

崔逊学 赵湛 王成 编著

无线传感器网络的 领域应用与设计技术

Field Applications and
Design Technologies
Of Wireless Sensor
Networks



国防工业出版社
National Defense Industry Press

无线传感器网络的 领域应用与设计技术

Field Applications and Design Technologies
of Wireless Sensor Networks

崔逊学 赵湛 王成 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

无线传感器网络是近年来国内外研究和发展非常热门的一项技术,目前在多个行业和领域得到高度的重视和应用。本书共分3篇计15章,以传感器网络为主题和技术路线,侧重介绍它在军事与安全救灾领域、现代交通领域、现代农业领域的应用方案、设计研制和实际运行效果。

第一篇详细地介绍了美军沙地直线无线传感器网络项目、基于微型传感器网络的战场目标探测、战场机动目标分类识别、地面战场目标跟踪、针对反恐应用的枪声定位系统、用于煤矿井下安全救灾的传感器网络技术及其典型应用实例;第二篇阐述了智能交通系统中的传感器网络技术、无线网络协同的智能交通系统、基于传感器网络的路况信息监测技术、基于传感器网络的车辆管理系统;第三篇叙述了无线传感器网络在现代农业领域的应用、设施农业无线传感器网络通用平台、基于 ZigBee 的智能大田灌溉系统等。

本书的特点是以特定的具体应用领域为系统设计背景,详细介绍传感器网络在政府和科技部门重点关注的上述3个领域应用情况,着重论述设计思路与关键技术方案等内容,对其他领域的应用和类似网络系统的研制也具有借鉴与参考价值。

本书在内容安排上,尽量避免与现有无线传感器网络的通用技术和协议理论介绍方面的书籍相重复,适合于从事无线传感器网络系统设计的工程技术人员阅读,也可作为大专院校相关专业和课程的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络的领域应用与设计技术 / 崔逊学, 赵湛, 王成编著. —北京: 国防工业出版社, 2009. 5
ISBN 978-7-118-06310-3

I. 无... II. ①崔... ②赵... ③王... III. 无线电通信-传感器-应用 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 062458 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 100048)
北京奥鑫印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 22¼ 字数 550 千字
2009 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4500 册 定价 48.00 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

前 言

近年来,传感器网络的研究几乎呈爆炸式的发展,国内有关无线传感器网络基础理论和通用技术介绍的书籍已有不少,这对国内科研学者和技术开发人员提供了前期指导,对普及和掌握以自组网技术为核心的应用系统开发具有很好的启蒙作用。本书旨在为进行具体方案设计和应用系统研制提供借鉴和参考。

本书介绍的内容主要突出无线传感器网络系统研制的关键技术特征。具体地说,以军事与安全救灾领域、现代交通领域和现代农业领域的应用需求为牵引,介绍无线传感器网络设计的关键技术、应用开发、系统集成和测试评估技术等方面的内容。

将自组网的先进终端设备融入军事领域的战场态势感知系统,利用各类微型传感器的探测功能进行系统集成,及时获取战场目标和环境的信息,可以实现的军事应用价值十分明显。利用这些技术为监测机动目标提供位置和类别的信息,实现监控数据的远距离通信,使得部队指挥人员可以方便、快速地判断目标活动情况和战场态势,弥补航空航天战略侦察不能实施区域战术侦察的不足,相关技术也可以推广应用于公安警察部门的反恐侦查活动。

交通传感网是智能交通系统的重要组成,因其应用前景而受到学术界和工业界的高度关注。目前,在国内各种探测技术日趋成熟和硬件成本大幅度下降的基础上,传感器网络在现代交通系统中得到了很大的应用。应用范围主要涉及监控交通枢纽和高速公路的运行状况、统计通过的车数和某类车辆出现的频度等数据,提供交通运行信息为决策者服务。目前,中国科学院的研究人员在该领域已经取得了突破性的成果。

信息的获取、传输、处理、应用是数字农业研究的四大要素;先进传感技术和智能信息处理是保证正确地定量获取农业信息的重要手段。无线传感器网络为农业领域的信息采集与处理提供了新思路,弥补了以往传统数据监控的缺点,已经成为现代大农业的研究热点。借助传感器网络可以实时向农业机构提供土壤、作物生理生态与生长的信息以及有害物、病虫害监测报警,帮助农民及时发现问题,真正实现无处不在的数字农业,因而在设施农业、节水灌溉、精准农业、畜牧业、林草业等方面具有广阔的应用前景。

本书在组织结构上共分为3篇、15章,主要内容如下:

第一篇是军事与安全救灾领域,包括第1章~第6章。第1章主要介绍美军沙地直线项目,剖析了外军研究无线传感器网络的情况,其中一些技术细节内容值得国内同行参考和借鉴,有助于研制我军的相关装备和侦察系统。第2章阐述了基于微型网络化传感器的战场目标探测技术,探测是传感器网络的终端功能,很多用户需求主要体现在不同的探测功能方面。这里的内容涉及常见的地面战场传感器及探测效果、目标探测发现及网络化技术、战场感知的传感器网络实验平台和无线视频传感器网络监控系统。第3章探讨了基于传感器网络的战场机动目标分类识别,这在军事应用中具有一定的应用意义,内容包括机动目标的分类识别技术、基于混合传感器探测信号的机动目标分类、网络系统的战场环境适应性等。第4章详细介绍了基于传感器网络的战场目标跟踪,涉及传感器二元感知的跟踪定位技术、炮弹目标炸点的

自动声定位、传感器网络自身节点的定位技术。第5章提供了美军枪声定位反恐装备系统的研制技术,内容涉及枪声定位的测量方法、射手定位技术方案、系统的软硬件组成等。第6章介绍了矿井安全救灾的传感器网络系统,包括矿井安全监控的传感器网络主要技术、矿井施工点的安全监测传感器网络设计实例等内容。

第二篇是现代交通领域,包括第7章~第11章。第7章是智能交通系统中的传感器与网络化技术,内容涉及智能交通系统中的传感器信息采集技术、网络信息传输技术等。第8章阐述了无线网络协同智能交通系统,包括驾驶员状态监测的无线传感器体域网、无线网络协同智能交通的相关标准协议、基于传感器网络的车路交互系统等内容。第9章详细介绍了智能交通系统中的传感器网络设计技术,内容包括交通系统中的传感器网络架构、面向交通系统的传感器网络节点设计、太阳能节点的长久能量供应系统。第10章主要介绍了基于传感器网络的路况信息监测技术,包括路面参数监测传感器、道路车流量监测传感器、交通参数监测技术、交通参数监测的磁探测方案等内容。第11章介绍基于传感器网络的车辆管理系统,包括车辆信号特征提取和识别算法、道路入口匝道控制、停车诱导信息系统等内容。

第三篇是现代农业领域,包括第12章~第15章。第12章介绍传感器网络在农业具体领域的应用与案例。第13章详细介绍了设施农业的无线传感器网络通用平台,包括设施农业的通用平台节点硬件、节点底层驱动开发、网关平台设计、单节智能锂电池系统的研制等内容。第14章介绍智能大田灌溉的 ZigBee 网络系统设计技术,具体包括系统节点设备的硬件设计、软件设计、系统的功能测试与实现等内容。第15章提供了北京大兴区精准农业应用示范项目的传感器网络系统案例,重点介绍了在这个应用项目中典型网络系统的设计方案、传感器网络系统集成技术、工程实施关键技术和效果,为无线传感器网络在农业领域的应用拓展思路,提供系列解决方案。

附录提供了本书的英汉对照术语。一些内容取材于最近的国内外文献资料,各章后面都附有参考文献,以便读者进一步查阅。

本书适合于从事无线传感器网络系统设计的工程技术人员阅读,也可作为大专院校相关专业和课程的教学参考书。

本书作者的研究工作得到了国家自然科学基金项目(No. 60773129)、国家 863 高技术研究发展计划基金项目(No. 2006AA10Z253)、国家科技支撑计划项目(No. 2006BAD11A10, No. 2006BAD30B03)、安徽省优秀青年科技基金项目(No. 08040106808)等的连续资助,在此表示谢意!

本书第一篇由中国人民解放军炮兵学院崔逊学负责;第二篇由中国科学院电子学研究所赵湛负责;第三篇由国家农业信息化工程技术研究中心王成负责;最后全书由崔逊学统稿。黎明曦、刘碁、邢立军、胡成、李琴、汪涛、田丰等协助了第一篇内容的撰写;方震、耿道渠等协助撰写了第二篇内容;张馨、回楠木、侯瑞锋等协助完成了第三篇内容的撰写。另外,感谢马祖长、黄海宁、陈利虎等专家为本书的撰写提供了自己研究成果的第一手资料。

本书编写过程中参考了大量文献和资料,在此对原作者深表感谢,恕不一一列举。另外,互联网是本书的另一个重要参考资料的来源。由于网上许多资料无法找到其出处,所以书中如有内容涉及相关人士的知识产权,请给予谅解并及时与我们联系。

由于作者水平所限,书中错误和不足之处在所难免,恳请专家、读者指正。

编著者
2009年1月

目 录

第一篇 军事与安全救灾领域

第 1 章 美军沙地直线项目	1
1.1 美军沙地直线项目背景.....	1
1.2 地面侦察的传感器网络模型.....	2
1.2.1 项目的军事需求	2
1.2.2 战场应用的数理模型	4
1.2.3 系统环境模型	5
1.3 传感器的选型.....	6
1.4 目标探测信号的检测.....	8
1.5 传感器网络路由协议的设计	11
1.6 传感器网络时间同步机制的设计	12
1.7 项目系统试验	14
1.7.1 网络节点的封装问题.....	14
1.7.2 试验部署与实施.....	16
参考文献.....	17
第 2 章 基于微型网络化传感器的战场目标探测	18
2.1 常见的地面战场传感器及探测效果	18
2.2 目标探测发现及网络化技术	21
2.2.1 战场感知体系下的信息采集网络架构.....	21
2.2.2 微型传感器探测发现目标的原理.....	24
2.3 战场感知的传感器网络试验平台	25
2.3.1 无线通信模块.....	26
2.3.2 低功耗技术.....	33
2.3.3 实验平台硬软件设计.....	35
2.3.4 实验结果分析.....	40
2.4 无线视频传感器网络监控系统	41
2.4.1 无线视频传感器节点的设计.....	42

2.4.2	视频监控程序的移植	42
2.4.3	监控局域网的配置	44
2.4.4	电池能量供应问题	45
2.5	传感器网络的自然能供电机制	45
	参考文献	48
第3章	基于传感器网络的战场机动目标分类识别	49
3.1	机动目标的分类识别技术	49
3.1.1	基本概念	49
3.1.2	基于微型传感器的目标识别通用框架	50
3.2	基于磁阻传感器的地面机动目标分类算法	52
3.2.1	基于磁阻传感器的目标特征识别原理	52
3.2.2	目标简单分类的依据	53
3.2.3	目标分类算法模型	54
3.2.4	原型系统研制与试验结果	57
3.3	基于混合传感器探测信号的机动目标分类	59
3.3.1	基本设计原理	59
3.3.2	混合探测信号的分类算法模型	59
3.3.3	目标分类试验系统与性能	61
3.4	网络系统的战场环境适应性	62
	参考文献	64
第4章	基于传感器网络的战场目标跟踪	66
4.1	常见的传感器网络目标跟踪算法	66
4.2	传感器二元感知的跟踪定位技术	70
4.3	基于传感器网络的机动目标二元感知跟踪模型	71
4.3.1	目标跟踪算法模型	71
4.3.2	跟踪试验平台设计方案	73
4.4	炮弹目标炸点的自动声定位	76
4.4.1	基于微型传感器阵列的炮弹炸点定位技术	76
4.4.2	声传感器自动定位炸点的短基线方案	78
4.5	传感器网络自身节点的定位技术	80
4.5.1	问题背景与发展现状	80
4.5.2	无锚点传感器网络的节点定位	85
4.5.3	传感器网络的节点定位误差	90
	参考文献	94

第5章 枪声定位反恐装备系统	97
5.1 系统研制概述	97
5.2 硬件组成	98
5.3 系统软件设计	101
5.4 枪声定位的测量信号	102
5.4.1 传感器网络的测量方法	102
5.4.2 声响震动波的探测原理	103
5.5 射手定位技术方案	105
5.5.1 传感器融合算法	105
5.5.2 试验测试	108
参考文献	109
第6章 矿井安全救灾的传感器网络系统	110
6.1 问题背景与应用意义	110
6.2 矿井安全监控的传感器网络主要技术	111
6.2.1 矿井传感器网络的信息检测、处理与传输	111
6.2.2 矿井传感器网络的自组织通信协议	114
6.2.3 煤矿井下部署传感器网络的典型方案	114
6.3 矿井施工点的安全监测传感器网络设计实例	116
6.3.1 实际矿井网络结构	116
6.3.2 网络通信协议的设计	117
6.3.3 传感器节点的硬件设计	117
参考文献	119

第二篇 现代交通领域

第7章 智能交通系统中的传感器与网络化技术	121
7.1 现代智能交通系统	121
7.1.1 智能交通系统的定义	121
7.1.2 智能交通系统的发展历程	121
7.1.3 智能交通系统的组成	122
7.2 智能交通系统中的传感器信息采集技术	124
7.2.1 侵入式交通信息采集传感器	125
7.2.2 非侵入式交通信息采集传感器	126
7.2.3 交通信息采集的最新技术	128

7.3	智能交通系统中的网络信息传输技术	129
7.3.1	典型的网络通信技术简介	129
7.3.2	智能交通系统中的通信技术应用	133
7.4	相关技术发展趋势	135
	参考文献	138
第8章	无线网络协同智能交通系统	140
8.1	协同智能交通的体系结构	140
8.1.1	驾驶员状态监测的无线传感器体域网	140
8.1.2	车—车通信无线网络	142
8.1.3	车路通信无线网络	145
8.2	无线网络协同智能交通的相关标准协议	147
8.2.1	专用短距离通信简介	147
8.2.2	短距离无线通信标准协议	148
8.2.3	中长距离通信标准协议	149
8.3	基于传感器网络的车路交互系统	150
8.3.1	系统方案描述	150
8.3.2	系统硬件节点	151
8.3.3	网络系统管理方法	153
	参考文献	156
第9章	智能交通系统中的传感器网络设计技术	157
9.1	交通系统中的传感器网络架构	157
9.2	面向交通系统的传感器网络节点设计	158
9.2.1	电源管理单元	158
9.2.2	微处理器单元	162
9.2.3	无线通信单元	164
9.3	太阳能节点的长久能量供应系统	172
9.3.1	能量存储装置的超级电容特性	172
9.3.2	系统硬件设计	174
	参考文献	176
第10章	基于传感器网络的路况信息监测技术	177
10.1	路面参数监测传感器介绍	177
10.1.1	温度传感器	178
10.1.2	湿度传感器	179

10.1.3	光强度传感器	179
10.1.4	大气压力传感器	181
10.1.5	加速度传感器	182
10.1.6	路面参数传感器的设计方法	183
10.2	道路车流量监测的传感器	184
10.2.1	声响传感器	185
10.2.2	磁阻传感器	188
10.3	交通参数监测技术	193
10.3.1	监测原理	193
10.3.2	车辆参数监测算法	193
10.4	交通参数监测的实施方案	199
10.4.1	单磁阻传感器的交通参数监测	199
10.4.2	双磁阻传感器的交通参数监测	201
	参考文献	201

第 11 章 基于传感器网络的车辆管理系统 203

11.1	车辆识别技术	203
11.2	用于车辆识别的磁信号分析	204
11.2.1	方向性特征	204
11.2.2	磁场信号偏移特征	205
11.2.3	车辆磁场特征	207
11.3	车辆信号特征提取和识别算法	208
11.3.1	车辆信号提取	209
11.3.2	信号转换模式	209
11.3.3	车辆识别成分分析	212
11.3.4	车辆分类	215
11.4	道路入口匝道控制	216
11.5	停车诱导信息系统	217
	参考文献	218

第三篇 现代农业领域

第 12 章	无线传感器网络在农业中的应用	220
12.1	应用背景	220
12.2	国内外现状	222
12.3	传感器网络在现代农业领域的应用	226

12.3.1	设施农业	226
12.3.2	节水灌溉	227
12.3.3	农产品安全生产与物流配送	230
12.3.4	精准农业	231
12.3.5	水产与禽畜养殖	232
12.3.6	其他应用	234
参考文献	237
第 13 章	设施农业的无线传感器网络通用平台	239
13.1	传感器网络的软硬件设计	239
13.1.1	节点硬件开发概述	239
13.1.2	网络通信协议和操作系统	244
13.2	设施农业的通用平台节点硬件	246
13.2.1	微处理器	246
13.2.2	嵌入式系统管理外围电路选择	248
13.2.3	农用敏感元件选择	250
13.2.4	通用传感器采集接口	255
13.2.5	无线通信模块	260
13.2.6	电源处理部分	262
13.3	节点底层驱动开发	263
13.3.1	底层软件整体构架	264
13.3.2	时钟系统及定时程序的设置	265
13.3.3	通用软件包设计	266
13.3.4	模拟量与开关量测量的编程	274
13.3.5	无线网络通信协议的设计	275
13.4	网关平台设计	280
13.5	能耗管理	282
13.5.1	节点能耗分析与节能策略	282
13.5.2	网络整体节能优化	285
13.5.3	单节智能锂电池系统的研制	286
参考文献	291
第 14 章	智能大田灌溉的 ZigBee 网络系统设计	294
14.1	ZigBee 技术概述	294
14.1.1	IEEE 802.15.4 简介	294
14.1.2	ZigBee 协议	294

14.1.3	ZigBee 协议栈中的术语	296
14.1.4	ZigBee 网络拓扑结构	297
14.1.5	ZigBee 数据传输机制	298
14.1.6	ZigBee 网络路由的实现	299
14.1.7	ZigBee 网络的自适应机制	302
14.2	系统总体构成	303
14.2.1	系统功能	303
14.2.2	系统架构	304
14.2.3	系统的开发环境	305
14.3	系统节点设备的硬件设计	306
14.3.1	JN5121 - 000 - M02 模块	306
14.3.2	存储电路模块	308
14.3.3	实时时钟模块	309
14.3.4	通信接口电路	310
14.3.5	电源处理电路	311
14.3.6	模拟与脉冲信号处理电路	311
14.3.7	驱动控制输出模块	312
14.3.8	太阳能供电单元	313
14.4	软件设计与实现	314
14.4.1	JN5121 程序设计	314
14.4.2	系统 ZigBee 节点的软件设计	316
14.5	网络节点的 ZigBee 协议程序	317
14.5.1	组建网络	317
14.5.2	启动和加入网络	318
14.5.3	网络间的传输数据	319
14.5.4	无线 ModBus 协议的构建	321
14.6	系统的功能测试与实现	324
14.6.1	ZigBee 组网测试	324
14.6.2	系统功能测试	325
14.6.3	系统稳定性测试	325
	参考文献	327
第 15 章	精准农业的传感器网络系统应用	329
15.1	应用项目背景	329
15.2	典型网络系统的设计与方案	329
15.2.1	eKo pro 系统	329

15.2.2	基于 ZigBee 的无线灌溉系统	330
15.2.3	网络视频语音传输系统	331
15.2.4	网络型采集控制系统	332
15.2.5	温室娃娃智能生产管理系统	332
15.2.6	大屏幕环境参数展示系统	333
15.3	无线传感器网络系统集成技术	334
15.3.1	温室无线测控网络智能管理系统	334
15.3.2	基于无线传感器网络的灌溉系统	335
15.3.3	工程实施关键技术与注意事项	338
15.4	网络系统的实施效果	339
	参考文献	341
	英汉对照术语	342

第一篇 军事与安全救灾领域

第 1 章 美军沙地直线项目

信息技术正推动着一场新的军事变革。信息化战争要求作战系统“看得明、反应快、打得准”，谁在信息的获取、传输和处理上占据优势，取得制信息权，谁就能掌握战争的主动权。无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)以其独特的优势，能在多种场合满足军事信息获取的实时性、准确性和全面性的需求。它可以协助实现有效的战场态势感知，满足作战力量“知己知彼”的要求。

无线传感器网络源于军事应用，在军事领域的研究也最为成熟。它与独立的卫星和地面雷达侦察系统相比，具有以下潜在的优势。

(1) 分布式节点多角度和多方位的信息综合，有效地提高了信噪比，这一直是卫星和雷达这类独立系统难以克服的技术问题。

(2) 传感器网络低成本和高冗余的设计原则，为整个探测系统提供了较强的容错能力。

(3) 传感器节点与探测目标的近距离接触，大大消除了环境噪声对系统性能的影响。

(4) 节点中多种传感器的混合应用，有利于提高探测的性能指标。

(5) 多节点联合形成覆盖面积较大的实时探测区域。

(6) 借助个别具有移动能力的节点对网络拓扑结构的调整，可以有效消除探测区域内的盲点。

2003 年 8 月，美国陆军在俄亥俄州开发了“沙地直线”(A Line in the Sand)系统，这是一个用于战场探测的无线传感器网络系统项目^[1]。在国防高级研究计划局的资助下，这个系统能够侦测运动的高金属含量目标，例如侦察和定位敌军坦克和其他车辆。

沙地直线项目主要研究如何将低成本的传感器覆盖整个战场，获得精细的战场信息，从而以不可思议的精确性来识破“战争迷雾”。由美国陆军研究实验室(the U. S. Army Research Lab)组织的战略评估研讨会认为^[2]：“依靠复杂的大功率传感器和通信是不切实际的。未来战场感知的资源可能是大量部署的简单和廉价的单个设备。当分布式探测系统的设备数目成千上万、或许上百万地增加时，必须极大地提高对组网和信息处理的重视程度。”

1.1 美军沙地直线项目背景

分布式传感器在军事领域的应用已有几十年的历史。在 20 世纪 60 年代的越南战争期间，美军就使用了当时被称为“热带树”的无人值守传感器来对付北越的“胡志明小道”。所谓“热带树”实际上是一个震动传感器和声传感器组成的系统，它由飞机投放，落地后插入泥土中，仅露出伪装成树枝的无线电天线，因而被称为“热带树”。

当人员、车辆等目标在其附近行进时，“热带树”便探测到目标产生的震动和声信息，并立即将信息通过无线电通信发送给指挥中心。指挥管理中心对信息数据进行处理后，得到行进人员、车辆等目标的地点位置、规模和行进方向等信息，然后进行指挥决策。“热带树”在越战中的成功应用，促使许多国家在战后纷纷研制和装备各种无人值守的地面传感器系统。

根据目前的技术水平，人们可以采用无人值守地面传感器(Unattended Ground Sensors, UGS)来侦测、分类和判定入侵人员或车辆的存在、运动方向等信息内容。美军的远程战场监视传感器系统(Remotely Monitored Battlefield Sensors System, REMBASS)项目已经为UGS的成功使用进行了验证。

REMBASS使用了远距离监视传感器，由人工放置在敌人可能经过的道路。这些传感器可以对敌人的活动现象引起的信号做出响应，记录下诸如地面震动、声音、红外和磁场变化等物理量。REMBASS可以在本地节点处理传感器获取的数据，以直接或通过无线中继设备把探测、分类的信息传输到传感器监视设备(Sensor Monitoring Set, SMS)。SMS对收到的信息进行解调、解码、显示和记录，提供入侵者活动的完整时间记录。

大多数采用无线通信的无人值守传感器节点类似于REMBASS，具有的网络通信能力有限。将网络节点获取的入侵信息，通过无线方式长距离地传输到中心监视站，中间或许需要经过一个或几个简易中继节点。由于这些系统需要长远距离通信，信号传输过程消耗了节点的有限能量，因而缩短了它们的生命使用期。例如，REMBASS节点被隐蔽埋置后，其能量供应只能维持30天。

早在2001年美军就开始试验采用ad hoc方式部署传感器网络，来侦测和跟踪机动车辆。加利福尼亚州伯克利分校的研究人员在美国海军陆战队的地空战斗中心验证了这种可行性。他们从无人驾驶飞机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)上向一条公路抛撒传感器节点，部署形成一个无线传感器网络系统。这些地面节点之间建立同步时钟、多跳通信的网络，侦测和追踪经过该地域和路段的机动车辆。利用UAV从空中收集地面传感器探测的信息，发送至地面指控部门和机构。

通常入侵检测是实际应用中非常重要的地面战场侦察监视问题，无线传感器网络技术可以很好地解决这一问题。沙地直线项目集成了协作式具有感知、计算和通信能力的节点，替换了以前那种手工布置、稀疏分布、非网络式的感知系统，对已有的地面战场探测系统进行了彻底改进。利用沙地直线项目设计的系统和方案，可以协助部队人员非常方便地利用低功耗的传感器来覆盖战场区域。

沙地直线项目主要研究无线传感器网络在侦察入侵检测方面的应用，以及敌军目标分类和跟踪等问题。他们研制的传感器网络系统具有密集型、分布式的特征，多种异构的传感器节点采用了松散连接的传感器阵列，提供现地探测、评估、数据压缩和发送信息的功能。研究人员专门对传感器技术、信号处理算法、无线通信技术、网络技术和中间件服务等关键技术进行探索，还专门研究了网络不可靠性对应用的影响。整个试验工作在佛罗里达州坦帕市MacDill空军基地完成。

1.2 地面侦察的传感器网络模型

1.2.1 项目的军事需求

沙地直线项目的目的是希望识别出入侵的物体或目标，入侵的物体或目标可以是徒手人员、携带兵器的士兵或车辆，主要功能涉及目标探测、分类和跟踪。

沙地直线项目研制的无线传感器网络节点,被命名为超大规模微尘节点(eXtreme Scale Mote, XSM)。它的实物如图 1-1 所示。这是一种具有特殊功能的传感器网络节点,综合功能强大,高新技术含量高,能可靠地、大范围地实施长久监视^[3]。

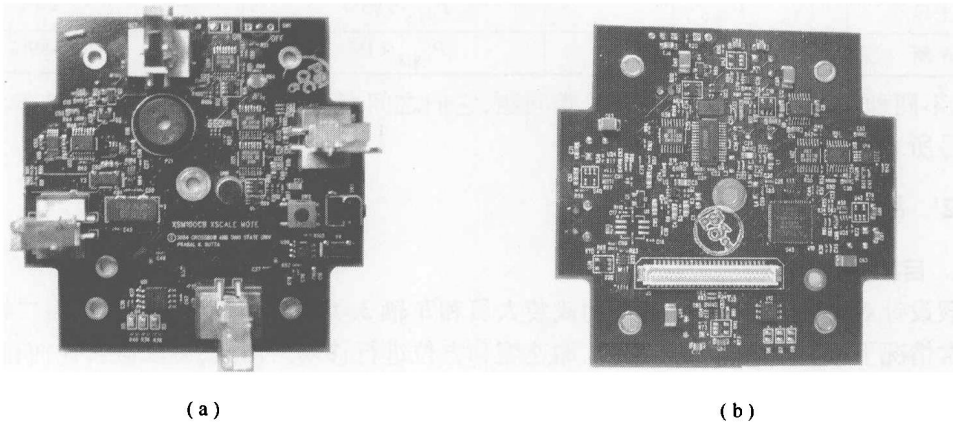


图 1-1 XSM 节点实物图
(a)正面;(b)背面。

通常战场探测需要系统区别出目标的出现与消失情况。正确的探测需要传感器节点正确地估计出目标的存在,在没有目标出现时避免错误探测。探测的关键性能指标包括正确探测概率 P_D 和错误报警概率 P_{FA} 。当然,对给定的感知、计算和通信技术来说,人们希望 P_D 最大化和 P_{FA} 最小化。但是 P_D 和 P_{FA} 通常相互关联,即两者同时增大或减小。因此许多系统都指定一个可接受的 P_{FA} ,在给定 P_{FA} 的情况下力求达到最优化的正确探测概率^[4]。

战场目标分类通常需要将目标分成平民、士兵和车辆 3 种。分类(Classification)简记为 C,它的关键性能指标是正确分类概率和错误概率^[5]。这里将平民或徒手人员(Person)简记为 P,将士兵或武装人员(Soldier)简记为 S,将车辆类目标(Vehicle)简记为 V。

目标跟踪是当目标在传感器网络覆盖的区域内运动时,系统保持感知其位置。正确的跟踪需要系统以一定的准确度、在可接受的探测反应时间内估计出目标进入的初始点和当前位置。由于目标在传感器网络覆盖区域内移动,所以目标随时间移动的位置要能始终被跟踪记录。成功的跟踪要求系统能适度准确地判断出目标最初进入的位置、当前位置,而且允许有一定的探测反应时间。

表 1-1 总结了沙地直线项目要求的传感器探测工作特性和战术技术指标。表 1-2 所列为目标分类要求的详细技术指标,其中垂直栏表示实际种类,水平栏表示要求的分类指标。这里 C、P、S 和 V 是简记写法。对于分类混合矩阵来说,某一类目标的分类概率指标不能小于规

表 1-1 沙地直线项目要求的战技性能指标

指 标	量 值	指标含义	指 标	量 值	指标含义
P_D	>0.95	探测概率	$P_{C_{i,j} i=j}$	见表 1-2	正确分类率
P_{FA}	<0.10	错误告警率	$P_{C_{i,j} i \neq j}$	见表 1-2	错误分类率
T_D	<15	探测持续时间(s)	(\hat{x}, \hat{y})	$\in (x, y) \pm (2.5, 2.5)$	位置估计误差(m)

表 1-2 沙地直线项目要求的目标分类指标混合矩阵

	徒手人员	士兵	车辆
徒手人员	$P_{CP,P} > 90\%$	$P_{CP,S} < 9\%$	$P_{CP,V} < 1\%$
士兵	$P_{CS,P} < 1\%$	$P_{CS,S} > 95\%$	$P_{CS,V} < 4\%$
车辆	$P_{CV,P} = 0\%$	$P_{CV,S} < 1\%$	$P_{CV,V} > 99\%$

定值;不同种类目标之间存在错误分类问题,它们之间有一个错误分类的上限概率,这就是表中符号所表达的含义。

1.2.2 战场应用的数理模型

1. 目标运动参数

假设针对徒手人员、携带兵器的武装人员和车辆 3 类目标,目标运动模型为二维随机的,在通常情况下根据均匀分布的速度、加速度和方位进行移动。当然,可以假设任何目标类型都有移动参数的先验概率。车辆机动速度的变化范围较大,但相对于徒手人员和士兵来说,它在方向性方面更加稳定且受到限制。表 1-3 所列为这 3 类目标的机动参数的数理描述,其中加速度的分布取决于目标当前的速度,目标机动方向的分布取决于目标当前的运动方向^[6]。

表 1-3 3 类机动目标的运动模型

指标	量值	指标含义	指标	量值	指标含义
V_{max}	25	最大速度(km/h)	A_s	$\sim u[-3,3]$	士兵加速度(m/s^2)
V_{min}	1	最小速度(km/h)	θ_s	$\sim N(0,2)$	士兵方向(rad)
V_p	$\sim N(5,1)$	徒手人员速度(km/h)	V_v	$\sim u[1,25]$	车辆速度(km/h)
A_p	$\sim u[-1,1]$	徒手人员加速度(m/s^2)	A_v	$\sim u[-5,5]$	车辆加速度(m/s^2)
θ_p	$\sim N(0,1)$	徒手人员方向(rad)	θ_v	$\sim u[0,0.25]$	车辆方向(rad)
V_s	$\sim u[1,20]$	士兵速度(km/h)			

2. 空间统计的影响域

沙地直线项目的技术方案表明,采用密集型、资源受限的传感器网络系统,也能很好地保持数据采样空间的保真度。研究人员特别提出了影响域(Influence Field, IF)的概念用于空间统计。这个概念采用了二元传感器字段来设计评估模型,这种评估模型是设计目标分类器的基础。

所谓影响域是指围绕目标的一个空间区域,在该区域内入侵目标会导致 1~6 种传感器能量域的变化。其实,影响域的概念在经典的目标跟踪领域已经存在,但用在模式识别领域尚不多见。

影响域的测量就是确定适合目标探测的区域尺寸。实际上在影响域限定的区域内,信噪比超出了这种传感器的最小可探测阈值。由于这个区域的尺寸和形状可以随传感器的灵敏度、噪声功率和目标方向等参量而变化,那么该区域就可以采用最大值和最小值来界定。不同类型目标的影响域可能不同,例如车辆比士兵能产生更大的磁场影响域,具体细节可以参照文献^[1]的介绍。

3. 目标分类器

根据目标的尺寸、速度、方向、倾角以及铁磁含量等内容,可以建立目标的影响域理论模型,用于后续的目标分类。对于任何实际系统,利用实验验证性能是非常有必要的。作为目标