伯平 薛 楠

编 委 (按姓名笔画排序)

马伍新	王 丹	王 华	王 培	王 强	王庆梅
王丽娜	王建萍	王祖珮	王昭顺	王淑伟	韦 炜
尹立芳	邓忠礼	申吉红	付娅丽	白浩瀚	冯 震
冯晓莹	吕 越	朱 刚	闫 波	安 然	刘 宁
刘 宾	刘 潇	刘志强	刘晓娟	刘蕴络	关靖远
孙 硕	孙亚军	孙辰宇	孙晓辉	李 杰	李宏明
李新宇	苏力萍	肖超恩	吴齐跃	宋俊德	张海波
张臻贤	陈建军	林 亮	杨 军	杨文星	杨裕亮
周 蓉	周贤伟	郑如鹏	郑雪峰	孟 潭	赵鹏(男)
赵鹏(女)	赵会敏	胡周杰	施德军	姜 美	姚恒艳
班晓娟	崔 旭	黄旗明	韩 旭	韩丽楠	覃伯平
景晓军	曾广平	雷雪梅	薛 楠	霍秀丽	戴昕昱

丛书策划 王祖珮

## 序

当今世界已经进入了信息时代,信息成为一种重要的战略资源,信息科学成为最为活跃的学科领域之一,信息技术改变着人们的生活和工作方式,信息产业已经成为国民经济的主导产业,作为信息传输基础的通信技术则成为信息产业中发展最为迅速,进步最快的行业。目前,个人通信系统和超高速通信网络迅猛发展,推动了信息科学的进一步发展,并成为 21 世纪国际社会和全球经济的强大动力。

随着通信技术日新月异,学习通信专业知识不但需要扎实的专业基础,而且需要学习和了解更多的现代通信技术和理论,特别是数字通信、卫星通信以及传感器网络的现代通信技术方面的知识。从有线通信到无线通信,从固定设备间的通信到移动通信,从无线通信到无线因特网,到传感器网络技术。未来的通信将为人们提供全方位以及无缝的移动性接入,最终实现任何人在任何地方、任何时间进行任何方式的通信,使得通信技术适应社会的发展需要呈现经久不衰的势头。

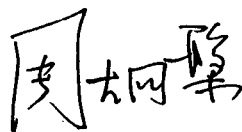
网络技术的飞速发展,通信技术在经济发展中的重要地位日趋重要,世界各国特别重视通信技术的理论研究和通信技术专业人才的培养,国外有关通信领域的文献资料和专著较多。就国内来讲,通信专业人才大量急需,为适应社会经济发展的需要,各高校和科研单位都在培养社会所需的通信专业人才。

为了增进通信及安全技术领域的学术交流,为了满足通信及信息安全专业领域的读者的需要,提供一套能系统、全面地介绍和讲解通信技术原理及新技术的系列丛书,北京科技大学等组织编写了这套《现代通信高技术丛书》。这套丛书内容涵盖了通信技术的主要专业领域,既可作为高等院校通信类、信息类、电子类、计算机类专业高年级本科生或研究生的教材,又可作为有关通信技术和科研人员的技术参考书。

我觉得这套丛书的特点是内容全面、技术新颖、理论联系实际,针对目前

我国通信技术发展情况与目前已有的相关出版物之间已有一定距离这一情况,本丛书立足于现在,通过对基本的技术进行分析,由浅入深,努力反映通信技术领域的新成果、新技术和进展,是国内目前较为全面、技术领先、适用面广的一套丛书。在我国大量培养通信专业人才的今天,这套丛书的出版是非常及时和十分有益的。

我代表编委会对丛书的作者和广大读者表示感谢!欢迎广大读者提出宝贵意见,以使丛书进一步修改完善。

A handwritten signature in black ink, consisting of the characters '周', '炯', and '旻' written in a cursive style. The signature is enclosed in a simple rectangular box.

2005年3月20日

# 前 言

无线传感器网络是由一组传感器节点自组织而成的一个多跳无线网络,不需要固定网络支持,具有快速展开、抗毁性强等优势,同时还具有自组织、多跳、动态拓扑和能量资源受限等特点。它能够在人们无法接近的恶劣或特殊环境中工作,如地震与气候监控、外层空间以及战场环境监控和信息采集系统建设等,是信息感知和采集的一场革命,逐渐受到越来越多的重视,目前已经成为信息技术领域的研究热点。

无线传感器网络是一个无线移动的复杂通信网络系统,它的应用要求工作区域的节点数目多,数据传输不限于单跳,而需建立多跳的网络环境;另一方面,传感器节点资源受限、无中心控制、没有固定设施、拓扑动态变化和节点兼备路由器功能等特点,使无线传感器网络面临的攻击会比一般的无线网络更加频繁、种类更为复杂。因此,无线传感器网络还存在许多需要深入研究的问题,如体系结构、路由算法、服务质量、通信协议、安全保障等。基于此,本书对无线传感器网络进行全面概述的同时,详细介绍其关键技术及其安全问题,主要分析无线传感器网络体系结构、路由协议、差错控制、时间同步和定位算法等,以及威胁模型、认证机制、密钥管理和攻击检测等安全技术。

本书是在作者多年从事移动通信、网络安全教学科研工作中的经验体会和研究成果,并吸收了国内外现有相关著作中许多精华的基础上编写而成的。它既有国内外专家精华浓缩,也包含作者从事信息安全研究和开发工作的总结,希望能给读者带来一些启迪和帮助。

全书分为 11 章。第 1 章主要概要介绍了无线传感器网络基础知识。第 2 章详细描述了无线传感器网络的体系结构,包括网络形成、结构形式和网络的协议栈。第 3 章主要介绍了路由协议特点和性能衡量指标,并对现有路由协议给予分类,并分析不同路由协议的优缺点。第 4 章专题分析组播路由协议。第 5 章描述差错控制技术。第 6 章从描述传统网络的时间同步入手,分析了无线传感器网络的时间同步机制。第 7 章介绍定位技术。第 8 章在分析无线传感器网络安全目标和安全特性基础上,解析其面临的安全威胁,并描述相应的安全策略。第 9 章介绍认证的相关背景和关键技术,详细描述现有的认证方案,并分析其存在的优缺点。第 10 章针对不同的密钥管理方案分析其各自优缺点。第 11 章分析传统网络的入侵检测技术基础上,针对无线传感器网络提出了一些研究设想。

本书参考或直接引用了国内外的一些论文和著作;编写过程中得到了国防工业出版社和北京科技大学的大力支持、鼓励和帮助;本书的完成还得到了国家自然科学基金项目“基于无线传感器网络的安全路由协议研究(No. 60573050)”的资助,在此一并深表谢意。

无线传感器网络与安全是一门发展迅速的新兴技术,囿于作者学识与水平,不妥之处在所难免,诚望读者批评指正。

编著者

2007 年 3 月于北京

# 目 录

<b>第 1 章 无线传感器网络概述</b> .....	1
1.1 无线传感器网络的概念 .....	1
1.2 无线传感器网络的特点 .....	2
1.3 无线传感器网络的研究进展 .....	2
1.3.1 军事领域 .....	3
1.3.2 民用领域 .....	4
1.3.3 学术界 .....	4
1.4 无线传感器网络的研究热点 .....	6
1.5 无线传感器网络的应用 .....	7
1.6 小结 .....	9
参考文献 .....	10
<b>第 2 章 无线传感器网络体系结构</b> .....	11
2.1 概述 .....	11
2.1.1 无线传感器网络节点构成 .....	11
2.1.2 无线传感器网络生成过程 .....	12
2.1.3 无线传感器网络结构形式 .....	12
2.2 无线传感器网络协议栈 .....	13
2.2.1 协议栈概况 .....	14
2.2.2 应用层 .....	14
2.2.3 传输层 .....	15
2.2.4 网络层 .....	16
2.2.5 链路层 .....	24
2.2.6 物理层 .....	26
2.3 传感器网络的标准 .....	27
2.4 小结 .....	28
参考文献 .....	29
<b>第 3 章 无线传感器网络的路由协议</b> .....	30
3.1 无线传感器网络路由协议的特点和衡量指标 .....	30
3.1.1 无线传感器网络路由协议的特点 .....	30
3.1.2 无线传感器网络路由协议的性能衡量指标 .....	31
3.2 无线传感器网络路由协议设计的影响因素 .....	32
3.2.1 无线传感器网络自身因素的影响 .....	32



3.2.2	其他技术因素的影响 .....	32
3.3	无线传感器网络路由设计中的几点问题 .....	33
3.3.1	优化能量消耗 .....	33
3.3.2	均衡能量消耗 .....	33
3.3.3	合理选择多跳 .....	36
3.3.4	优化传输路径 .....	37
3.4	典型路由协议 .....	38
3.4.1	洪泛式路由协议 .....	39
3.4.2	基于数据中心的 routing 协议 .....	40
3.4.3	层次式路由协议 .....	42
3.4.4	基于位置信息的 routing 协议 .....	45
3.4.5	典型路由协议的分析比较 .....	50
3.4.6	组播 (Multicast) 和选播 (Anycast) routing 协议 .....	51
3.5	小结 .....	51
	参考文献 .....	52
<b>第 4 章</b>	<b>无线传感器网络组播路由</b> .....	<b>54</b>
4.1	无线传感器网络组播研究概况 .....	54
4.2	基于树的组播路由协议 .....	55
4.2.1	EMRS .....	55
4.2.2	VLM <sup>2</sup> .....	56
4.3	基于能量的组播 .....	58
4.3.1	分支聚合组播 (BAM) .....	58
4.3.2	节能数据布局异步组播 DPAM .....	59
4.4	基于组群区域的组播 .....	61
4.4.1	GeoCast .....	61
4.4.2	Team Multicast .....	62
4.4.3	Mobicast .....	64
4.5	组播路由协议比较 .....	67
4.6	小结 .....	67
	参考文献 .....	68
<b>第 5 章</b>	<b>无线传感器网络差错控制</b> .....	<b>70</b>
5.1	概述 .....	70
5.1.1	差错控制的概念 .....	70
5.1.2	差错控制方案 .....	71
5.2	差错控制编码 .....	72
5.3	无线网络的差错控制方案 .....	73
5.3.1	移动通信网络中的差错控制方案 .....	73
5.3.2	蓝牙网络中的差错控制方案 .....	74
5.3.3	无线 ATM 通信的差错控制方案 .....	74

5.3.4	自适应的差错控制方案 .....	76
5.4	无线传感器网络的差错控制方案 .....	79
5.4.1	无线传感器网络差错控制的特点 .....	79
5.4.2	差错控制引起的能量消耗 .....	80
5.4.3	uAMPS 无线传感网络节点 .....	80
5.4.4	能量消耗模型 .....	81
5.4.5	链路层相关参数对系统消耗能量的影响 .....	82
5.4.6	编码引起的能量消耗模型 .....	83
5.5	小结 .....	85
	参考文献 .....	86
<b>第 6 章</b>	<b>无线传感器网络时间同步</b> .....	<b>88</b>
6.1	概述 .....	88
6.2	计算机时钟与同步问题 .....	88
6.3	网络时间协议 .....	90
6.3.1	NTP 概述 .....	90
6.3.2	NTP 系统结构 .....	90
6.3.3	NTP 同步原理 .....	91
6.4	无线传感器网络时间同步需求 .....	92
6.4.1	时间同步问题 .....	92
6.4.2	时间同步方案必要条件 .....	93
6.5	无线传感器网络时间同步算法 .....	94
6.5.1	RBS (Reference Broadcast Synchronization) 算法 .....	94
6.5.2	TPSN (Timing - Sync Protocol for Sensor Networks) 算法 .....	96
6.5.3	Tiny - Sync 算法和 Mini - Sync 算法 .....	99
6.5.4	LTS (Lightweight Tree - Based Synchronization) 算法 .....	101
6.6	小结 .....	103
	参考文献 .....	104
<b>第 7 章</b>	<b>无线传感器网络的定位机制</b> .....	<b>105</b>
7.1	节点定位算法的技术背景 .....	105
7.1.1	节点的工作环境 .....	105
7.1.2	节点定位算法的研究意义 .....	105
7.1.3	GPS 定位系统 .....	106
7.1.4	中国化的 GPS .....	107
7.1.5	节点定位基本原理 .....	109
7.2	节点定位算法 .....	111
7.2.1	DV - Hop 算法 .....	111
7.2.2	DV - Distance 算法 .....	113
7.2.3	改进的 DV - Hop 算法 .....	113
7.2.4	位置分发算法 .....	117

7.2.5	Euclidean 算法 .....	118
7.3	目标定位算法 .....	118
7.3.1	网络模型及问题的表述 .....	118
7.3.2	基于追踪的目标定位算法 .....	119
7.4	小结 .....	123
	参考文献 .....	124
<b>第 8 章</b>	<b>无线传感器网络的安全 .....</b>	<b>125</b>
8.1	无线传感器网络安全目标与安全特性 .....	125
8.1.1	无线传感器网络的安全目标 .....	125
8.1.2	无线传感器网络的安全特性 .....	125
8.2	无线传感器网络可能遭受的攻击 .....	127
8.2.1	节点级外部攻击 .....	128
8.2.2	节点级内部攻击 .....	129
8.2.3	笔记本级攻击 .....	131
8.3	DoS 攻击与能源攻击 .....	132
8.3.1	DoS 攻击 .....	132
8.3.2	能量攻击 .....	133
8.4	无线传感器网络的威胁模型 .....	134
8.5	无线传感器网络的安全机制 .....	135
8.6	无线传感器网络的安全路由 .....	136
8.6.1	SPKI/SDSI .....	136
8.6.2	SPIN .....	138
8.6.3	INSENSE .....	140
8.7	安全路由设计初探 .....	141
8.8	小结 .....	142
	参考文献 .....	142
<b>第 9 章</b>	<b>无线传感器网络的认证机制 .....</b>	<b>144</b>
9.1	认证概述 .....	144
9.1.1	信息安全的威胁和认证的目标 .....	144
9.1.2	基本认证协议 .....	144
9.1.3	双向认证和广播认证协议 .....	146
9.1.4	高级认证协议 .....	147
9.1.5	性能评估 .....	149
9.2	无线传感器网络的安全问题 .....	150
9.3	无线传感器网络的实体认证机制 .....	150
9.3.1	基于 RSA 公钥算法的 TinyPK 实体认证方案 .....	150
9.3.2	基于 ECC 公钥算法的强用户认证协议 .....	152
9.3.3	基于秘密共享的 WSN 实体认证协议 .....	154
9.4	无线传感器网络的信息认证机制 .....	155

9.4.1	基于 WSN 广播数据源认证机制的 $\mu$ TESLA 协议	155
9.4.2	多级 $\mu$ TESLA 协议	159
9.4.3	WSN 多跳通信下的信息认证	161
9.5	小结	161
	参考文献	162
<b>第 10 章</b>	<b>无线传感器网络的密钥管理</b>	<b>163</b>
10.1	概述	163
10.2	体系结构	164
10.2.1	分布式网络体系结构	164
10.2.2	分簇式网络体系结构	165
10.3	基于分布式的密钥管理方案	165
10.3.1	预置全局密钥	165
10.3.2	预置所有对密钥	166
10.3.3	随机密钥预分配方案	167
10.3.4	$q$ -Composite 随机密钥预分配方案	168
10.3.5	多路密钥增强方案	169
10.3.6	随机密钥对方案	170
10.3.7	对密钥预分配方案	171
10.4	基于分簇式的密钥管理方案	172
10.4.1	基于 KDC 的对密钥管理方案	172
10.4.2	低能耗密钥管理方案	173
10.4.3	轻量级密钥管理方案	174
10.5	小结	175
	参考文献	176
<b>第 11 章</b>	<b>无线传感器网络的入侵检测技术</b>	<b>178</b>
11.1	入侵检测基础	178
11.1.1	入侵和入侵检测	178
11.1.2	入侵检测的分类	179
11.1.3	入侵检测研究进展	181
11.2	IDS 在无线网络中的应用	182
11.2.1	MANET 入侵检测	183
11.2.2	各种方案的比较分析	184
11.3	WSN 的入侵检测	185
11.3.1	入侵检测需求	186
11.3.2	几种方案的介绍	187
11.3.3	研究方向	188
11.4	小结	189
	参考文献	189

# 第 1 章 无线传感器网络概述

随着通信技术、嵌入式计算技术和传感器技术的飞速发展和日益成熟,具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器开始在世界范围内出现。由这些微型传感器构成的无线传感器网络引起了人们的极大关注,它将成为下一代网络的研究重点。本章重点介绍无线传感器网络的概念、特点、研究进展、研究热点和具体应用。

## 1.1 无线传感器网络的概念

随着在微机电系统(MEMS, Micro - Electro - Mechanical Systems)技术、无线通信和数字电子技术方面的进步和日益成熟,具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器已经出现<sup>[1]</sup>。1988年,Mark Weiser提出了“Ubiquitous Computing(缩写为UbiComp或UC)”思想,即参考文献[2,3]中常出现的“普适计算”(Pervasive Computing),促使计算、通信和传感器等3项技术相结合,产生了无线传感器网络(WSN, Wireless Sensor Networks)<sup>[4]</sup>。

无线传感器网络是由一组传感器以Ad Hoc方式构成的无线网络,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖的地理区域中感知对象的信息,并发布给观察者<sup>[5]</sup>。在本书中,如无特殊说明,传感器网络即指无线传感器网络。

从上述定义可以看到,传感器、感知对象和观察者是无线传感器网络的3个基本要素,无线网络是传感器之间、传感器与观察者之间的通信方式,用于在传感器与观察者之间建立通信路径;协作地感知、采集、处理、发布感知信息是无线传感器网络的基本功能。一组功能有限的传感器协作地完成大的感知任务是无线传感器网络的重要特点。无线传感器网络中的部分或全部节点可以移动,相应的拓扑结构也会随着节点的移动而不断地动态变化。节点间以Ad Hoc方式进行通信,每个节点都可以充当路由器的角色,并且每个节点都具备动态搜索、定位和恢复连接的能力<sup>[1,5]</sup>。

传感器主要由感知单元、传输单元、存储单元和电源组成,完成对感知对象的信息采集、存储和简单的计算后,传输给观察者以提供环境的决策依据。

观察者是无线传感器网络的用户,是感知信息的接收和应用者。观察者可以是人,也可以是计算机或其他设备。例如,军队指挥官可以是无线传感器网络的观察者;一个由飞机携带的移动计算机也可以是无线传感器网络的观察者。一个无线传感器网络可以有多个观察者,一个观察者也可以是多个无线传感器网络的用户。观察者可以主动地查询或收集无线传感器网络的感知信息,也可以被动地接收无线传感器网络发布的信息,它将对感知信息进行观察、分析、挖掘、制定决策或对感知对象采取相应的行动。

感知对象是观察者感兴趣的监测目标,也是无线传感器网络的感知对象,如坦克、军队、动物、有害气体等。感知对象一般通过表示物理现象、化学现象或其他现象的数字量来表征,如温度、湿度等。一个无线传感器网络可以感知网络分布区域内的多个对象,一

个对象也可以被多个无线传感器网络所感知。

## 1.2 无线传感器网络的特点

目前常见的无线网络包括移动通信网、无线局域网、蓝牙网络、Ad Hoc 网络等,与这些网络相比,无线传感器网络具有以下特点<sup>[6-8]</sup>。

(1) 硬件资源有限。节点由于受价格、体积和功耗的限制,其计算能力、程序空间和内存空间比普通的计算机功能要弱很多。这一点决定了在节点操作系统设计中,协议层次不能太复杂。

(2) 电源容量有限。网络节点由电池供电,电池的容量一般不是很大。其特殊的应用领域决定了在使用过程中,不能给电池充电或更换电池,一旦电池能量用完,这个节点也就失去了作用(死亡)。因此在无线传感器网络设计过程中,任何技术和协议的使用都要以节能为前提。

(3) 无中心。无线传感器网络中没有严格的控制中心,所有节点地位平等,是一个对等式网络。节点可以随时加入或离开网络,任何节点的故障不会影响整个网络的运行,具有很强的抗毁性。

(4) 自组织。网络的布设和展开无需依赖于任何预设的网络设施,节点通过分层协议和分布式算法协调各自的行为,节点开机后就可以快速、自动地组成一个独立的网络。

(5) 多跳路由。网络中节点通信距离有限,一般在几百米范围内,节点只能与它的邻居节点直接通信。如果希望与其射频覆盖范围之外的节点进行通信,则需要通过中间节点进行路由。固定网络的多跳路由使用网关和路由器来实现,而无线传感器网络中的多跳路由是由普通网络节点完成的,没有专门的路由设备。这样每个节点既可以是信息的发起者,也是信息的转发者。

(6) 动态拓扑。无线传感器网络是一个动态的网络,节点可以随处移动;一个节点可能会因为电池能量耗尽或其他故障,退出网络运行;一个节点也可能由于工作的需要而被添加到网络中。这些都会使网络的拓扑结构随时发生变化,因此网络应该具有动态拓扑组织功能。

(7) 节点数量众多,分布密集。为了对一个区域执行监测任务,往往有成千上万传感器节点空投到该区域。传感器节点分布非常密集,利用节点之间相对连接性来保证系统的容错性和抗毁性。

## 1.3 无线传感器网络的研究进展

无线传感器网络的研究起步于 20 世纪 90 年代末期,从 2000 年起,国际上开始出现一些有关无线传感器网络发展和研究的报道<sup>[9,10]</sup>。特别是日本、美国以及一些欧洲国家对无线传感器网络表现出了极大的兴趣,纷纷展开了该领域的研究工作,其中美国通过国家自然科学基金委员会、国防部和各军事部门都投入巨资制定并实施无线传感器网络的研究计划。现在,在军事领域、民用领域和学术界掀起无线传感器网络的研究热潮,并已取得了一定的研究成果。

### 1.3.1 军事领域

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,在 C4ISR (Command, Control, Communication, Computing, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance) 的基础上提出了 C4KISR 计划,强调战场情报的感知能力、信息的综合能力和信息的利用能力,把无线传感器网络作为一个重要研究领域,设立了一系列的军事无线传感器网络研究课题。

2001 年,美国陆军提出了“灵巧传感器网络通信”计划,已被批准为 2001 财政年度的一项科学技术研究计划,并在 2001—2005 财政年度期间实施。灵巧传感器网络通信的目标是建设一个通用通信基础设施,支援前方部署,将无人值守弹药、传感器和未来战斗系统所用的机器人系统连成网络,成倍地提高单一传感器的能力,使作战指挥员能更好、更快地作出决策,从而改进未来战斗系统的生存能力。

美国陆军近期又确立了“无人值守地面传感器群”项目,其主要目标是使基层部队指挥员具有在他们所希望部署传感器的任何地方灵活地部署传感器的能力。该项目是支持陆军“更广阔视野”的 3 个项目之一。

美国陆军最近还确立了“战场环境侦察与监视系统”项目。该系统是一个智能化传感器网络,可以更为详尽、准确地探测到精确信息,如一些特殊地形地域的特种信息(登陆作战中敌方岸滩的翔实地理特征信息,丛林地带的地面硬度、干湿度)等,为更准确地制定战斗行动方案提供情报依据。它通过“数字化路标”作为传输工具,为各作战平台与单位提供“各取所需”的情报服务,使情报侦察与获取能力产生质的飞跃。该系统由散布型微传感器网络系统、机载和车载型侦察与探测设备等构成。

美国海军最近也确立了“传感器组网系统”研究项目,核心部分是一套实时数据库管理系统。该系统可以利用现有的通信机制对从战术级到战略级的传感器信息进行管理,而管理工作只需通过一台专用的商用便携机即可,不需要其他专用设备。该系统可以部署到各级指挥单位,以现有的带宽进行通信,并可协调来自地面和空中监视传感器以及太空监视设备的信息。

2002 年 5 月,美国 Sandia 国家实验室与美国能源部合作,共同研究能够尽早发现以地铁、车站等场所为目标的生化武器袭击,并及时采取防范对策的系统。该研究属于美国能源部恐怖对策项目的重要一环。该系统把检测有毒气体的化学传感器和网络技术融为一体,当安装在车站的传感器一旦检测到某种有害物质,就会自动向管理中心通报,自动进行引导旅客避难的广播,并封锁有关入口等。该系统除了能够在专用管理中心进行监视之外,还可以通过 WWW 进行远程监视。

美国海军最近研究的协同交战能力(CEC, Cooperative Engagement Capability)是一项革命性的技术。CEC 是一个无线网络,其感知数据是原始的雷达数据,它适用于舰船或飞机战斗群携带的电脑进行感知数据的处理。每艘战船不但依赖于自己的雷达,还依靠其他战船或者装载 CEC 的战机来获取感知数据,利用这些数据合成图片具有很高的精度,以提高作战能力。例如,一艘战船除了从自己的雷达获取数据以外,还从舰船战斗群的 20 个以上的雷达中获取数据,也可以从鸟瞰战场的战机上获取数据。空中的传感器负责侦察更大范围的低空目标,这些传感器也是网络中重要的一部分。CEC

可以从多方面探测目标,极大地提高了测量精度和目标的命中率。CEC 还可以快速而准确地跟踪混乱战争环境中的敌机和导弹,使战船可以击中多个地平线或地平线以上近海面飞行的超声波目标。因此,即使是今天最先进的反舰巡航导弹也会被实时地监测到并被击中。

2000 年,美国国防部把 Smart Sensor Web 定为国防部科学技术 5 个尖端研究领域之一。Smart Sensor Web 的基本思想是在整个作战空间中通过放置大量的传感器节点来收集和传递信息,将信息汇集到融合点后,综合成一张图片,并分发给需要该信息的作战者。Smart Sensor Web 将为军队提供大覆盖面、实时、高分辨力信息的能力。Smart Sensor Web 是智能、安全、以 Web 为中心的传感器信息分发和融合网络,可以提高军队的敏感度。

### 1.3.2 民用领域

1995 年,美国交通部提出了“国家智能交通系统项目规划”,预计到 2025 年全面投入使用。该计划试图把先进的信息技术、数据通信技术、传感器技术、控制技术 & 计算机处理技术有效地集成运用于整个地面交通管理,建立一个大范围全方位的实时、准确、高效的综合交通运输管理系统。这种新型系统将有效地使用传感器网络进行交通管理,不仅可以使汽车按照一定的速度行驶、前后车距自动地保持一定的距离,而且还可以提供有关道路堵塞的最新消息,推荐最佳行车路线以及提醒驾驶员避免交通事故等。由于该系统将应用大量的传感器与各种车辆保持联系,人们可以利用计算机来监视每一辆汽车的运行状况,如制动质量、发动机调速时间等。根据具体情况,计算机可以自动进行调整,使车辆保持在高效低耗的最佳运行状态,并就潜在的故障发出警告,或直接与事故抢救中心取得联系。

2002 年 10 月 24 日,美国英特尔公司发布了“基于微型传感器网络的新型计算发展规划”。今后,英特尔将致力于微型传感器网络在预防医学、环境监测、森林灭火乃至海地板块调查、行星探查等领域的应用。实现该计划需要 3 个阶段,即物理阶段、实现阶段和应用阶段。物理阶段主要开发集成感知、计算和通信功能的超微型传感器,也被称作尘粒(Mote)或智能微尘(Smart Dust)。实现阶段将在实际商务中使用来自传感器网络的感知数据。应用阶段将传感器网络应用于预防医学、环境监测及灾害对策等领域。

英特尔研究中心伯克利实验室和大西洋学院的研究人员计划部署和使用无线传感器网络来研究岛上环境。网络中的传感器由温度、湿度、气压等芯片和红外线传感器组成,使用这些设备可以在不干扰野生动植物正常生活的情况下监视它们及其生存环境。

### 1.3.3 学术界

在美国自然科学基金委员会的推动下,美国的加州大学伯克利分校、麻省理工学院、康奈尔大学、加州大学洛杉矶分校等学校开始了传感器网络的基础理论和关键技术的研究。英国、日本、意大利等国家的一些大学和研究机构也纷纷加入了该领域的研究行列。我国许多科研院所也开始了对传感器网络的研究。

目前的研究工作还处于起步阶段,大量的问题还没有涉及到,未来的研究工作任重而



道远。学术界的研究主要集中在传感器网络技术和通信协议的研究上,也开展了一些感知数据查询处理技术的研究,取得了一些初步研究结果。

### 1) 网络技术

加州大学伯克利分校提出了应用网络连通性重构传感器位置的方法、基于相关性的 Sensor 数据编码模式、稀疏传感器网络重构跟踪移动对象路线的方法、传感器网络上随时间变化的连续流可视化方法、允许系统级优化时有效通信机制的一般化解、传感器网络上的数据分布式存储的地理 Hash 表方法、确定传感器网络中节点位置的分布式算法等,并研制了一个传感器网络操作系统 TinyOS。

加州大学洛杉矶分校开发了一个无线传感器网络和一个无线传感器网络模拟环境,用于考察传感器网络各方面的问题。他们提出了低级通信不依赖于网络拓扑结构的分布式系统技术、支持多应用传感器网络中命名数据和网内数据处理的软件结构、变换初始感知为高级数据流的层次系统结构、传感器网络的时间同步的解决方法、自组织传感器网络的设计问题和解决方法、新的多路径模式等。

南加州大学提出了在生疏环境部署移动传感器的方法、传感器网络监视结构及其聚集函数计算方法、节省能源的计算聚集的树构造算法等。

斯坦福大学提出了事件跟踪和传感器资源管理的对偶空间方法以及由无线网连接的传感器和控制器构成的闭环控制系统的框架。

麻省理工学院开始研究超低能源无线传感器网络的问题,试图解决超低能源无线传感器系统的方法学和技术问题。

### 2) 通信协议

人们首先对已有的因特网与 Ad Hoc 无线网络的通信协议进行了研究,发现这些协议不适用于传感器网络,其原因如下:

- (1) 传感器网络中的传感器节点数量远大于 Ad Hoc 网络中的节点数;
- (2) 感知节点出现故障的频率要大于 Ad Hoc 网络;
- (3) 感知节点要比因特网和 Ad Hoc 网络中的节点简单;
- (4) 感知节点的能量有限;
- (5) 因特网的数据报头对于传感器网络来说太长,例如,每个节点必须有一个永久的地址。

针对这些问题,康奈尔大学、南加州大学等很多大学开展了传感器网络通信协议的研究,先后提出了有效的通信协议,包括谈判类协议(如 SPIN - PP 协议、SPIN - EC 协议、SPIN - BC 协议、SPIN - RL 协议)、定向发布类协议、能源敏感类协议、多路径类协议、传播路由类协议、介质存取控制类协议、基于 Cluster 的协议、以数据为中心的路由算法。

### 3) 感知数据查询处理技术

康奈尔大学在感知数据查询处理技术方面开展的研究工作较多。他们研制了一个测试感知数据查询技术性能的 COUGAR 系统,提出了在传感器网络上计算聚集函数的容错和可扩展算法,并探索了把传感器网络表示为数据库的思想,探讨了如何把分布式查询处理技术应用于感知数据查询的处理。

加州大学伯克利分校在传感器网络的数据查询技术研究方面,提出了实现可动态调整连续查询的处理方法和管理传感器网络上多查询的方法,应用数据库技术实现了传