

无线传感器网络 关键技术研究及应用

Research and Applications on the Key Technologies of
Wireless Sensor Networks (WSNs)

■ 樊宽刚 么晓康 陈宇航 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

本书获江西理工大学优秀学术著作出版基金资助
江西理工大学校级重点课题支持，编号：NSFJ2015-K09
国家自然科学基金课题支持，编号：61163063

无线传感器网络 关键技术研究及应用

樊宽刚 么晓康 陈宇航 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2016

内 容 提 要

本书通过对无线传感器网络电磁信号在井下传输研究,仿真了矿井不同形状对电磁信号传输的影响,提出应对矿井下电磁辐射干扰的措施;通过研究节点路径优化算法、定位算法及节点在有障环境中的部署,降低无线传感器网络节点能耗,延长节点寿命和网络生存周期,并将研究成果应用于实际,通过压缩感知技术压缩了数据量,验证了研究方法的有效性和可行性。

本书可为基于无线传感器网络技术的矿井下生产和监测系统的设计提供技术支持和设计参考,也可以作为相关领域本科生、研究生和工程技术人员的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络关键技术研究及应用/樊宽刚,么晓康,
陈宇航著. —北京:冶金工业出版社,2016.1

ISBN 978-7-5024-7174-3

I. ①无… II. ①樊… ②么… ③陈… 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(2016)第010615号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 张熙莹 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7174-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2016年1月第1版,2016年1月第1次印刷

169mm×239mm;14.25印张;278千字;216页

45.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

随着无线传感器网络技术在井下的应用逐渐增多，问题也慢慢显现出来，例如井下无线信号传输不稳定、井下设备电磁辐射对传感器节点和系统干扰强、节点布置不合理，节点和系统能量损耗快、生命周期短、大量数据传输经常导致出现错误等。由于井下无线传感器网络系统存在诸多缺陷与不足，已成为制约矿井下开采和生产安全的瓶颈问题，整个系统升级换代迫在眉睫。本书针对上述问题，逐步分析，并提出解决措施，通过实际应用验证所提方法和措施有效性，推进无线传感器网络在井下大规模应用，极大地提高了井下开采和生产的效率和安全。

无线传感器网络是一个动态网络，体系结构会根据实际情况随时变化，以实现对所监测区域的完全覆盖，保证整个系统网络的实时畅通。矿井下开采和生产环境复杂，高压设备和大型设备多，电磁干扰严重，信息传输量大，数据采集困难，井下作业危险性高，因此要求井下系统能耗少、网络寿命长、信息采集准确、传输可靠。本书主要研究影响无线传感器网络系统的几个关键技术，并应用于实际，研究内容包括以下三大部分：第2~4章主要是研究WSN信号在井下传输问题，分别研究矿井形状对电磁信号的传输影响，基于分集—合并融合技术的抗干扰技术，井下机车对WSN的电磁干扰影响，并提出具体解决措施；第5~9章主要研究WSN优化算法，分别研究了LEACH算法、路径优化算法、能量损耗算法、蚁群算法以及定位算法等，通过所述算法的研究，可以更好地指导节点布置，延长节点和网络的生命周期；第10~13章主要研究WSN应用，分别研究了压缩感知技术对数

据的压缩恢复,设计了远距离钨矿考勤系统、环境监测系统以及多用途传输设备。

本书可以为基于无线传感器网络技术的矿井下生产和监测系统的设计提供技术支持和设计参考,也可以指导本科生进入相关领域,开拓视野,还可以作为研究生和工程技术人员的教材和参考书,使读者了解 WSN 电磁信号在井下传输、优化算法及在矿井应用。

全书是由江西理工大学无线传感器网络实验室人员编写而成,由樊宽刚统筹规划并做最后整理,王文帅和陈宇航参与了第1章、第14章的编写工作;么晓康、陈宇航、王文帅、侯浩楠、谢树鹏、朱小帅、王之班参与了第2~4章的编写工作,么晓康、丁高兴、刘丽娜、宋远濮、曹清梅参与了第5~9章的编写工作;袁佳楠、赵发、张艳、曾萍、张春光参与了第10~13章的编写工作。此外,也感谢其他人员对本书的大力支持。

本书的研究获国家自然科学基金(编号:61163063)和江西理工大学校级重点课题(编号:NSFJ2015-K09)支持,本书的出版获江西理工大学优秀学术著作出版基金的资助,在此表示衷心的感谢。

本书凝聚了作者的研究成果,若有不足之处,恳请读者批评指正。

樊宽刚

2015年12月7日

目 录

1 绪论	1
1.1 WSN 的概述	1
1.1.1 WSN 的定义	1
1.1.2 WSN 的发展过程	1
1.1.3 WSN 的特点	2
1.1.4 WSN 的分类	2
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 矿井无线通信现状	3
1.2.2 WSN 在国内外的研究现状	3
1.2.3 压缩感知的研究现状	4
1.2.4 国内外射频识别技术的研究现状	5
1.3 WSN 的应用领域	6
1.4 无线传感器网络中电磁干扰	6
1.5 研究的目的是和意义	7
参考文献	8
2 WSN 井下电磁信号传输仿真研究	10
2.1 无线信道传输特性及建模方法	10
2.1.1 大尺度路径损耗模型及无线电磁信号的传输机制	10
2.1.2 小尺度衰弱模型	10
2.2 井下矩形直巷道中电磁信号路径传输损耗模型及仿真	14
2.2.1 频段的选择与确定	14
2.2.2 矩形直巷道中电磁信号的传输损耗	15
2.3 井下拱形直巷道中电磁信号路径传输损耗模型及仿真	20
2.3.1 介电常数和电导率对拱形巷道中电磁信号的影响	20
2.3.2 对比分析频率对拱形直巷道中电磁信号的影响	22
2.4 井下梯形直巷道中电磁信号路径传输损耗模型及仿真	24
2.4.1 电导率及介电常数对梯形巷道的影响	24
2.4.2 对比分析频率对梯形直巷道中电磁信号的影响	25

参考文献	26
3 基于分集—合并融合技术的 WSN 抗干扰技术研究	28
3.1 多径衰落与分集技术的研究	28
3.1.1 多径衰落	28
3.1.2 分集技术的介绍	31
3.2 合并技术的研究	33
3.2.1 合并技术的介绍	33
3.2.2 合并技术以及数学模型的建立	34
3.3 瑞利信道下最大比合并技术的研究	38
3.3.1 瑞利衰落信道下的最大比合并技术	38
3.3.2 瑞利信道下最大比合并性能仿真	41
参考文献	41
4 基于随机统计技术的钨矿电力机车对 WSN 电磁干扰影响研究	44
4.1 WSN 电磁干扰场源研究	44
4.1.1 变频调速电机产生的电磁干扰分析	44
4.1.2 电力线缆所产生的电磁干扰分析	46
4.1.3 钨矿电机运行中产生的电磁干扰分析	48
4.2 电磁干扰的传播路径与仿真研究	50
4.2.1 电磁干扰的传播路径	50
4.2.2 电力线缆电磁干扰信号的仿真	50
4.2.3 钨矿电机自身所产生的电磁干扰分析	55
4.3 WSN 的电磁干扰抑制措施	57
4.3.1 电磁干扰屏蔽技术	57
4.3.2 电磁干扰接地技术	58
参考文献	59
5 基于 LEACH 算法的 WSN 优化设计与研究	61
5.1 WSN 路由协议的研究	61
5.1.1 无线传感器路由协议的概述	61
5.1.2 无线传感器路由协议的考虑因素	61
5.1.3 无线传感器路由协议的分类	62
5.1.4 平面路由协议	63
5.1.5 层次路由协议	65

5.1.6 平面路由协议和层次路由协议的比较	67
5.2 LEACH 路由协议的分析与改进	68
5.2.1 LEACH 协议的网络模型	68
5.2.2 LEACH 协议物理能量模型	68
5.2.3 LEACH 协议算法的流程	69
5.2.4 LEACH 路由协议的优缺点	70
5.2.5 LEACH 的改进	71
5.3 改进的 LEACH 路由协议的仿真	72
5.3.1 节点部署仿真对比	72
5.3.2 网络的性能仿真结果分析对比	73
参考文献	75
6 WSN 的路径优化算法设计与研究	77
6.1 典型的无线传感器网络节点部署算法及优缺点	77
6.1.1 基于网格的节点配置算法	77
6.1.2 采用轮换活跃/睡眠节点的节点部署协议	78
6.1.3 暴露穿越节点部署模型	79
6.1.4 圆周节点部署算法	79
6.1.5 连通无线传感器网络节点部署算法	80
6.2 路径优化算法研究	81
6.2.1 迪杰斯特拉算法	81
6.2.2 Floyd 算法	83
6.2.3 智能算法: 蚁群算法	84
6.3 路径优化算法仿真研究	84
6.3.1 环境模型的建立	84
6.3.2 初始路径优化	85
6.3.3 利用蚁群算法对路径优化	86
6.3.4 蚁群算法的参数优化	88
参考文献	93
7 基于 WSN 的能量损耗优化算法研究	95
7.1 重要节能机制的研究	95
7.1.1 数据融合节能机制	95
7.1.2 路由协议节能机制	96
7.1.3 WSN 中常用的一些节能机制	98

7.2 跨层协议设计	99
7.2.1 MAC层和网络层联合设计	99
7.2.2 自适应休眠机制的跨层设计——EnGFAS	103
7.3 仿真验证	105
参考文献	109
8 基于蚁群算法的 WSNs 节点有障环境中部署优化研究	110
8.1 工程背景	110
8.2 无线信道能耗衰减模型的建立	110
8.2.1 有关模型建立的假设	110
8.2.2 信道能耗衰减模型的推导	111
8.3 无线传感器网络节点静态部署策略	112
8.3.1 节点静态部署策略实现步骤	112
8.3.2 基于蚁群算法的静态无线传感器节点部署	113
8.4 仿真试验与分析	115
8.4.1 参数的确定	115
8.4.2 对于图 8-1 (a) 环境的仿真	115
8.4.3 对于图 8-1 (b) 环境的具体操作仿真	117
参考文献	119
9 基于 WSN 的定位算法研究	120
9.1 WSN 定位技术研究	120
9.1.1 测距方法	120
9.1.2 节点位置的计算方法	121
9.1.3 典型的节点定位算法	123
9.2 基于 RSSI 的质心定位算法及其改进	125
9.2.1 RSSI 测距原理	125
9.2.2 RSSI 测距模型的建立	125
9.2.3 基于最小二乘法的参数估计	126
9.2.4 算法的流程图	128
9.3 基于 RSSI 加权质心算法的仿真实验	129
9.3.1 算法仿真	129
9.3.2 两种算法的误差对比	130
9.3.3 定位实验测试	131
参考文献	134

10 基于压缩感知的 WSN 数据融合技术研究	135
10.1 基于压缩感知的底层节点数据压缩研究	135
10.1.1 压缩感知的过程	135
10.1.2 小波连通树模型的数据压缩	136
10.1.3 基于小波重要系数的树模型 CoSaMP 算法重构	138
10.1.4 节点采集数据的压缩和重构仿真分析	139
10.2 基于模糊理论的簇头节点同类数据融合研究	142
10.2.1 簇头节点同类数据融合方法	142
10.2.2 模糊逻辑	143
10.2.3 模糊集的数据融合算法	143
10.2.4 模糊贴近度的改进算法研究	146
10.2.5 数据仿真处理与分析	149
10.3 基于模糊推理的汇聚节点异类数据融合研究	151
10.3.1 汇聚节点异类数据融合方法	151
10.3.2 输入输出变量的模糊化处理	151
10.3.3 建立模糊控制规则	154
10.3.4 模糊推理法	155
10.3.5 输出变量的反模糊化	156
10.3.6 仿真及结果分析	157
参考文献	159
11 基于 RFID 的 WSN 的钨矿考勤系统设计与研究	161
11.1 RFID 技术研究	161
11.2 钨矿考勤系统的分析与设计	162
11.2.1 系统的总体设计与分析	162
11.2.2 系统组成部分选型及分析	162
11.2.3 系统主要功能及特点分析	164
11.2.4 各模块模型的建立	164
11.2.5 RFID 系统性能分析	164
11.3 系统硬件部分的设计与实现	165
11.3.1 系统硬件总体设计方案	165
11.3.2 射频识别模块	166
11.3.3 控制处理模块	167
11.3.4 无线通信模块	167
11.4 系统软件部分的设计与实现	168

11.4.1	系统软件模块设计思路及框架	168
11.4.2	通信模块软件设计	169
11.4.3	数据库设计	169
11.4.4	考勤客户端功能软件设计	170
11.5	有源 RFID 防冲突算法分析与研究	171
11.5.1	有源 RFID 冲突产生问题分析	171
11.5.2	基于 ALOHA 算法的防冲突算法	172
11.5.3	基于二进制算法的防碰撞算法	176
11.5.4	一种改进的防冲突算法	176
11.6	考勤系统测试	178
	参考文献	180
12	基于 WSN 的环境监测系统设计与研究	182
12.1	环境监测系统的硬件设计	182
12.1.1	无线通信模块设计	182
12.1.2	节点电路设计	183
12.2	监测系统的软件设计	184
12.2.1	Z-Stack 协议栈	184
12.2.2	终端设备节点软件设计	184
12.2.3	协调器节点软件设计	186
12.2.4	界面显示设计	186
12.2.5	数据处理	187
12.3	数据调试及处理	189
12.3.1	WiFi 通信的建立	189
12.3.2	ZigBee 网络搭建测试	190
12.3.3	组网通信测试	190
12.3.4	网络拓扑结构及系统功能测试	191
12.3.5	数据处理	192
12.3.6	系统总体测试	193
	参考文献	194
13	基于 WSN 的多用途传输设备设计与研究	195
13.1	基于 WSN 的多用途传输设备整体架构设计	195
13.1.1	设备平台的选择	195
13.1.2	设备的整体架构设计	195

13.1.3 实现的功能	198
13.2 多用途传输设备的硬件结构	199
13.2.1 传感器模块	199
13.2.2 传感器节点模块	200
13.2.3 其他模块	204
13.3 多用途传输设备软件设计与实现	206
13.3.1 传输设备的通信干扰研究	206
13.3.2 界面软件整体设计	208
13.3.3 界面软件具体编程	209
13.4 多用途传输设备的成品及测试	210
13.4.1 各传输设备模块及测试	210
13.4.2 Android 界面软件数据显示	213
参考文献	214
14 总结与展望	215
14.1 结论	215
14.2 展望	215



绪 论

1.1 WSN 的概述

1.1.1 WSN 的定义

无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSN) 是一种 Ad.hoc 网络, 指在传感器技术、微机电系统技术和网络技术等重大技术的基础之上, 由安置于监测区域里大量廉价的具有感知能力、数据处理能力、计算能力和无线通信能力的低功耗的微型传感器节点, 通过具体的无线传输协议, 形成一个多跳的自组织网络, 传输信息数据, 达到帮助观察者收集和处理网络覆盖区域的对象的具体信息, 执行某些具体的远程智能任务的目的, 如可达到对环境可靠性检测以及设施装备故障诊断等目的。

WSN 的结构如图 1-1 所示, 它可以应用到由地磁、热量、视觉、声音、雷达、红外、震动等多种不同类型传感器构成的网络节点上。它可以达到目标发现、连续检测、位置识别等目的, 在很多领域中有很广泛的应用, 如在商务领域的应用有车辆管理与防盗、仓库管理、办公室环境控制等^[1-3]。

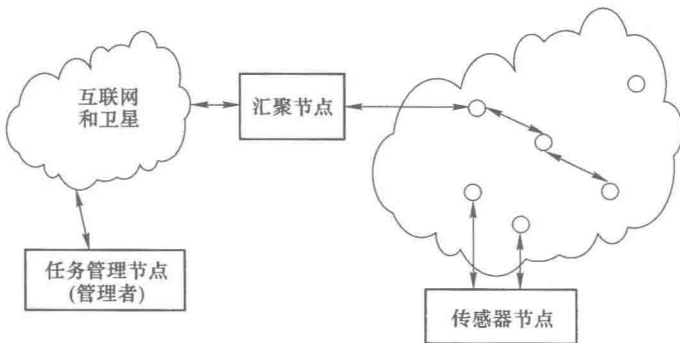


图 1-1 WSN 的结构

1.1.2 WSN 的发展过程

WSN 采用集成元件与无线通信结合的方式, 同时得益于微机电技术体系的发展, 在位传感器、执行器和处理器高度集成的基础上, 使无线传感器网络节点朝着低功耗、微型化、平民化、高度集成等方向发展^[4]。同样因为微机电技术的

发展,多而密的网络节点分布成为 WSN 的特点之一,通过高密度的合理部署,获取同一监测点不同角度的采样数据,降低检测误差,提高精确度,通过大量冗余节点,提升节点的容错性和监测的可靠性,延长节点的工作寿命时间。WSN 的各节点之间的工作也就能有序、高效、长时间的开展^[5]。

1.1.3 WSN 的特点

WSN 是大规模分布式网络,用于难以实现人工维护、条件极度恶劣的应用环境中,多数情况下无线传感器网络节点无法实现循环利用,所以无线传感器网络节点必须是成本较低的设备,以控制成本,同时也是能量受到极大限制的无线设备^[6],其特点主要有以下几点:

(1) 能量受限。能量有限的特点对无线传感器网络节点能力与寿命有很大的限制,目前研究的无线传感器网络节点多数由普通电池提供能源,不具备补充电量的能力,仅仅能单次使用^[7]。

(2) 数据处理能力有限。无线传感器网络节点由于受体积成本以及能源等条件的限制,每个节点的 CPU 只具备 8bit 以及 4~8MHz 的数据处理能力。

(3) 存储量有限。无线传感器网络节点的存储设施由 RAM、程序存储器与工作存储器三部分组成。RAM 是存放临时数据的存储器,其容量基本不会超过 2000 字节;程序存储器内存储节点的操作系统、节点内的程序以及网络的安全函数;工作存储器存储传感器收集到的所需信息,其容量一般仅有数十千字节。

(4) 通信范围有限。无线传感器网络节点无线通信模块消耗功率 10~100mW,信号的有效距离基本控制在 100~1000m 之间^[8]。

(5) 易被篡改。无线传感器网络节点由于其价格低廉、结构不紧密并且非封闭的特点,使不法分子十分易于窃取和篡改无线传感器网络节点中的密钥以及程序代码等关键数据,对 WSN 的安全性产生较为致命的威胁。

WSN 的拓扑结构通常是未知的,即便在节点部署完成后,WSN 的拓扑结构也不是一成不变的^[9]。而且节点在不同的时间也对网络的工作起着不同的作用,所以不同于常规无线网络,网络配置比较彻底,WSN 对节点仅仅进行较小程度上的预先配置,而一些重要的参数或者密钥,通常是在部署工作完成后,节点与节点之间协商形成,所以 WSN 较之普通常规无线网络易于受到物理操纵、数据窃取、攻击等多重安全性威胁^[10]。WSN 的逻辑架构如图 1-2 所示。

1.1.4 WSN 的分类

目前的传感器网络,随着相关技术不断地发展,也在快速地向发展。如今 WSN 不仅可用于监测陆上环境,还可用于对地下、水下环境的监测;不仅可处理基本数据,还可提供实时多媒体数据流传输服务^[11]。



图 1-2 WSN 的逻辑构架

根据节点部署环境，WSN 可以分为陆上、地下和 underwater 三种。根据节点的感应方式不同，可分为原位 WSN 和近视 WSN。根据应用目标不同，WSN 可分为微流量 WSN 和大流量 WSN。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 矿井无线通信现状

最早在 20 世纪 20 年代，美国矿业部门开始对煤矿井下电磁信号的传输理论进行研究，随后在 1968 年，欧洲煤钢委员会（ESCS）、美国矿业局（USBM）开始支持矿井无线通信项目的研究。在随后的 40 年里，国内外专家进行了大量的理论研究和实验分析，例如一些国家在 20 世纪 60 年代开始进行电磁信号在受限空间内传输特性的研究^[12]。美国的 Benjamin Akers 利用麦克斯韦方程和几何光学方法系统地分析了分段线性隧道中电磁场分布特性；Emslie 采用波导模式匹配方法分析了矩形波导有损介质的衰减损耗^[13]。国内外也进行了许多关于矿井无线通信的研究，方向各不相同，其中得出的一些可行的理论研究成果已经得到了应用并进行了推广普及。现有的矿井无线通信系统有动力载波通信、感应通信、透地通信、漏泄通信、矿用小灵通通信。

1.2.2 WSN 在国内外的研究现状

随着科技的不断发展，无线通信技术应用越来越广，人们生活的周边电磁等环境不断地变差，使得 WSN 的信号传输受到很大的影响。因此怎样抑制干扰，抵抗衰落，提升信号传输质量成为 WSN 通信越来越重要的课题^[14]。近些年，大量研究人员对 WSN 通信的抗衰落技术进行了广泛研究，对各种衰落信道进行了各种理论分析、模型以及仿真实验，包括 WSSUS、Rayleigh 信道模型等。文献

[15~18] 对多径衰落信道进行了各种各样的研究,对 Rice 信道、Rayleigh 信道和 Nakagami 信道等建立了数学模型,得出了不同的结论。

WSN 蕴含着非常大的价值^[19],为此,全球很多国家的军事、工业等部门以及学术界都对 WSN 给予了高度关注。

美国是最先研究 WSN 的国家。为了确保美国在这一高新技术领域的领先地位,美国国防部提出了 C41ISR 计划,之后在前者的基础上升级成 C4KISR 计划^[20]。2001 年,美国投资约 7 亿美元研究 WSN,旨在获得战区“超视觉”数据^[21]。早在 2003 年,美国能源部就曾投资 1000 多万美元资助了 3 个项目研究无线传感技术在提高工业效率和改善能源管理方面的应用^[22]。英特尔公司(Intel)、国际商业机器公司(IBM)、微软公司(Microsoft)、西门子公司(Siemens)、摩托罗拉公司(Motorola)等工业信息界巨头也开始对传感器网络进行研究,并制订了相应的科研计划。

目前国外著名大学和研究机构都在研究 WSN 平台实现的技术。其中美国加州大学伯克利分校(UCB)研制出的传感器系统 Mica、Mica2、Mica2Dot 系列是应用最为广泛的 WSN 实验系统。此外,传感器操作系统 TinyOS 也是由 UCB 研发的。

WSN 领域的研究还吸引了诸如英国、法国、德国、意大利、日本等科技非常发达的国家。他们相继投入大笔科研资金,开展对该领域的相关研究。如欧盟的 EYES 计划和 SEWING 系统等。日本总务省也成立了“泛传感器网络”调查研究会^[23]。

随着科技日益发展,WSN 也备受我国的关注和大力支持。国家“十五”规划将 WSN 列为重大科技攻关项目。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年)》^[24]为信息技术明确了三个前沿方向,其中两个与 WSN 的研究直接相关,即智能感知技术^[25]和自组织网络技术^[26]。2006 年我国的“863 计划”信息科学立项项目中更是有十多项与 WSN 密切相关。

我国许多高校和研究所都在研究 WSN,如沈阳自动化所、天津大学等。中兴、华为、海尔、联想等一批高新科技公司也加入 WSN 研究的行列。但总的来说,我国关于 WSN 的研究仍处于初期。

1.2.3 压缩感知的研究现状

近些年,随着 WSN 技术领域的拓展^[27~30],导致监测环境中多传感器采集的原始数据量剧增。而数据发送是产生 WSN 能耗的主要原因,再加上普通传感器节点的存储空间和数据处理能力有限,迫使我们必须减少网络中的传输数据。为了降低其能耗,延长网络寿命,优化网络的各项性能,必须对海量数据进行有效的融合。目前,数据融合技术致力于多传感器数据融合的研究,而研

究内容中处理的数据量仍然很小。为了对传感节点采集的海量数据进行有效的融合，本书提出了对原始数据先进行有效压缩，提取重要数据信息，再利用提取的重要数据信息进行融合的思想。而目前压缩感知理论对采集数据的有效压缩已变成极为热门的研究方向，在众多应用领域中都引起了瞩目。2006年由美国加州理工大学的 Emmanuel Candes^[31]、加州大学洛杉矶分校的 Terence Tao^[32]、斯坦福大学的 David Donoho^[33]（美国科学院院士）以及莱斯大学的 Richard Baraniuk^[34]等该领域的先驱者正式提出压缩感知理论后，迅速引起国内外相关领域研究者的高度重视。该理论给数据采集和压缩带来了一次全新的革命，其核心思想是压缩和采样同时进行，是一种前景很好的想法，其最大的优点就是可通过远低于 Nyquist 的采样频率进行数据采集，并且已被压缩的数据仍能够精确地恢复出原始信号。

1.2.4 国内外射频识别技术的研究现状

射频识别（radio frequency identification, RFID）技术最早应用于第二次世界大战期间，由于其造价成本昂贵，因此没有得到广泛的应用。自20世纪40~50年代雷达技术改进和应用促进 RFID 技术的出现，到20世纪80~90年代 RFID 技术开始进入商业应用阶段后，其技术的重要性才慢慢被更多的人认知，制定统一生产标准后，RFID 的各类产品的应用越来越广泛^[35]。目前国际上对 RFID 生产追求标准化、丰富化、实用化。RFID 技术（特别是无源 RFID 技术）的全球应用正在迅速发展，其产品种类繁多，目前主要产业集中在应用技术发展比较成熟的欧美国家。

美国政府颁布的政策对 RFID 的推广有十分重要的作用，且其制定的 RFID 标准和相关技术的研发及应用均在全球有着重要影响，美国制定的 ISO/IEC 为目前国际上认可度较高的 RFID 标准；欧洲制定的 RFID 标准为 EPC Global；日本制定了本国 RFID 标准 UID，但由于其工作频段和信息位数、应用领域等各方面与欧美使用的标准有较大不同，导致 UID 在国际上很难推广；另外，还有 AIM Global（1999年成立）和 IP-X（南美、澳大利亚、瑞士等国家的标准组织）实力相对较弱的标准组织；新加坡、韩国与中国情况类似，都在对发展射频识别技术及其应用加以重视，但是在均没有明确规定 RFID 标准^[36]。英国、日本、欧美等发达国家掌握的 RFID 技术较为成熟，能生产出较高端、先进的 RFID 产品。美国规定2005年初起所有军需物资全面采用 RFID 标签^[37]。2006年美国食品药品监督管理局（FDA）让制药商使用 RFID 技术跟踪药品防止假药混入。而在生产方面，美国集成电路厂商英特尔、德州等已融入巨资为 RFID 领域研究开发应用芯片，美国迅宝科技已研制出可同时阅读条形码和 RFID 的扫描器。国际商业机器公司 IBM、微软、惠普等公司正研发支持 RFID 应用软件系统。日本制造业方