



普通高等教育  
物联网工程类规划教材

# INTERNET OF THINGS, IOT



# 无线 传感网络

Wireless Sensor Network

杨博雄◎主编

倪玉华◎副主编



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



普  
物

# INTERNET OF THINGS, IOT



# 无线 传感网络

杨博雄◎主编

倪玉华◎副主编

人民邮电出版社

北 京

## 图书在版编目(CIP)数据

无线传感网络 / 杨博雄主编. — 北京 : 人民邮电出版社, 2015.4  
普通高等教育物联网工程类规划教材  
ISBN 978-7-115-38580-2

I. ①无… II. ①杨… III. ①无线电通信—传感器—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第040180号

## 内 容 提 要

本书根据全球物联网发展趋势和我国物联网远景规划,结合无线传感网络研究领域的相关技术和应用编写而成。本书主要针对当前物联网教学研究以及工程应用的需要,以物联网感知层为主要内容,将无线传感网络作为物联网的一个子集加以描述,介绍无线传感网络研究领域的相关技术和应用。本书的主要内容包括绪论、短距离无线通信技术与标准、拓扑控制、覆盖控制、节点定位、路由协议、操作系统、安全策略、远程传输等,最后通过应用开发实例介绍无线传感网络的设计方法和实现过程。

本书在编写上既重视基本概念和工作原理等基础知识,又跟踪前沿技术和热点研究内容,知识全面,语言通俗,图文并茂,覆盖面广,既具有学术深度,又具有教材的系统性和可读性。可作为高等院校物联网、通信工程、电子信息、自动控制、计算机、传感器等专业高年级本科生和研究生的教材,也可以作为无线传感网络专业领域的研究人员以及广大对无线传感网络及其应用感兴趣的工程技术人员的参考书。

---

◆ 主 编 杨博雄

副 主 编 倪玉华

责任编辑 邹文波

执行编辑 税梦玲

责任印制 焦志炜

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 14.75

2015年4月第1版

字数: 368千字

2015年4月河北第1次印刷

---

定价: 36.00元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京崇工商广字第0021号

# 前言

当前，很多无线传感网络的书籍都是在传感网络或者无线网络基础上进行的一种扩充或扩展，难以胜任在物联网发展大背景下，无线传感网络所该扮演的角色。本书在考虑当前“无线传感网络”课程的教学现状基础上，力图从一种新的角度来介绍和诠释无线传感网络领域的关键技术和应用设计。

本书在编写过程中，参考了近年来国内外出版的多本同类教材，在教材体系、内容安排和例题配置等方面吸取了它们的优点，同时结合作者多年来在“无线传感网络”课程教学上的经验，形成了本书如下主要特点。

(1) 在体系结构和内容上，对有关内容进行了整合和优化，调整了一些内容的先后顺序，形成了完整有序的知识链，加强了知识间的连贯性。

(2) 本书内容编排层次清晰，深入浅出，语言表述准确、通俗易懂，例题丰富，可读性强，兼具教材教学和学术研究双重功能。

(3) 对于核心知识点，注重经典内容的介绍；对于应用部分，侧重新技术的介绍；对于部分理论以及要求较高的技术和方法，则采取选编方式。

(4) 注重知识的实际应用，选编了大量与各种无线感知密切相关的实际应用，图文并茂，以便读者能够更好地理解和应用。

本书各章课时安排建议如下。

|      |              |       |
|------|--------------|-------|
| 第1章  | 绪 论          | 4 课时  |
| 第2章  | 短距离无线通信技术与标准 | 4 课时  |
| 第3章  | 无线传感网络拓扑控制   | 4 课时  |
| 第4章  | 无线传感网络覆盖控制   | 2 课时  |
| 第5章  | 无线传感网络节点定位   | 4 课时  |
| 第6章  | 无线传感网络路由协议   | 4 课时  |
| 第7章  | 无线传感网络操作系统   | 4 课时  |
| 第8章  | 无线传感网络安全策略   | 2 课时  |
| 第9章  | 无线传感网络远程传输   | 4 课时  |
| 第10章 | 无线传感网络应用设计   | 4 课时  |
| 实 践  |              | 36 课时 |
| 合 计  |              | 72 课时 |

目前很多高校包括职业院校都开设有物联网专业,设置了与物联网有关的课程,甚至,一些高校把物联网以及传感网络作为研究生教学的一门专业主干课程或者方向选修课程。本书可作为这些专业学生的教材或者参考书,读者通过本书的学习,能够很好地了解和掌握无线传感网络的应用和实现。

本书由杨博雄主编,倪玉华等参与了部分章节和课后思考题的编写。虽然本人希望编写一本质量较高、适合当前教学实际的教材,但限于水平,书中仍可能有未尽人意之处,敬请读者批评指正。

编者

2014年4月

| 章节    | 编写人 | 审核人 |
|-------|-----|-----|
| 第1章   | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第2章   | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第3章   | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第4章   | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第5章   | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第6章   | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第7章   | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第8章   | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第9章   | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第10章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第11章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第12章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第13章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第14章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第15章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第16章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第17章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第18章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第19章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第20章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第21章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第22章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第23章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第24章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第25章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第26章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第27章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第28章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第29章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第30章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第31章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第32章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第33章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第34章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第35章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第36章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第37章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第38章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第39章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第40章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第41章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第42章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第43章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第44章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第45章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第46章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第47章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第48章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第49章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第50章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第51章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第52章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第53章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第54章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第55章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第56章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第57章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第58章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第59章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第60章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第61章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第62章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第63章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第64章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第65章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第66章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第67章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第68章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第69章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第70章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第71章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第72章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第73章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第74章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第75章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第76章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第77章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第78章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第79章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第80章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第81章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第82章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第83章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第84章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第85章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第86章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第87章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第88章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第89章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第90章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第91章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第92章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第93章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第94章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第95章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第96章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第97章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第98章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第99章  | 杨博雄 | 倪玉华 |
| 第100章 | 杨博雄 | 倪玉华 |

# 目 录

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第1章 绪论               | 1  |
| 1.1 无线传感网络概述         | 1  |
| 1.1.1 无线网络及其分类       | 1  |
| 1.1.2 基本概念           | 2  |
| 1.1.3 节点类型           | 3  |
| 1.1.4 感知节点功能单元       | 5  |
| 1.1.5 体系结构           | 6  |
| 1.2 无线传感网络的发展与应用     | 7  |
| 1.2.1 发展历程与方向        | 7  |
| 1.2.2 典型应用举例         | 8  |
| 1.3 无线传感网络的主要特点与关键技术 | 18 |
| 1.3.1 主要特点           | 18 |
| 1.3.2 关键技术           | 20 |
| 1.4 无线传感网与物联网        | 23 |
| 1.4.1 物联网概述          | 23 |
| 1.4.2 无线传感网与物联网      | 25 |
| 本章小结                 | 26 |
| 课后思考题                | 27 |
| 第2章 短距离无线通信技术与标准     | 28 |
| 2.1 ZigBee           | 28 |
| 2.1.1 ZigBee 的性能特点   | 29 |
| 2.1.2 ZigBee 的体系结构   | 29 |
| 2.1.3 ZigBee 的工作过程   | 37 |
| 2.2 6LoWPAN          | 38 |
| 2.2.1 6LoWPAN 的基本特点  | 38 |
| 2.2.2 6LoWPAN 的体系结构  | 39 |
| 2.2.3 6LoWPAN 的主要功能  | 39 |

|                    |    |
|--------------------|----|
| 2.2.4 6LoWPAN 的帧格式 | 41 |
| 2.3 蓝牙             | 44 |
| 2.3.1 蓝牙的性能特点      | 44 |
| 2.3.2 蓝牙的体系结构      | 45 |
| 2.3.3 蓝牙的功能单元      | 48 |
| 2.3.4 蓝牙的通信过程      | 48 |
| 2.4 Wi-Fi          | 49 |
| 2.4.1 Wi-Fi 的性能特点  | 50 |
| 2.4.2 Wi-Fi 的主要技术  | 50 |
| 2.4.3 Wi-Fi 的功能单元  | 53 |
| 2.4.4 Wi-Fi 的拓扑结构  | 54 |
| 2.5 其他短距离无线通信技术与标准 | 55 |
| 2.5.1 ISA100.11a   | 55 |
| 2.5.2 WirelessHART | 57 |
| 2.5.3 WIA-PA       | 58 |
| 2.5.4 Z-Wave       | 59 |
| 2.5.5 RFID         | 60 |
| 2.5.6 NFC          | 63 |
| 2.5.7 UWB          | 63 |
| 本章小结               | 65 |
| 课后思考题              | 65 |
| 第3章 无线传感网络拓扑控制     | 66 |
| 3.1 拓扑控制的主要任务和目标   | 66 |
| 3.2 无线传感网络拓扑结构形式   | 67 |
| 3.2.1 平面网络结构       | 67 |
| 3.2.2 层次网络结构       | 68 |
| 3.2.3 混合网络结构       | 68 |
| 3.2.4 Mesh 网络结构    | 69 |

|                                 |                            |
|---------------------------------|----------------------------|
| 3.3 基于能量均衡的拓扑控制.....70          | 5.6.1 质心定位.....102         |
| 3.3.1 基于统一功率分配的<br>控制方法.....70  | 5.6.2 DV-Hop 定位.....103    |
| 3.3.2 基于节点度数的控制方法.....71        | 5.6.3 Amorphous 定位.....104 |
| 3.3.3 基于邻近图的拓扑控制.....71         | 5.6.4 APIT 定位.....104      |
| 3.4 基于分簇的拓扑控制.....73            | 5.6.5 凸规划定位.....105        |
| 3.4.1 LEACH 算法.....73           | 5.6.6 MAP 定位.....105       |
| 3.4.2 HEED 算法.....75            | 本章小结.....105               |
| 3.4.3 TopDisc 算法.....76         | 课后思考题.....106              |
| 3.4.4 GAF 算法.....78             | 第6章 无线传感网络路由协议.....107     |
| 3.4.5 ASCENT 算法.....78          | 6.1 路由设计原则.....107         |
| 本章小结.....80                     | 6.2 路由协议分类.....110         |
| 课后思考题.....80                    | 6.3 以数据为中心的平面路由.....111    |
| 第4章 无线传感网络覆盖控制.....81           | 6.3.1 Flooding 路由.....111  |
| 4.1 覆盖控制的主要内容.....81            | 6.3.2 Gossiping 路由.....113 |
| 4.2 覆盖控制的概念和指标.....82           | 6.3.3 SPIN 路由.....113      |
| 4.2.1 基本概念.....82               | 6.4 基于查询的路由.....114        |
| 4.2.2 算法的评价指标.....83            | 6.4.1 DD 路由.....115        |
| 4.3 节点部署方式和感知模型.....84          | 6.4.2 Rumor 谣传路由.....116   |
| 4.3.1 节点部署方式.....84             | 6.5 基于能量感知的路由.....118      |
| 4.3.2 节点感知模型.....85             | 6.5.1 EA 路由.....118        |
| 4.4 覆盖分类.....86                 | 6.5.2 MPEA 路由.....119      |
| 4.5 典型的覆盖控制算法.....88            | 6.5.3 能量感知路由的改进.....121    |
| 4.5.1 基于网格的覆盖控制.....88          | 6.6 基于地理位置的路由.....122      |
| 4.5.2 基于圆周的覆盖控制.....89          | 6.6.1 GPSR 路由.....123      |
| 4.5.3 基于连通传感器的覆盖控制.....90       | 6.6.2 GAF 路由.....124       |
| 4.5.4 基于轮换活跃/休眠的<br>覆盖控制.....91 | 6.6.3 GEAR 路由.....125      |
| 本章小结.....92                     | 6.6.4 GEM 路由.....127       |
| 课后思考题.....92                    | 6.7 基于分簇的路由.....129        |
| 第5章 无线传感网络节点定位.....93           | 6.7.1 LEACH 路由.....129     |
| 5.1 概述.....93                   | 6.7.2 TEEN 路由.....131      |
| 5.2 定位原理与基本术语.....94            | 6.7.3 PEGASIS 路由.....132   |
| 5.3 方法分类.....95                 | 6.7.4 TTDD 路由.....133      |
| 5.4 技术指标.....96                 | 6.8 基于 QoS 的路由.....134     |
| 5.5 基于测距的定位方法.....97            | 6.8.1 SAR 路由.....135       |
| 5.5.1 测距阶段.....98               | 6.8.2 SPEED 路由.....135     |
| 5.5.2 定位阶段.....99               | 本章小结.....136               |
| 5.6 与距离无关的定位方法.....102          | 课后思考题.....137              |
|                                 | 第7章 无线传感网络操作系统.....138     |
|                                 | 7.1 TinyOS 操作系统.....138    |



|                      |     |                        |     |
|----------------------|-----|------------------------|-----|
| 7.1.1 TinyOS 的框架结构   | 139 | 8.5.2 $\mu$ TESLA 认证   | 179 |
| 7.1.2 TinyOS 的硬件平台抽象 | 140 | 本章小结                   | 180 |
| 7.1.3 TinyOS 的调度机制   | 141 | 课后思考题                  | 181 |
| 7.1.4 nesC 语言        | 141 | 第 9 章 无线传感网络远程传输       | 182 |
| 7.2 Contiki 操作系统     | 146 | 9.1 网络传输               | 182 |
| 7.2.1 Contiki 的功能特点  | 146 | 9.1.1 因特网传输            | 182 |
| 7.2.2 Contiki 的源代码结构 | 147 | 9.1.2 以太网传输            | 184 |
| 7.2.3 Contiki 的环境搭建  | 148 | 9.1.3 无线局域网传输          | 186 |
| 7.3 MantisOS 操作系统    | 149 | 9.2 移动通信传输             | 187 |
| 7.3.1 MantisOS 的体系结构 | 149 | 9.2.1 移动通信技术           | 188 |
| 7.3.2 MantisOS 的设计举例 | 151 | 9.2.2 移动通信远程传输应用<br>举例 | 189 |
| 7.4 SOS 操作系统         | 152 | 9.3 微波传输               | 191 |
| 7.4.1 SOS 的体系结构      | 152 | 9.4 卫星传输               | 192 |
| 7.4.2 SOS 的功能特点      | 153 | 9.4.1 卫星通信简介           | 192 |
| 7.4.3 SOS 的通信机制      | 153 | 9.4.2 北斗卫星数据传输         | 193 |
| 7.5 Z-Stack          | 154 | 9.5 光纤传输               | 195 |
| 7.5.1 Z-Stack 的体系架构  | 155 | 9.5.1 光纤通信原理           | 195 |
| 7.5.2 Z-Stack 的目录结构  | 156 | 9.5.2 光纤通信应用举例         | 197 |
| 7.5.3 Z-Stack 的工作流程  | 157 | 本章小结                   | 199 |
| 本章小结                 | 159 | 课后思考题                  | 199 |
| 课后思考题                | 160 | 第 10 章 无线传感网络应用设计      | 200 |
| 第 8 章 无线传感网络安全策略     | 161 | 10.1 无线传感节点的设计原则       | 200 |
| 8.1 无线传感网络的安全要求      | 161 | 10.2 无线传感节点的功能模块       | 201 |
| 8.1.1 安全现状分析         | 161 | 10.3 无线传感网络节点设计<br>方案  | 206 |
| 8.1.2 安全需求           | 162 | 10.4 设计举例              | 209 |
| 8.1.3 安全目标           | 163 | 10.4.1 芯片选型            | 210 |
| 8.2 攻击类型             | 164 | 10.4.2 开发环境            | 213 |
| 8.3 安全威胁             | 165 | 10.4.3 程序示例            | 219 |
| 8.4 安全策略             | 167 | 本章小结                   | 227 |
| 8.4.1 加密算法的选择        | 167 | 课后思考题                  | 227 |
| 8.4.2 密钥管理           | 174 | 参考文献                   | 228 |
| 8.4.3 安全认证           | 176 |                        |     |
| 8.5 无线传感网络安全举例       | 178 |                        |     |
| 8.5.1 SNEP 加密        | 178 |                        |     |



无线传感网络是当今在国际上备受关注的、多学科高度交叉的、知识高度集成的前沿热点研究领域。无线传感网络技术涉及纳米与微电子技术、新型微型传感器技术、微机电系统技术、片上系统 SoC 设计技术、移动互联网技术、微功耗嵌入式技术等多个技术领域,它与通信技术和计算机技术共同构成信息技术的三大支柱,被认为是对 21 世纪产生巨大影响力的技术之一。通过无线传感网络的部署和采集,可以扩展人们获取信息的能力,将客观世界的物理信息同传输网络连接在一起,改变人类自古以来仅仅依靠自身的感觉等来感知信息的现状,极大地提高了人类获取数据和信息的准确性和灵敏度。在物联网技术高速发展的今天,无线传感网络作为物联网数据获取的重要手段,其在物联网应用体系中的作用日渐凸显,使用方法也日益成熟和规范,应用领域正不断扩大,已经成为未来采集和获取大量物理数据不可或缺的手段之一。

通过本章的学习,读者可以了解无线网络以及无线传感网络的基本知识,把握无线传感网络的发展脉络及其与其他交叉学科的关系,掌握无线传感网络的关键技术和应用领域,了解无线传感网与物联网的区别和联系等。通过本章的学习可以为后续章节的学习打下基础。

## 1.1 无线传感网络概述

### 1.1.1 无线网络及其分类

无线网络就是利用无线电波作为信息传输介质而构成的通信网络,与有线网络用途类似。但两者最大的不同在于传输介质的不同,无线网络利用各种非导向性传输介质(如各种中高频无线电波、微波、红外等)取代有线介质(如电话线、网线等)进行数据传输。当然,在具体使用时,无线网络也可以和有线网络相互配合,共同完成数据的传输。

目前无线网络从是否需要基础设施的角

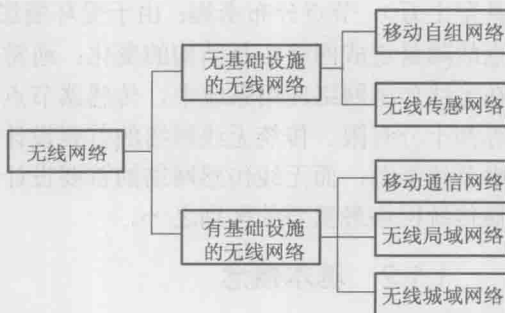


图 1-1 无线网络分类

度来看,可以分为两大类:有基础设施的无线网络和无基础设施的无线网络,如图 1-1 所示。

有基础设施的无线网络需要固定基站,例如,手机通信用的无线蜂窝网需要高大的天线和大功率射频基站来支持,基站就是最重要的基础设施。又例如,Wi-Fi 无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN),无线城域网(Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMax)等,由于采用了接入点(Access Point, AP)这种固定设备,也属于有基础设施无线网。

无基础设施的无线网络又被称为无线自组织网络,或无线 Ad-Hoc 网络,Ad Hoc 源于拉丁语,意思是“for this”,引申为“for this purpose only(某种目的设置的、特别的)”指 Ad Hoc 网络是一种有特殊用途的网络。IEEE 802.11 标准委员会采用了 Ad-Hoc 一词来描述这种特殊的自组织对等式多跳移动通信网络。这种网络节点是分布式的,没有专门的固定基站或者 AP 点,而是由一些处于平等状态的移动站之间相互通信组成的临时网络。这种网络的节点之间不需要经过基站或者其他管理控制设备就可以直接实现点对点的无线通信,而且当两个通信节点之间由于功率或其他原因导致无法实现链路直接连接时,网内其他节点可以帮助中继信号,以实现网络内各节点间的相互通信。由于无线节点是在随时移动的,因此这种网络的拓扑结构也是动态变化的。

无基础设施的无线网络又可以分为两类,一类是移动无线自组网络(Mobile Ad Hoc NETwork, MANET),它是在无线分组网的基础上发展起来的,它的终端往往是快速移动的。一个典型的例子是美军 101 空降师装备的 Ad-Hoc 网络通信设备。该设备可以保证在远程部队空投到一个陌生地点之后,在高度机动的装备车辆上仍然能够实现各种通信业务,而无需借助外部设施的支持。另一类就是无线传感网络(Wireless Sensor Network, WSN),它的节点是静止的或者移动很慢的。这些大量静止的或者缓慢移动的传感器节点通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织网络系统,能够实现对监控区域各种物理数据的采集、量化、处理、融合和传输。

需要指出的是,无线传感网络不等于无线自组网络,虽然无线传感网络与无线自组网络有相似之处,但两者仍存在很大的差别。由于无线传感网络节点往往具有工作环境恶劣、布设区域范围较广、电源供给困难、数据传输率低、传输量少、不需要很大的通信带宽等特点,因此在技术处理和实现方法上与无线自组网等其他的无线网络会有很大的不同。

无线传感网络是集成了监测、控制以及无线通信的网络系统,节点数目庞大(通常上千甚至上万),节点分布密集;由于受环境影响和能量限制,节点容易出现故障,环境干扰和节点故障易造成网络拓扑结构的变化;通常情况下,大多数传感器节点是固定不动的。另外,在无线传感网络应用系统中,传感器节点具有的供电能力、处理能力、存储能力和通信能力等都十分有限。传统无线网络的首要设计目标是提供高服务质量和高效利用带宽,其次才考虑节约能源,而无线传感网络的首要设计目标是能源的高效利用,这也是无线传感网络和其他传统网络最重要的区别之一。

### 1.1.2 基本概念

无线传感网络,也叫无线传感器网络,或者 WSN 网络最初由美国军方提出,随着技术的发展、标准的制定以及一系列应用的产生,今天的无线传感网络已经由最初的军事应用领

域逐步走向工业和民用领域。

无线传感网络的地位有点类似于小规模互联网，俗称微型互联网，因为它是一种由大量小型或者微型传感器组成的互连网络。这些微型传感器一般称作感知节点，无线传感网络就是由这些部署在监测区域内的大量静止或移动的廉价微型传感器节点以自组织和多跳的方式构成的，这些节点协作地感知、采集、传输和处理网络覆盖地理区域内被感知对象的信息，并最终把这些信息发送给网络的所有者。

传感器、感知对象和观察者构成了无线传感网络的三个基本要素。在无线传感网络中，传感器节点监测的数据沿着其他传感器节点逐跳地进行传输。在传输过程中，监测数据可能被多个节点处理，经过路由多跳传递到汇聚节点，最后通过各种远程传输手段（如因特网、卫星、微波、光纤等）到达管理节点。用户再通过管理节点对无线传感网络进行配置和管理，发布监测任务以及收集监测数据。

图 1-2 展示了典型无线传感网络的应用形式及其所涵盖的关键技术和功能单元，监测区域由各类微型无线传感器组成，汇聚节点通过连接因特网或者卫星网将数据传输给远端用户和监测中心。为了利用无线传感器节点对监测区域进行有效的数据采集和传递，需要采用节点定位、拓扑控制、路由设计、时间同步、数据管理以及安全防范等各种技术，这些技术将在后面小节中介绍。

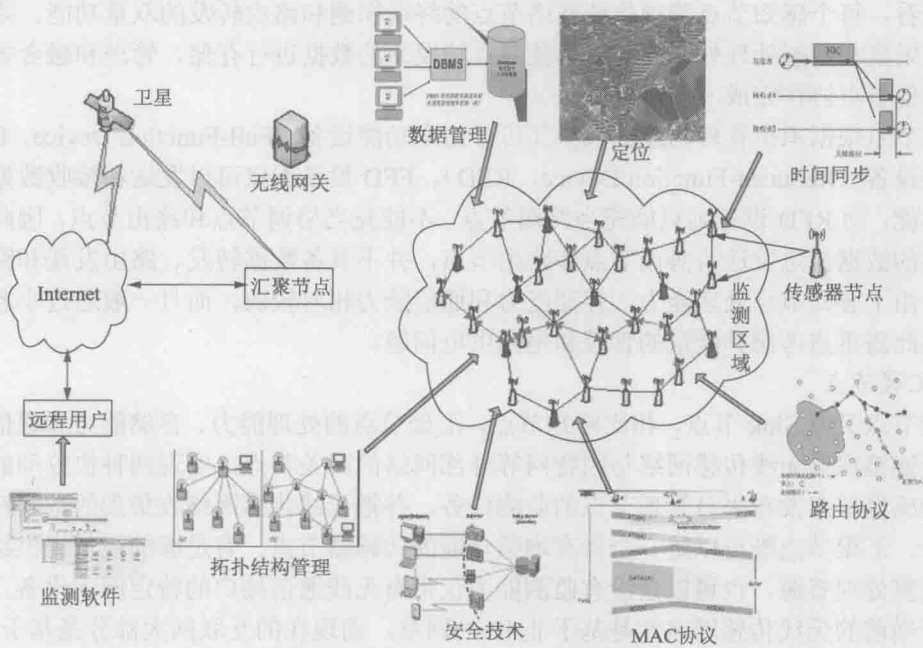


图 1-2 无线传感网络基本组成

1.1.3 节点类型

无线传感网络中的工作节点一般可分为感知节点、汇聚节点和任务管理节点，如图 1-3 所示，分别承担不同的任务角色。

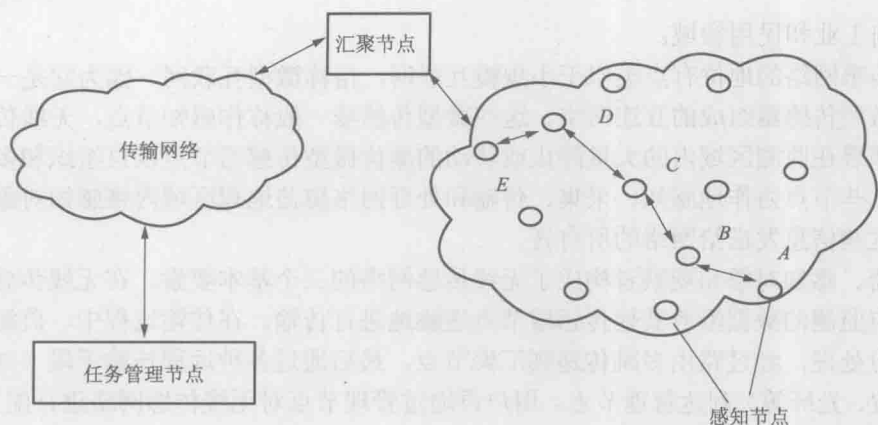


图 1-3 无线传感网络的工作节点

### 1. 感知节点

感知节点 (Sensor Node) 又称为智能微尘 (Smart Mote) 或者智能灰尘 (Smart Dust Mote)，一般工作在各种户内或者户外监测现场（如某个城区、某片水域、某幢建筑等），承担着各种物理参量的信号采集和转换等信息提取工作，以及数据传输与转发等通信工作。因此从功能实现上来看，每个感知节点兼顾传统网络节点的终端探测和路由转发的双重功能。除了进行本地信息采集和数据处理外，还要对其他节点转发来的数据进行存储、管理和融合等处理，同时与其他节点协作完成一些特定任务。

感知节点根据承担管理功能的大小又可分为全功能设备 (Full-Function Device, FFD) 和精简功能设备 (Reduced-Function Device, RFD)。FFD 设备不仅可以发送和接收数据，还具备路由功能，而 RFD 设备则只能充当终端节点，不能充当协调节点和路由节点，因此它只负责将采集的数据信息发送给协调节点和路由节点，并不具备数据转发、路由发现和路由维护等功能。由于感知节点处理能力、存储能力和通信能力相对较弱，而且一般通过小容量电池供电，因此需重点考虑其能量的管理和电源供电问题。

### 2. 汇聚节点

汇聚节点又叫 Sink 节点，相比感知节点，汇聚节点的处理能力、存储能力和通信能力较强。它是连接现场无线传感网络与因特网等外部网络的网关节点，实现两种协议间的转换，同时向传感器节点发布来自管理节点的监测任务，并把无线传感网络收集到的数据转发到外部网络上。汇聚节点既可以是一个具有增强功能的传感器节点，有足够的能量提供更多的内存与计算处理资源，也可以是没有监测能力仅带有无线通信接口的特定网关设备。

由于当前的无线传感网络都是基于非 IP 的网络，而现在的互联网大部分是基于 IP 的网络，因此如果汇聚节点要将无线传感网络采集的数据借助因特网或者其他网络进行远程数据传输，就需要承担不同网络的协议帧转换工作，也就是说这个时候汇聚节点也承担网关 (Gateway) 的角色。

### 3. 任务管理节点

管理节点用于动态地管理整个无线传感网络。无线传感网络的所有者通过任务管理节点访问无线传感网络的资源，它通常为运行有网络管理软件的 PC 或者手持移动终端设备。

1.1.4 感知节点功能单元

无线传感网络在应用过程中的主要任务是对监测区域进行各种物理参量的数据采集、处理和传输，一般并不需要很高的带宽，但是在大部分时间必须保持低功耗，以节省能量的消耗。由于无线传感网络中节点的存储容量受限，因此对协议栈的大小有严格的限制。无线传感网络还对网络安全性、节点自动配置、网络动态重组等方面有一定的要求。

无线传感网络应用系统对感知节点的一般要求是体积小、成本低、使用或者部署起来比较方便，有些节点甚至需要做成可穿戴式（如 Google Project Glass、Apple Watch 等），或者直接植入目标体内，等等。图 1-4 所示为一些典型的无线传感网络感知节点的外观。

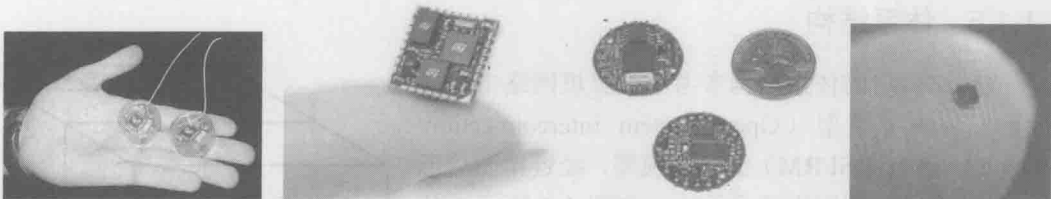


图 1-4 典型微型感知节点

物理环境中的感知节点是无线传感网络的基本单元，节点往往承担着信息采集和信息传递的双重功能，其主要功能模块包括传感器模块、处理器模块（含存储功能）、无线通信模块和电源管理模块四个部分，如图 1-5 所示。

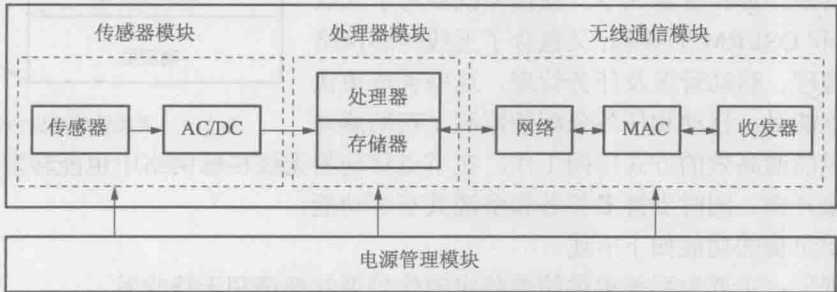


图 1-5 无线传感网络感知节点功能单元

下面介绍感知节点各部分的功能模块。

1. 传感器模块

传感器模块主要由各种类型的微型传感器和 AD/DC 转换器等子模块构成。被监测物理信号的类型决定了传感器单元的类型，而且不同类型的传感器在功能和能耗方面都存在很大差异。人们可以根据感兴趣的物理信号，使用不同类型的传感器进行数据采集，然后传送给处理器模块进行必要的处理。

2. 处理器模块

处理器模块是无线传感网络节点的计算核心，所有的设备控制、任务调度、能量计算、功能协调、通信协议、数据融合和数据转储等都将在这个模块的支持下完成，所以处理器的选择在传感器节点的设计中至关重要。无线传感网络节点的处理器应该满足外形小、集成度高、功耗低、运行速度快、足够的外部通用 I/O 接口和通信接口、成本低、有安全保证等要求。

### 3. 无线通信模块

无线通信模块负责该节点与其他节点或者网络代理节点等之间的无线通信。无线信号的收发在整个结构中耗能最大，在设计时要考虑通信模块的工作模式和收发能耗，这对于降低单个传感器节点的能耗以及延长整个无线传感网络的寿命非常关键。

### 4. 电源管理模块

电源管理模块为无线传感节点各部件提供能量。需要长时间进行数据采集的传感器有时需要通过周边能量收集、无线充电以及移动机器人充电等方式来维持节点的正常运转。电源管理模块不但为无线传感节点提供正常工作所必需的能源，同时还提供必要的电源管理机制来延长无线传感网络的工作寿命。

## 1.1.5 体系结构

无线传感网络的体系结构参考了计算机网络中的开放系统互连参考模型（Open System interconnection/Reference Model, OSI/RM）的七层模型，经过精简后形成了一种典型的五层网络体系结构，如图 1-6 所示。从下至上分别为物理层、数据链路层、网络层、传输层、应用层。此外每层都包括电源管理、移动管理、任务管理等模块。这些管理模块使得感知节点能够按照能源高效的方式协同工作，在节点移动的无线传感网络中转发数据，并支持多任务和资源共享。该模型既参考了互联网的 TCP/IP 和 OSI/RM 的架构，又包含了无线传感网络特有的电源管理、移动管理及任务管理。这些管理模块负责感知节点能量、移动和任务分配的监测，帮助感知节点能够按照能源高效的方式协同工作，在节点移动的无线传感网络中也能转发数据，尽量减少系统能量开销，同时支持多任务和资源共享等功能。

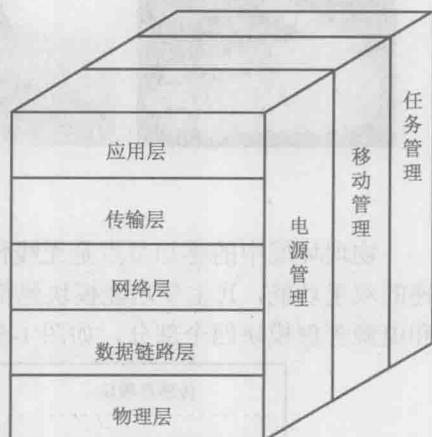


图 1-6 无线传感网络协议体系结构

每层主要负责的功能如下所述。

(1) 物理层：主要为系统提供简单稳定的信号调制解调和无线收发。

(2) 数据链路层：主要负责数据成帧、帧检测、媒体访问和差错控制，协调无线媒介的访问，尽量减少相邻节点广播时的冲突。

(3) 网络层：主要负责路由生成与路由选择。

(4) 传输层：主要负责数据流的传输控制以及与因特网的连接，是保证通信服务质量的重要部分。

(5) 应用层：包括一系列基于监测任务的应用层软件，为不同的应用提供相对统一的高层接口。

管理器的功能如下所述。

(1) 电源管理器：主要是管理传感器节点如何使用能源，在各个协议层都需要考虑节省能量。

(2) 移动管理器：检测并注册传感器节点的移动，维护到汇聚节点的路由，使得传感器节点能够动态跟踪其邻居的位置。

(3) 任务管理器：主要负责在一个给定的区域内平衡和调度监测任务。



## 1.2 无线传感网络的发展与应用

### 1.2.1 发展历程与方向

无线传感网络的发展历程大体可分成三个阶段,从最初的智能传感器发展到无线智能传感器,进而演变到我们今天所述的无线传感网络。下面对这三个阶段的发展渊源以及典型特征进行介绍。

(1) 第一阶段是智能传感器阶段。这个阶段最早可以追溯至越南战争时期使用的传统传感器系统。当年美越双方在密林覆盖的“胡志明小道”进行了一场血腥较量。“胡志明小道”是胡志明部队向南方游击队输送物资的秘密通道,美军对其进行了狂轰滥炸,但效果不大。后来,美军投放了2万多个“热带树”传感器。“热带树”实际上是由震动和声响传感器组成的系统,它由飞机投放,落地后插入泥土中,只露出伪装成树枝的无线电天线,因而被称为“热带树”。只要对方车队经过,传感器探测出目标产生的震动和声响信息,自动发送到指挥中心,美机立即展开追杀,总共炸毁或炸坏4.6万辆卡车。从这里可以看出,智能传感器能将计算能力嵌入到传感器中,使得传感器节点不仅具有数据采集能力,而且具有一定的信息判别和处理能力。

(2) 第二阶段是无线智能传感器阶段。这个阶段处于20世纪70年代末至90年代末之间。美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)于1978年开始资助卡内基·梅隆大学进行分布式传感器网络的研究,这被看成是无线传感网络的雏形。这种分布式传感器网络系统能够实现多兵种协同交战、远程战场自动感知等。无线智能传感器在智能传感器的基础上增加了无线通信能力,大大延长了传感器的感知触角,降低了传感器的工程实施成本。因此在1999年,《商业周刊》将无线传感网络列为20世纪最具影响的21项技术之一。

(3) 第三阶段就是现在的无线传感网络阶段。这个阶段从21世纪开始至今,并还在不断发展和完善。无线传感网络将网络技术引入到无线智能传感器中,使得传感器不再是单个的感知单元,而是能够交换信息、协调控制的有机结合体,实现物与物的互连,把感知触角深入世界各个角落,大大加强了物联网获取目标信息的能力。无线传感网络除了应用于反恐活动以外,在其他商业领域更是获得了很好的应用,所以2002年美国国家重点实验室——橡树岭实验室(Oak Ridge National Laboratory)提出了“网络就是传感器”的论断。

由于无线传感网络在国际上被认为是继互联网之后的第二大网络,2003年美国《技术评论》杂志评出对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术,无线传感网络被列为第一。在现代意义上的无线传感网研究及其应用方面,我国与发达国家几乎同步启动,它已经成为我国信息领域位居世界前列的少数方向之一。在2006年我国发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》中,为信息技术确定了三个前沿方向,其中有两项就与无线传感网络直接相关:智能感知和自组网技术。

未来,无线传感网络技术的发展方向将主要集中在以下3个方面的研究。

(1) 能效。在无线传感网络的研究中,能效问题一直是技术难点。当前的处理器以及无线传输装置依然存在向微型化发展的空间,但在无线网络中需要数量更多的传感器,种类也要求多样化,将它们进行连接会导致耗电量的加大。如何提高网络性能、延长其使用寿命、并将不准确性误差控制在最小等将是未来无线传感网络研究的热点问题。



(2) 数据管理。今后,无线传感网络接收的数据量将会越来越大,但是当前的使用模式对于数量庞大的数据管理和使用能力有限。如何进一步加快大数据分析处理以及管理能力,进而开发出新的应用模式将是非常有必要的。今天信息技术领域风起云涌的云计算技术、数据挖掘技术等新兴技术将为无线传感网络获取的大数据提供一种全新的开发和应用模式。

(3) 标准与协议。标准的不统一会给无线传感网络的发展带来障碍。标准制定的时机也很重要。标准制定得过早,会制约技术的发展,标准制定得过迟,又会影响技术的应用。因此,在未来无线传感网络的发展过程中,要开发出能够全球通用且适用于无线传感网络特殊需要的各种通信标准和工作协议,同时兼顾与其他物理环境感知技术的融合,这将有助于无线传感网络的广泛使用,减少无线传感网络的数据冗余,拓展无线传感网络的应用领域。

### 1.2.2 典型应用举例

无线传感网络应用系统中大量采用具有智能感测和无线传输的微型传感设备或微型传感器,通过这些微型设备和传感器侦测周遭环境,如温度、湿度、光照、气体浓度、PM2.5、PM10、甲醛、电磁辐射、震动幅度等物理信息,并由无线网络将搜集到的信息传送给监控者。监控者解读报表信息后,便可掌握现场状况,进而维护、调整相关系统。由于监控物理世界的重要性从来没有像今天这么突出,所以无线传感网络已成为军事侦测、环境保护、建筑监测、安全作业、工业控制、家庭、船舶和运输系统自动化等应用中的重要技术手段,如图 1-7 所示。



图 1-7 无线传感网络的应用领域

#### 1. 军事侦测

无线传感网络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。由于无线传感网络是由密集型、低成本、随机分布的节点组成的,自组织性和容错能力使其不会因为某些节点在恶意攻击中的损坏而导致整个系统崩溃,这一点是传统的传感器技术无法比拟的。也正是这一点,使无线传感网络非常适合应用于恶劣的战场环境中,包括监控兵力、装备和物资,监视冲突区,侦察敌方地形和布防,定位攻击目标,评估损失,侦察和探测核、生物和化学攻击等。无线传感网络的研究直接推动了以网络技术为核心的新军事革命,

诞生了网络中心战思想和体系。无线传感网络将会成为 C4ISRT (Command, Control Communication, Computing, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance and Targeting) 系统不可或缺的一部分。C4ISRT 系统的目标是利用先进的高科技技术, 为未来的现代化战争设计一个集命令、控制、通信、计算、智能、监视、侦察和定位于一体的战场指挥系统, 受到了军事发达国家的普遍重视。

战场侦查与监控是无线传感网络的典型应用。灵巧传感器网络 (Smart Sensor Web, SSW) 是美国陆军提出的针对网络中心战的需求而开发的满足这类应用的新型无线传感网络。如图 1-8 所示, 用飞行器将大量微传感器节点散布于战场地域, 并自组成网, 边收集、边传输、边融合战场信息。系统软件通过解读传感器节点传输的数据内容, 将它们与诸如公路、建筑、天气、单元位置等相关信息, 以及其他无线传感网络的信息相互融合, 向战场指挥员提供一个动态的、实时或近实时更新的战场信息数据库, 为各作战平台更准确地制定战斗行动方案提供情报依据和服务, 使情报侦察与获取能力产生质的飞跃。通过飞机或其他手段在敌方阵地大量部署各种传感器, 对潜在的地面目标进行探测与识别, 可以使己方以远程、精确、低代价、隐蔽的方式近距离地观察敌方布防, 迅速、全方位地收集利于作战的信息, 并根据战况快速调整和部署新的无线传感网络, 及时发现敌方企图和对我的威胁程度。通过对关键区域和可能路线的无线传感网络布控, 可以实现对敌方全天候地严密监控, 将大量信息集成为一幅战场全景图, 以满足作战力量“知己知彼”的要求, 大大提升指挥员对战场态势的感知水平。

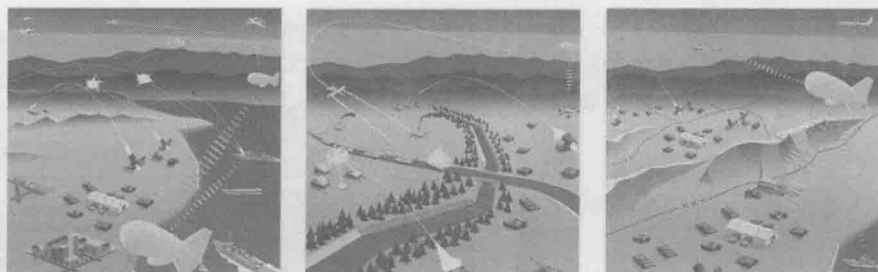


图 1-8 无线传感网络技术在战情感知中的应用

无线传感网络还可为火控和制导系统提供准确的目标定位信息。网络嵌入式系统技术 (Network Embedded System Technology, NEST) 战场应用实验是美国国防高级研究计划局主导的一个项目, 它应用了大量的微型传感器、先进的传感器融合算法、自定位技术等方面的成果。该项目成功地验证了能够准确定位敌方狙击手的传感器网络技术, 它采用多个廉价音频传感器协同定位敌方射手, 并标识在所有参战人员的个人计算机中, 三维空间的定位精度可达到 1.5m, 定位延迟达到 2s, 甚至能显示出敌方射手采用跪姿和站姿射击的差异。

无线传感网络还可用在核生化监测和防恐中, 将微小的传感器节点部署到战场环境中, 形成自主工作的无线传感网络系统, 并让其负责采集有关核生化数据信息, 形成低成本、高可靠的核生化攻击预警系统。这一系统可以在不耗费人员战斗力的条件下, 及时、准确地发现己方阵地上的核生化污染, 为参战人员提供宝贵的快速反应时间, 从而尽可能地减少人员伤亡和装备损失。无线传感网络还可以防范针对以地铁、车站等场所为目标的生化武器袭击, 并及时采取防范对策。如将各种化学传感器和网络技术集于一体, 无线传感器一旦检测到某