

无线传感器网络 原理与应用

WUXIAN CHUANGANQI WANGLUO
YUANLI YU YINGYONG

李善仓 张克旺 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

无线传感器网络原理与应用

李善仓 张克旺 编著



机械工业出版社

本书内容涉及无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 的理论和应用两个方面, 重点介绍了无线传感器网络中的基本理论和支撑技术, 并总结了当前开发领域中的最新研究成果。全书共分 13 章, 内容涉及无线传感器网络的基本概念、体系结构、关键技术、软硬件开发平台和仿真环境, 并给出了一个无线传感器网络的典型应用实例。希望读者通过阅读本书, 能加深对无线传感器网络的理解, 为进一步研究提供良好的基础与参考。

本书既可作为计算机、通信、电子和自动化等专业高年级本科生和研究生的教材, 也可作为无线传感器网络领域的研究人员和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

无线传感器网络原理与应用/李善仓, 张克旺编著. —北京: 机械工业出版社, 2008. 1

ISBN 978-7-111-23080-9

I. 无… II. ①李…②张… III. 无线电通信 - 传感器 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 194962 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 朱 林 责任校对: 张 媛

封面设计: 王伟光 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷

2008 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17.75 印张 · 434 千字

0 001—4 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-23080-9

定价: 33.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

前言

科技发展的脚步越来越快，人类已经置身于信息时代。作为信息获取最重要和最基本的技术——传感器技术，也得到了极大的发展。传感器信息获取技术已经从过去的单一化逐渐向集成化、微型化和网络化方向发展，并将带来一场信息革命。

早在 20 世纪 70 年代，就出现了将传统传感器采用点对点传输、连接传感控制器而构成传感器网络雏形，人们把它归结为第一代传感器网络。随着相关学科不断发展，传感器网络同时还具有了获取多种信息信号的综合处理能力，并通过与传感控制器的相连，组成了有信息综合和处理能力的传感器网络，这是第二代传感器网络。而从 20 世纪末开始，现场总线技术开始应用于传感器网络，人们用其组建智能化传感器网络，大量多功能传感器被运用，并使用无线技术连接，无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSN) 逐渐形成。

无线传感器网络是新一代的传感器网络，具有非常广泛的应用前景，其发展和应用将会给人类生活和生产的各个领域带来深远的影响。如美国，非常重视无线传感器网络的发展，IEEE 也正在努力推进无线传感器网络的应用和发展，波士顿大学 (Boston University) 还于最近创办了传感器网络协会 (Sensor Network Consortium)，期望能促进传感器联网技术的开发。除了波士顿大学，该协会还包括 BP、霍尼韦尔 (Honeywell)、Inetco Systems、Invensys、L-3 Communications、Millennial Net、Radianse、Sensicast Systems 及 Textron Systems。美国的《技术评论》杂志在论述未来新兴十大技术时，更是将无线传感器网络列为第一项未来新兴技术，《商业周刊》预测的未来四大新技术中，无线传感器网络也列入其中。可以预计，无线传感器网络的广泛应用是一种必然趋势，它的出现将会给人类社会带来极大的变革。

无线传感器网络是集传感器技术、微机电技术、现代网络与无线通信技术于一体的综合智能信息处理平台，具有广阔的应用前景，是计算机信息领域最活跃的研究热点之一，也是改变未来生活的重大技术之一。

无线传感器网络可广泛应用于公共安全、生态环保、应急指挥、智能交通、智能家居等诸多领域。例如，智能化家居中的传感器/控制器网络、工业现场中各种参数收集、控制器的统一联网调控等，都可以通过无线传感器网络来实现。在这些应用中，通常需要使用无线网络技术，若采用有线网络则存在诸多问题，如重新布线成本高、有线网络灵活性差、不易更改变动及网络利用率低等。这些应用不需要很高的带宽，但是需要非常低的能耗，从而延长电池的使用寿命，这正是无线传感器网络应用的特点之一。由于无线传感器节点通常使用存储器容量受限的嵌入式处理器/控制器，所以对协议栈的大小也提出了严格的要求。另外，在安全、节点自动配置、网络动态重组等方面也有诸多要求。

本书分为无线传感器网络概述、无线传感器网络中的通信协议、无线传感器网络的支撑技术、无线传感器网络的开发与应用技术四个部分，对无线传感器网络做了系统的介绍。

在无线传感器网络概述部分，首先对无线传感器网络中的基本概念进行了论述，对传感器网络的发展历程、研究现状和相关关键技术进行了简要介绍，同时对无线传感器网络的体系结构、网络管理等技术等也做了介绍。

在无线传感器网络中的通信协议这一部分，对无线传感器网络中涉及的核心技术以及网络系统的基本网络协议进行了讨论，包括无线传感器的物理层协议、MAC 协议、路由协议、拓扑控制协议以及目前非常看好的低功耗低速率的无线网络协议（IEEE 802.15.4）。

在无线传感器网络的支撑技术这一部分，分别对几大基本支撑技术进行了详细的论述，包括节点定位技术、目标跟踪技术、时间同步技术，在论述基本原理的同时，还将当前比较前沿的各种算法进行了分析和比较，并给出了各种算法的优缺点，便于读者全面理解这些技术。

在无线传感器网络的开发与应用技术这一部分，对当前无线传感器网络的典型开发平台进行了详细论述，使读者能够对全书的各种技术进行实践；以 Telos 硬件平台为例，介绍了无线传感器网络的基本硬件构成以及硬件开发的基本步骤，并介绍了开源 TinyOS 的开发环境、体系结构及开发技术；详细分析了节点操作系统 MANTIS；对各种传感器网络平台进行对比分析。最后以 Mica2 节点为例，详细阐述了无线传感器网络硬件平台的建立，软件编程，网络构建；介绍了 1 个桥梁监测方面的典型应用。

由于时间仓促，以及作者水平有限，书中难免出现不准确的地方，敬请读者朋友批评指正。无线传感器网络正处在飞速发展的阶段，我们将在吸取大家意见和建议的基础上，不断修改和完善书中有关内容，为推动该领域的进步尽绵薄之力。

作者

目 录

前言

第1章 无线传感器网络概述	1
1.1 无线传感器网络的发展历程	1
1.1.1 无线数据网络	2
1.1.2 无线自组织网络	4
1.1.3 无线传感器网络	5
1.2 无线传感器网络的研究现状和前景	6
1.2.1 无线传感器网络的研究现状	6
1.2.2 无线传感器网络的研究前景	8
1.3 无线传感器网络的特点	9
1.4 无线传感器网络的应用	12
1.4.1 无线传感器网络的应用特点	13
1.4.2 无线传感器网络在商业领域中的应用	14
1.4.3 无线传感器网络在军事领域中的应用	15
1.5 下一代无线传感器网络技术简介	20
1.6 基于无线传感器网络仿真平台的研究	23
1.7 小结	26
参考文献	26
第2章 无线传感器网络的体系结构	28
2.1 无线传感器网络体系结构概述	28
2.2 无线传感器网络体系结构设计要素	32
2.2.1 资源的管理和使用	32
2.2.2 各层协议间的协作	33
2.2.3 网内数据处理	33
2.2.4 数据完整性	33
2.2.5 安全和保密	34
2.2.6 网络层次多样化	34
2.3 无线传感器网络体系结构设计原则	34
2.4 现有的体系结构	36
2.4.1 VigilNet	36
2.4.2 INSIGHT	37
2.5 系统结构设计	38
2.5.1 MANNA 管理体系结构	38
2.5.2 “细腰”结构	38
2.5.3 信息交换服务	39
2.5.4 “栈自知”的网络通信协议	39

2.5.5	基于代理的体系结构	39
2.6	针对特定领域体系结构的设计	40
2.6.1	多任务无线传感器网络	40
2.6.2	自恢复的安全体系结构	40
2.6.3	抽象区域	41
2.7	无线传感器网络仿真平台	41
2.7.1	NS	42
2.7.2	JavaSim	44
2.7.3	OPNET	45
2.7.4	MATLAB	45
2.7.5	CASSAP	46
2.7.6	SPW	46
2.7.7	SSFNet	46
2.7.8	GloMoSim	47
2.7.9	ATEMU	48
2.7.10	SENSE	49
2.8	小结	49
	参考文献	50
第3章	无线传感器网络中的路由协议	52
3.1	路由协议概述	52
3.1.1	路由协议的基本概念	52
3.1.2	路由协议的特点	53
3.1.3	路由协议的设计要求	54
3.1.4	路由协议的分类	54
3.2	典型的路由协议分析	58
3.2.1	Flooding 协议和 Gossiping 协议	58
3.2.2	SPIN 协议	59
3.2.3	Directed Diffusion 协议	59
3.2.4	Rumor 协议	62
3.2.5	GPSR 协议	63
3.2.6	TBF 协议	63
3.2.7	能量感知路由协议	64
3.2.8	LEACH 协议	65
3.2.9	PEGASIS 协议	65
3.2.10	TEEN 协议	68
3.2.11	TTDD 协议	68
3.2.12	SAR 协议	69
3.2.13	最大化生存时间路由协议	70
3.2.14	TinyOS Beaconing 协议	70
3.2.15	最小代价路由协议	70
3.2.16	其他路由协议	71
3.3	无线传感器网络各路由协议的比较	71

3.4 小结	75
参考文献	76
第4章 物理层	78
4.1 无线传感器网络物理层概述	78
4.2 物理层介质	78
4.2.1 无线电波通信	79
4.2.2 微波通信	79
4.2.3 红外通信	79
4.2.4 光通信	80
4.3 物理层实例	80
4.3.1 红外线	80
4.3.2 WLAN	80
4.3.3 蓝牙	81
4.3.4 超宽带	81
4.3.5 ZigBee	81
4.4 ZigBee 技术及特点	81
4.4.1 ZigBee 技术概述	81
4.4.2 ZigBee 技术特点	82
4.4.3 ZigBee 协议栈	83
4.4.4 ZigBee 协议的网络拓扑结构	84
4.5 蓝牙技术及其特点	85
4.6 IEEE 802.11	88
4.7 IEEE 802.15.4	90
4.8 常见的无线传感器网络物理层设计	92
4.8.1 PicoRadio	92
4.8.2 WINS	92
4.8.3 uAMPS	92
4.9 无线传感器网络物理层设计要点	92
4.10 小结	93
参考文献	93
第5章 MAC 层协议	94
5.1 概述	94
5.2 MAC 层协议的研究现状	96
5.2.1 无线传感器网络的 MAC 层协议研究现状	96
5.2.2 Ad Hoc 网络的 MAC 层协议研究现状	98
5.2.3 MAC 层协议设计挑战	99
5.2.4 现有无线 Ad Hoc 网络方法不能适用于无线传感器网络	100
5.3 基于竞争的 MAC 层协议	101
5.3.1 IEEE 802.11 MAC 层协议	101
5.3.2 带冲突避免的载波侦听多点接入 MAC 层协议	103
5.3.3 S-MAC	103

5.3.4	T-MAC	108
5.3.5	MD 协议	108
5.3.6	SIFT 协议	111
5.4	基于固定分配的 MAC 层协议	112
5.4.1	基于分簇网络的 MAC 层协议	112
5.4.2	DEANA 协议	113
5.4.3	SMACS/EAR 协议	113
5.4.4	基于 CDMA 技术的信道分配协议	114
5.4.5	TDM-FDM 协议	114
5.4.6	DE-MAC 协议	114
5.4.7	TRAMA 协议	115
5.5	小结	117
	参考文献	117
第 6 章	拓扑控制技术	120
6.1	概述	120
6.1.1	拓扑控制的设计目标	121
6.1.2	拓扑控制的研究现状	123
6.2	功率控制	124
6.2.1	与路由协议结合的功率控制	124
6.2.2	基于节点度的功率控制	124
6.2.3	基于方向的功率控制	125
6.2.4	基于邻近图的功率控制	125
6.2.5	XTC 算法	127
6.3	层次型拓扑结构控制	127
6.3.1	LEACH 算法	128
6.3.2	GAF 算法	129
6.3.3	改进的 GAF 算法	130
6.3.4	TopDisc 算法	130
6.3.5	HEED 算法	131
6.4	睡眠调度	131
6.4.1	STEM 算法	132
6.4.2	ASCENT 算法	133
6.4.3	CCP	134
6.4.4	SPAN	134
6.5	拓扑控制中存在的问题和需要研究的内容	135
6.6	小结	137
	参考文献	137
第 7 章	安全技术	140
7.1	概述	140
7.1.1	无线传感器网络中的安全问题	140
7.1.2	无线传感器网络中的安全技术	140

7.2 无线传感器网络的安全性分析	142
7.2.1 无线传感器网络的安全挑战	142
7.2.2 无线传感器网络的安全需求	142
7.3 无线传感器网络中的威胁分析与对策	143
7.3.1 传感器节点的物理操作	143
7.3.2 信息窃听	144
7.3.3 私有性问题	144
7.3.4 拒绝服务攻击	144
7.4 无线传感器网络可能受到的攻击	145
7.4.1 拒绝服务攻击	146
7.4.2 Sybil 攻击	150
7.5 无线传感器网络的安全防御方法	152
7.6 无线传感器网络的安全管理体系	154
7.7 小结	162
参考文献	163
第8章 定位技术	165
8.1 测距技术	166
8.2 节点定位机制	167
8.2.1 基本概念和算法	167
8.2.2 定位算法的性能分析	169
8.3 定位算法分类	171
8.3.1 根据参考节点分类	171
8.3.2 根据计算方式分类	172
8.3.3 物理定位与符号定位	172
8.3.4 绝对定位与相对定位	172
8.3.5 紧密耦合与松散耦合	172
8.3.6 基于测距技术的定位和无需测距技术的定位	173
8.3.7 粗粒度与细粒度	173
8.3.8 三角测量、场景分析和接近度定位	174
8.4 典型的无线传感器网络定位系统及算法	174
8.4.1 DV-Hop	175
8.4.2 Euclidean 算法	176
8.4.3 Robust Position 算法	177
8.5 无线传感器网络定位技术的应用	178
8.6 小结	179
参考文献	179
第9章 基于无线传感器网络的目标跟踪技术	182
9.1 概述	182
9.2 无线传感器网络中目标跟踪的基本过程	187
9.2.1 检测阶段	188
9.2.2 定位阶段	188

9.2.3 通告阶段	188
9.3 点目标跟踪	189
9.3.1 点目标跟踪、双元检测协作跟踪	189
9.3.2 信息驱动协作跟踪	190
9.4 小结	195
参考文献	195
第 10 章 时间同步技术	197
10.1 概述	197
10.1.1 概念与定义	199
10.1.2 时钟同步原理	200
10.2 无线传感器网络中的时间同步机制	202
10.2.1 无线传感器网络中的时间同步	202
10.2.2 无线传感器网络中的时间同步特性	204
10.2.3 基于层次结构的时间同步	204
10.3 现有的时间同步技术分析	207
10.4 时间同步算法设计	210
10.5 小结	211
参考文献	212
第 11 章 硬件平台设计	213
11.1 无线传感器网络硬件设计概述	213
11.2 节点的硬件设计	214
11.2.1 无线传感器网络节点的特点	214
11.2.2 节点组成	216
11.2.3 处理器模块设计	216
11.2.4 无线传输技术及芯片	218
11.2.5 电源模块设计	223
11.2.6 传感器模块设计	224
11.2.7 外围模块设计	224
11.3 节点电路设计	225
11.4 节点设计实例	225
11.4.1 节点设计简介	225
11.4.2 Telos 节点设计分析	230
11.5 小结	238
参考文献	238
第 12 章 nesC 语言及 TinyOS	239
12.1 nesC 语言	239
12.1.1 nesC 语言简介	239
12.1.2 nesC 语言中的符号	240
12.1.3 nesC 版本开发进展	240
12.1.4 接口	240
12.1.5 组件说明	241

12.1.6	模块	243
12.1.7	结构	246
12.1.8	nesC 的协作	250
12.1.9	nesC 应用程序	251
12.1.10	多样性	252
12.2	TinyOS	254
12.2.1	无线传感器网络对操作系统的要求	254
12.2.2	TinyOS 的实现	255
12.2.3	新特性	259
12.3	语法	259
12.4	小结	262
	参考文献	262
第 13 章	无线传感器网络在桥梁监测方面的应用	264
13.1	概述	264
13.2	系统需求	265
13.2.1	系统体系结构	265
13.2.2	数据采集系统	266
13.2.3	加速度传感器	266
13.2.4	高频采样技术	267
13.2.5	可靠的数据传输	268
13.3	实际采集数据	269
13.4	小结	269

第1章 无线传感器网络概述

无线传感器网络是集信息采集、信息传输、信息处理于一体的综合智能信息系统，具有广阔的应用前景，是目前非常活跃的一个领域。2000年，美国国防部将传感器网络列为国防5个尖端领域之一。2002年，美国OAK实验室预言：IT时代正从“The network is computer”向“The network is sensor”转变。2003年，美国《技术评论》将无线传感器网络技术列为未来改变人类生活的十大技术之首。可以预计，无线传感器网络的广泛应用是一种必然趋势，它的出现将会给人类社会带来极大的变革。

无线传感器网络是当前在国际上倍受关注的、涉及多学科高度交叉、知识高度集成的前沿热点研究领域，它综合了微机电系统（Micro-Electron Mechanical System, MEMS）、传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等，能够通过各类集成化的微型传感器协作地实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息，这些信息通过无线方式被发送出去，并以自组多跳的网络方式传送到用户终端，从而实现物理世界、计算机世界以及人类社会三元世界的连通。无线传感器网络具有十分广阔的应用前景，在军事国防、工农业、城市管理、生物医疗、环境监测、抢险救灾、危险区域远程控制等许多重要领域都有潜在的实用价值，已经引起了许多国家学术界和工业界的高度重视，被认为是21世纪产生巨大影响力的技术之一。

1.1 无线传感器网络的发展历程

早在20世纪70年代，就出现了将传统传感器采用点对点传输、连接传感控制器而构成传感器网络雏形，人们把它归结为第一代传感器网络。随着相关学科的不断发展，传感器网络同时还具有了获取多种信息信号的综合处理能力，并通过与传感控制器的相连，组成了有信息综合和处理能力的传感器网络，这是第二代传感器网络。而从20世纪末开始，现场总线技术开始应用于传感器网络，人们用其组建智能化传感器网络，大量多功能传感器被运用，并使用无线技术连接，无线传感器网络逐渐形成。

无线传感器网络的研究和使用最早可追溯到冷战时期，当时美国为了能检测前苏联核潜艇的行踪建立了海底声响监视系统。随后建立了雷达防空网络，为使传感器网络能在军事和民用领域被广泛应用，美国国防高级研究计划局（DARPA）在1978年发起了分布式传感器网络研讨会，该研讨会在宾夕法尼亚州的卡耐基-梅隆大学召开。由于军用监视系统对传感器网络感兴趣，人们开始对传感器网络在通信和计算的权衡方面展开研究，同时对传感器网络在普适环境中的应用展开研究。DARPA在1979年提出了“分布式传感器网络计划——DSN”。20世纪90年代中期，开始了低功率无线集成微型传感器研究计划，1998年美国国防高级研究计划局又提出了“传感器信息技术计划——SensIT”，这些计划的发起使得人们对无线传感器系统的兴趣持续增长。SensIT主要研究用于大型分布式军用传感器系统的无线Ad Hoc网络，在此计划中由25个研究机构资助了总计29个研究项目，该计划于2002年结

束。这两个计划的根本目的是研究无线传感器网络的理论和实现方法，并在此基础上研制具有实用目的的无线传感器网络。无线传感器网络的发展主要经过了如下几个阶段。

1.1.1 无线数据网络

从技术角度讲，无线通信技术是无线传感器网络出现和发展的基础及动力，无线通信技术的发展起源于人们对无线数据传输的需求，在此人们把那些以数据传输为主要功能的无线网络技术称为无线数据网络，下面将介绍几种典型的无线数据网络。

(1) ALOHA 系统

20 世纪 60 年代末，夏威夷大学 Norman Abramson 及其同事研制了一个名为 ALOHA 系统的无线网络，已成为当前使用的大多数信息包广播系统（其中包括以太网和多种卫星传输系统）的基础。其核心思想是使用共享的公共传输信道，这个地面无线电广播系统是为了把该校位于 Oahu 岛上校园内的 IBM360 主机与分布在其他岛上和海洋船舶上的读卡机以及终端连接起来而开发的。该系统的初始速度为 4800bit/s，最后升级到 9600bit/s。该系统的独特之处在于用“入境”（inbound）和“出境”（outbound）无线信道作为两路数据传输。出境无线信道（从主机到远方的岛屿）相当简单明了，只要把终端地址放在传输的电文标题里，然后由相应的接收站译码。入境无线信道（从岛内或船舶发到主机）比较复杂，但很有意思，它是采用一种随机化的重传方法：副站（岛屿上的站）在操作员敲击回车键后发出它的电文或信息包，然后该站等待主站发回确认电文；如果在一定的时限（200~1500ms）内，在出境信道上未返回确认电文，则远方站（副站）会认为两个站在企图同时传输，因而发生了碰撞冲突，使传输数据受到破坏，此刻两个站都将再次选择一个随机时间，试图重发它们的信息包，这时成功的把握就非常大。这种类别的网络称为争用型网络，因为不同的站都在争用相同的信道。

这一模式允许多个节点用简单而灵巧的方法，准确地在同一个频道上进行传输。使用该频道的站越多，发生碰撞的机率越高，从而导致传输延迟增加和信息流量降低。Norman Abramson 发表了一系列有关 ALOHA 系统的理论和应用方面的文章，其中 1970 年的一篇文章详细阐述了计算 ALOHA 系统的理论容量的数学模型。现在这个模型已经以经典的 ALOHA 模型而闻名于世，当时它评估出 ALOHA 系统的理论容量达到 17% 的效率。在 1972 年，ALOHA 通过同步访问而改进成时隙 ALOHA 成组广播系统，使效率提高一倍多。

1995 年 3 月，Norman Abramson 因其在争用型系统的开创性研究工作而获得 IEEE 的 KobayaShi 奖。

(2) PRNET 系统

PRNET（Packet Radio Network，分组无线网）最初的研究源于军事通信的需要。1972 年，美国 DARPA（Defense Advanced Research Project Agency，国防局高级研究计划）启动了 PRNET 项目，研究在战场环境下利用 PRNET 进行数据通信。1983 年 DAPRA 启动了高残存性自适应网络（SU Rvivable Adaptive Network，SURAN）项目，研究如何将 PRNET 成果加以扩展，以支持更大规模的网络，还要开发能够适应战场快速变化环境下的自适应网络协议。1994 年，DARPA 又启动了全球移动信息系统（Global Mobile Information Systems）项目，在 PRNET 已有成果的基础上对能够满足军事应用需要的、可快速展开、高抗毁性的移动信息系统进行全面深入的研究，并一直持续至今。

(3) Amateur 分组无线网

Amateur 分组无线网是一个由各国业余无线电爱好者设计构建的自组、多跳、全美范围的网络,其缺陷是区域间只能以低速率短波连接,由于在链路层以上缺乏统一的协议,用户只能通过手工方式配置路由,限制了网络的应用。

(4) 无线局域网

无线局域网 (Wireless Local Area Networks, WLAN) 就是在各工作站和设备之间,不再使用通信电缆,而采用无线的通信方式。一般来讲,凡是采用无线传输媒体的计算机局域网都可称为无线局域网。1990年7月,成立了 IEEE802.11 工作委员会,该工作委员会负责制订无线局域网物理层及媒体接入控制 (MAC) 协议的标准。IEEE802.11 委员会对无线局域网的业务及应用环境、功能条件等提出了完整的基本要求。

目前无线局域网采用的传输媒体主要有两种,即无线电波与红外线。无线电波方式根据调制方式的不同又分为扩展频谱方式和窄带调制方式。

1) 扩展频谱方式。在扩展频谱方式中,数据基带信号的频谱被扩展到几倍至几十倍后再由射频调频发射出去。它虽然牺牲了频带带宽,却提高了通信系统的抗干扰能力和安全性。

2) 窄带调制方式。在窄带调制方式中,数据基带信号的频谱不做任何扩展即被直接搬到射频发射出去。与扩展频谱方式相比,窄带调制方式占用频带少,频带利用率高,但通信可靠性较差。

3) 红外线方式。红外线方式的最大优点是不受无线电干扰,且红外线的使用不必受国家无线电管理委员会的限制,但红外线对非透明物体的透过性较差,传输距离受限。

(5) 无线个域网

无线个域网 (Wireless Personal Area Network, WPAN) 是为了实现活动半径小、业务类型丰富、面向特定群体、无线无缝的连接而提出的新兴无线通信网络技术。WPAN 能够有效地解决“最后的几米电缆”的问题,进而将无线联网进行到底。

WPAN 是一种与无线广域网 (Wireless Wide Area Network, WWAN)、无线城域网 (Wireless Metropolitan Area Network, WMAN)、无线局域网 (WLAN) 并列但覆盖范围相对较小的无线网络。在网络构成上,WPAN 位于整个网络链的末端,用于实现同一地点终端与终端间的连接,如连接手机和蓝牙耳机等。WPAN 所覆盖的范围一般在 10m 半径以内,必须运行于许可的无线频段。WPAN 设备具有价格便宜、体积小、易操作和功耗低等优点。

目前,IEEE、ITU 和 HomeRF 等组织都致力于 WPAN 标准的研究,其中 IEEE 组织对 WPAN 的规范标准主要集中在 IEEE 802.15 系列。IEEE 802.15.1 本质上只是蓝牙底层协议的一个正式标准化版本,大多数标准制定工作仍由蓝牙特别兴趣组 (SIG) 完成,其成果由 IEEE 批准,原始的 IEEE 802.15.1 标准基于 Bluetooth1.1,目前大多数蓝牙器件中采用的都是这一版本。新的版本 IEEE 802.15.1a 对应于 Bluetooth1.2,它包括某些 QoS 增强功能,并完全后向兼容。IEEE 802.15.2 负责建模和解决 WPAN 与 WLAN 间的共存问题,目前正在标准化。IEEE 802.15.3 也称 WiMedia,旨在实现高速率,原始版本规定的速率高达 55Mbit/s,使用基于 IEEE 802.11 但与之不兼容的物理层。后来多数厂商倾向于使用 IEEE 802.15.3a,它使用超宽带 (Ultra WideBand, UWB) 的多频段 OFDM 联盟的物理层,速率高达 480Mbit/s,并且生产 IEEE 802.15.3a 产品的厂商成立了 WiMedia 联盟,其任务是对设备进行测试和

贴牌,以保证标准的一致性。IEEE 802.15.4 也称 Zigbee 技术,主要任务是低功耗、低复杂度、低速率的 WPAN 标准制定,该标准定位于低数据传输速率的应用。

1.1.2 无线自组织网络

由于自组织网络的特殊性,需要为其设计专门的协议和技术,全球的研究人员在这方面开展了大量的研究。综合而言,主要集中在组网理论、路由算法、接入控制和安全管理等方面。

1. 自组织网络理论

自组织网络可以分成两种结构:平面结构和分级结构。在平面结构中,所有节点的地位平等,所以又称为对等式结构。而在分级结构中,网络被划分为簇。每个簇由一个簇头和多个成员节点组成,簇头节点负责簇间业务的转发。在平面结构中,每一个节点都需要知道到达其他所有节点的路由。由于节点的移动性,维护这些动态变化的路由信息需要大量的控制消息,网络规模越大,路由维护和网络管理的开销就越大,网络的可扩充性越差。分级结构克服了平面结构可扩充性差的缺点,网络规模不受限制。分级结构中,簇头的功能相对较强,而普通节点的功能比较简单,基本上不需要维护路由,这大大减少了网络中路由控制信息的数量。此外,分级结构易于实现节点的移动性管理和保障通信业务的服务质量。因此,当网络规模较大并需要提供一定的服务质量保障时宜采用分级网络结构。

2. 自组织网络的无线资源管理与空中接口理论

自组织网络和一般移动通信一样具有信道、用户和业务 3 个动态特性,即:信道的动态性,主要表现为信道受自然和大气环境的影响极大,信道参数随时间快变化;用户的动态性,具体表现为信道随用户的移动而产生较快的变化,带宽不稳定;业务的动态性,具体表现为用户可随机自由选择不同媒体的通信方式,各类用户不同媒体业务要求互不干扰,用户需要实现同时多接入。除这些公共的特性外,自组织网络因其无基础设施的多跳特性,使其具有比一般无线通信更为复杂的信道特性,主要是其信道是多跳共享的多点信道。自组织网络节点存在隐藏终端、暴露终端和入侵终端等问题,这些问题的存在使得传统的无线资源管理与空中接口不再适用于自组织网络中。人们也正在根据自组织网络的新特性研究其通信系统的调度算法、信道分配技术和接入控制机制。同时也想将其与现有通信技术融合,充分采用已有的通信理论和方法为其服务。例如可以将多输入多输出(MIMO)信道估计与均衡技术、空时编码理论应用到自组网络中去。为了提高自组织网络的传输效率与带宽,自组织网络一样可以采用智能天线技术、正交频分复用(OFDM)、码分多址(CDMA)等技术。

3. 自组织网络中的路由实现

自组织网络中分组传输的路由算法是当前受到最为广泛研究的问题。针对固定网路由算法的缺点,人们提出了多种能应用于自组织网络中的路由算法,主要可分为驱动路由算法,如目的序号距离矢量算法、无线路由协议(Wireless Route Protocol,WRP)等;按需驱动路由算法,如 Ad Hoc 按需距离矢量算法、临时排序路由算法、动态源路由算法、基于关联性的路由算法、信号稳定度的路由算法等;区域路由算法,如区域路由协议(Zone Route Protocol,ZRP)。但是这些算法所能支持的节点数目有限,当网络节点数增多时,网络性能将严重下降。同时这些算法没有考虑到节点的功耗,以及对服务质量的支持。

4. 自组织网络的服务质量与安全

自组织网络一方面作为自治系统，有自身特殊的路由协议和网络管理机制；另一方面作为互联网在无线和移动范畴的扩展和延伸，它又必须能够提供到互联网的无缝接入机制。当前互联网已经可以在一定程度上保证综合业务传输的服务质量（QoS）。近年来随着多媒体应用的普及和自组织网络在商业应用的进展，人们很自然地会产生在自组织网络上传送综合业务的需求，并且希望能像固定的有线网络一样为不同业务的服务质量提供保障。因此自组织网络对服务质量保障的支持显得越来越迫切和重要。但是与固定的有线网络不同，在自组织网络中提供 QoS 支持将面临许多不同于传统网络的新问题和挑战。与其他通信网络一样，自组织网络中的服务质量保证也是个系统性问题，不同层都要提供相应的机制，其实现至今仍是一个待解决的问题。除了服务质量，安全也是自组织网络中的一个大问题。自组织网络的特点之一就是安全性较差，易被窃听和攻击。因此，需要研究适用于自组织网络的安全体系结构和安全技术。目前在安全方面主要集中于等效于有线加密（WEP）、WEP1 等密码协议安全性分析与攻击方法的研究，以及消息认证和完整性技术研究等方面。

与其他传统通信网络相比，自组织网络具有以下显著特点：

1) 无中心和自组织性。自组织网络中没有绝对的控制中心，所有节点的地位平等，网络中的节点通过分布式算法来协调彼此的行为，无需人工干预和任何其他预置的网络设施，可以在任何时刻任何地方快速展开并自动组网。由于网络的分布式特征、节点的冗余性和不存在单点故障点，使得网络的健壮性和抗毁性很好。

2) 动态变化的网络拓扑。自组织网络中，移动终端能够以任意速度和任意方式在网络中移动，并可以随时关闭电台，加上无线发送装置的天线类型多种多样、发送功率的变化、无线信道间的互相干扰、地形和天气等综合因素的影响，移动终端间通过无线信道形成的网络拓扑随时可能发生变化，而且变化的方式和速度都难以预测。

3) 受限的无线传输带宽。自组织网络采用无线传输技术作为底层通信手段，由于无线信道本身的物理特性，它所能提供的网络带宽相对有线信道要低得多。此外，考虑到竞争共享无线信道产生的冲突、信号衰减、噪声和信道之间干扰等多种因素，移动终端得到的实际带宽远远小于理论上的最大带宽。

4) 安全性较差。自组织网络是一种特殊的无线移动网络，由于采用无线信道、有限电源、分布式控制等技术，它更加容易受到被动窃听、主动入侵、拒绝服务、剥夺“睡眠”等网络攻击。信道加密、抗干扰、用户认证和其他安全措施都需要特别考虑。

5) 多跳路由。由于节点发射功率的限制，节点的覆盖范围有限。当它要与其覆盖范围之外的节点进行通信时，需要中间节点的转发。此外，自组织网络中的多跳路由是由普通节点协作完成的，而不是由专用的路由设备（如路由器）完成的。

1.1.3 无线传感器网络

在美国自然科学基金委员会的推动下，美国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无线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开展了该领域的研究工作。我国的许多高校（如西安电子科技大学、哈尔滨工业大学等）也开始了对无线传感器网络的研究。目前各国的研究主要集中在无线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。