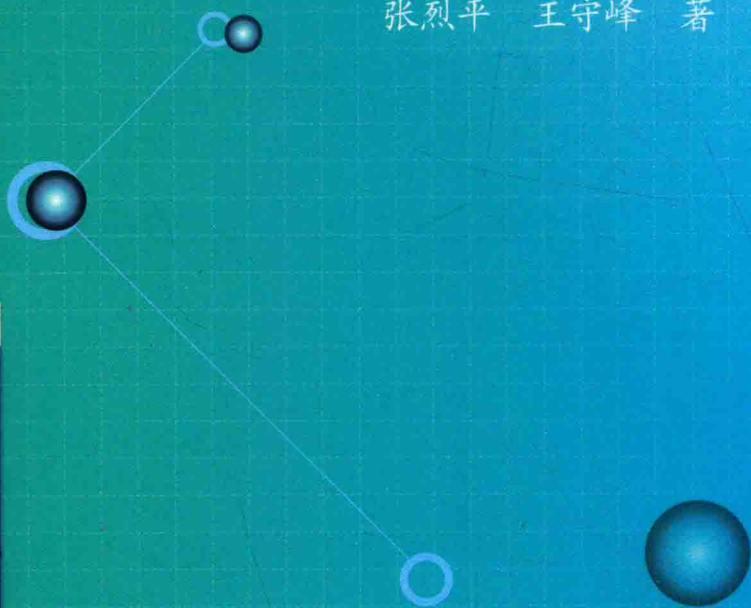


无线传感器网络节点定位 技术研究

WUXIAN CHUANGANQI WANGLUO JIEDIAN DINGWEI
JISHU YANJIU

张烈平 王守峰 著



非
外
借

中国原子能出版社

无线传感器网络节点定位 技术研究

张烈平 王守峰 著

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络节点定位技术研究 / 张烈平, 王守峰著. -- 北京: 中国原子能出版社, 2019. 5

ISBN 978-7-5022-9816-6

I. ①无… II. ①张… ②王… III. ①无线电通信—传感器—无线电定位法—研究 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 115299 号

内 容 简 介

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是在传感器技术、无线通信技术、网络技术和嵌入式计算机技术基础上发展起来的一门新兴的信息获取技术,广泛应用于军事、智能交通、环境监控、医疗卫生等众多领域。其中,节点位置信息在 WSN 应用中非常重要,一个没有节点位置信息的 WSN 是没有任何意义的。

本书对 WSN 节点定位技术进行了较为详细的研究,主要内容包括: WSN 的节点定位技术、基于智能算法优化的 WSN 节点二维定位技术、基于智能算法优化 LSSVR 的 WSN 节点三维定位技术、基于 KF-LSSVR 的 WSN 三维移动节点定位技术、基于 RSSI-LSSVR 的 WSN 节点安全定位技术、基于 WSN 的老人行为监测技术应用等。

本书结构合理,条理清晰,内容丰富新颖,可读性强,是一本值得学习研究的著作,可供从事 WSN 领域的研究人员和工程技术人员参考使用。

无线传感器网络节点定位技术研究

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 张琳

责任校对 冯莲凤

印刷 三河市铭浩彩色印装有限公司

经销 全国新华书店

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 14

字数 251 千字

版次 2019 年 9 月第 1 版 2019 年 9 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-5022-9816-6 定价 68.00 元

网址: <http://pub.ouc.edu.cn> E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

前 言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由大量布置在监测区域的微型传感器节点以 Ad Hoc 方式组成的一个多跳通信的自组织网络,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中目标对象的信息,并发送给观察者。无线传感器网络是一门包含了微电子学、无线通信和无线网络等多学科的交叉技术,随着体积小、低功耗、价格低和具有多功能的传感器节点的发展和应用,无线传感器网络开始广泛应用到人们的经济和生活当中,并出现了大量的新应用,如环境监测、精细农业、医疗监测、智能建筑物故障检测和目标跟踪及定位等。在大多数应用中,确定传感器节点的物理位置是 WSN 应用的基本要求,采集不附加物理位置信息的数据没有多大的用处,不知道传感器节点的位置而进行数据的传送也没有任何意义。因此,传感器节点的定位对于 WSN 的应用来说至关重要,研究适合 WSN 应用的定位技术具有重要的意义和价值。

现在针对 WSN 定位的研究大多数是二维环境或静态节点的定位,然而随着人们的需求,三维环境下或移动节点的定位算法受到的关注度越来越高,故三维环境下或移动节点定位算法的研究非常有意义。同时,虽然目前已经有不少 WSN 节点定位算法,但很多都只考虑了环境复杂性,而没考虑网络安全性,但其部署在开放的、无人值守的环境中,不法分子可能攻击定位系统窃取或伪造监测数据,这让定位安全性面临巨大挑战。这就需要研究安全性更高以及精确性更强的 WSN 节点定位技术。

针对以上这些问题,本书对 WSN 节点定位技术进行了较为详细的研究。全书共 7 章,主要包括:无线传感器网络概述、无线传感器网络的节点定位技术、基于智能算法优化的 WSN 节点二维定位技术、基于智能算法优化 LSSVR 的 WSN 节点三维定位技术、基于 KF-LSSVR 的 WSN 移动节点三维定位技术、基于 RSSI-LSSVR 的 WSN 节点安全定位技术、基于 WSN 的老人行为监测技术应用等。

本书由张烈平负责撰写第 1、2、4、5、6、7 章,王守峰负责撰写第 3 章,张烈平负责最后的统稿、审校工作。本书的部分章节是在相关研究生的研究基础上整理完成的,这些研究生包括:王守峰、陈鸣、王平、季文军、彭飞、王瑞。衷心感谢他们为本书所做的研究工作和贡献。本书在撰写过程中,参

考了大量有价值的文献与资料,吸取了许多人的宝贵经验,在此向这些文献和资料的作者表示衷心的感谢。虽然作者努力把这些文献都列出,但难免有疏漏之处,诚挚地希望得到读者和同行的谅解。本书的出版得到国家自然科学基金应急管理项目(项目编号:61741303)、广西自然科学基金项目(项目编号:2017GXNSFAA198161)以及广西空间信息与测绘重点实验室项目(项目编号:桂科能 16-380-25-23,桂科能 15-140-07-23)等项目的资助。此外,本书的撰写得到了桂林理工大学的支持和鼓励,在此表示感谢。由于无线传感器网络节点定位技术发展的日新月异,加之作者水平及时间有限,书中难免有不足和疏漏之处,敬请广大读者和同行给予批评指正。

作者

2019年2月

目 录

第 1 章 无线传感器网络概述	1
1.1 无线传感器网络的结构	1
1.2 无线传感器网络的特点	3
1.3 无线传感器网络的应用领域	5
1.4 无线传感器网络的研究现状与发展趋势	11
第 2 章 无线传感器网络的节点定位技术	17
2.1 节点定位技术的研究背景和研究现状	17
2.2 节点定位技术的基础	19
2.3 典型的基于测距定位算法和基于非测距定位算法	24
2.4 节点定位算法的性能评价标准	34
第 3 章 基于智能算法优化的 WSN 节点二维定位技术	36
3.1 差分进化算法理论	36
3.2 粒子群优化算法理论	40
3.3 基于差分进化算法优化的 WSN 节点二维定位	43
3.4 基于粒子群优化算法优化的 WSN 节点二维定位	49
3.5 基于差分进化和粒子群算法混合优化的 WSN 节点二维定位	55
第 4 章 基于智能算法优化 LSSVR 的 WSN 节点三维定位技术	71
4.1 最小二乘支持向量机理论	71
4.2 布谷鸟搜索算法理论	79
4.3 DV-Hop 理论	81
4.4 基于 DV-Hop 的 WSN 节点三维定位	84
4.5 基于布谷鸟搜索算法优化 DV-Hop 的 WSN 节点三维定位	96
4.6 基于 LSSVR 的 WSN 节点三维定位算法	105
4.7 基于粒子群算法优化 LSSVR 的 WSN 节点三维定位	111

4.8	基于差分进化算法优化 LSSVR 参数的 WSN 节点三维定位	122
第 5 章	基于 KF-LSSVR 的 WSN 三维移动节点定位技术	132
5.1	移动节点定位算法介绍	132
5.2	基于 LSSVR 的回归建模定位理论	135
5.3	卡尔曼滤波算法理论	138
5.4	基于 LSSVR 的 WSN 移动节点三维定位	141
5.5	基于 KF-LSSVR 的 WSN 移动节点三维定位	151
第 6 章	基于 RSSI-LSSVR 的 WSN 节点安全定位技术	163
6.1	安全定位算法概述及分类	163
6.2	安全定位攻击模型及性能评价指标	168
6.3	传统 RSSI 测距算法原理及其改进	173
6.4	基于改进 RSSI-LSSVR 的 WSN 三维节点定位	180
6.5	基于改进 RSSI-LSSVR 的女巫攻击检测	190
第 7 章	基于 WSN 的老人行为监测技术应用	195
7.1	监控系统方案设计	195
7.2	系统硬件电路设计	197
7.3	系统软件设计	199
7.4	实验与结果分析	206
参考文献	213

第 1 章 无线传感器网络概述

1.1 无线传感器网络的结构

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是由分布在一定范围的大量传感器节点组成,各节点间多以无线多条的无中心方式连接,能够协作地感知、采集和处理网络覆盖区域内目标对象的信息,并返回给观察者^{①②}。

无线传感器网络主要包括 4 类基本实体对象:目标、传感器节点、汇聚节点和监测区域。但对于整个系统来说,还需定义与外部网络连接的网关、外部传输网络、基站、外部数据处理网络、远程任务管理单元和用户等,如图 1-1 所示。

在网络中,大量的传感器节点随机部署在目标的邻近区域,通过自组织方式构成网络,形成对目标的监测区域。传感器节点对目标进行检测,获取的数据经本地简单处理后再通过邻近传感器节点采用多跳的方式传输到汇聚节点,该节点同时又是无线传感器网络与外部网络通信的网关节点。网关节点通过一个单跳链接或一系列的无线网络节点组成的传输网络,把数据从监测区域发送到提供远程连接和数据处理的基站,基站再通过外部网络(比如 Internet 或卫星通信网络)传输到远程数据库。最后,利用各种应用软件对采集到的数据进行分析处理,通过各种显示方式提供给终端用户。用户和远程任务管理单元也可以通过外部网络,与汇聚节点进行交互,汇聚节点可向传感器节点发布查询请求和控制指令,并接收传感器节点返回的目标信息。

无线传感器网络针对的目标是面向应用的信息源,而网络就是通过目

① 唐宏,谢静,鲁玉芳,等.无线传感器网络原理及应用[M].北京:人民邮电出版社,2010.

② 王殊,阎毓杰,胡富平,等.无线传感器网络的理论及应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2007.

标的热红外线、声呐、雷达或地震波等信号,来获取包括温度、噪声或运动方向和速度等目标属性,从而实现用户想要完成的目的,其中包括环境监测、事件检测、目标定位、目标跟踪等。

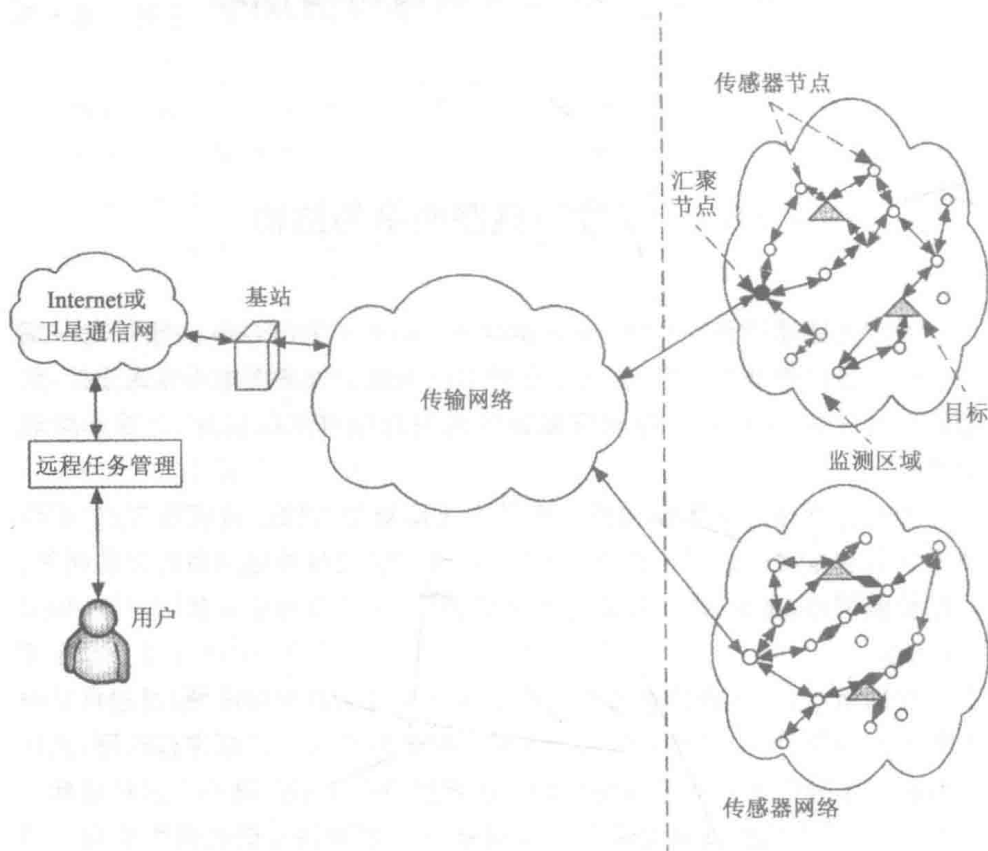


图 1-1 无线传感器网络的系统架构

(1)传感器节点。传感器节点通常是一个嵌入式系统,由于受到体积、价格和电源供给等因素的限制,它的处理能力、存储能力相对较弱,通信距离也很有限,通常只与自身通信范围内的邻居节点交换数据。传感器节点具有原始数据采集、本地信息处理与其他节点协同工作的能力,其基本部分组成和功能在后面会重点介绍。节点与节点之间以无线多跳的无中心方式连接,网络拓扑处于动态可变状态。由于传感器节点数量众多且资源有限,单个节点只能采集有限范围和类型的原始信号来进行本地信息的初步处理,并在有限存储空间内保存有限范围和类型的处理结果。

(2)汇聚节点。汇聚节点通常具有较强的处理能力、存储能力和通信能力,它既可以是一个具有足够能量供给和更多内存资源与计算能力的增强型传感器节点,也可以是一个带有无线通信接口的特殊网管设备。汇聚节

点是感知信息的接受者和应用者,从广义的角度来说,汇聚节点可以是人,也可以是计算机或其他设备。例如,军队指挥官可以是传感器网络的汇聚节点;一个由飞机携带的移动计算机也可以是传感器网络的汇聚节点。在一个传感器网络中,汇聚节点可以有一个或多个,一个汇聚节点也可以是多个传感器网络的用户。

汇聚节点有两种工作模式:一种是主动式,工作于该模式的汇聚节点周期性扫描网络和查询传感器节点从而获得相关的信息;另一种是响应式,工作于该模式的汇聚节点通常处于休眠状态,只有传感器节点发出的感兴趣事件或消息触发才开始工作,一般来说,响应式工作模式较为常用。

汇聚节点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。对象是汇聚节点感兴趣的监测目标,也是传感器网络的感知对象,如车辆、行人、动植物、房屋、路桥、江河湖泊、有害气体等,这些对象可以用表示物理现象、化学现象或其他现象的数字量进行描述和表示,如温度、湿度、高度、浓度、速度、频率、概率等。汇聚节点在网内作为信息收集点或控制者,被授权监听和处理网络的事件消息和数据,可向网络发出查询请求或派发任务。在网外,它可作为中继或网关,通过各种有线或无线链路连接到远端控制单元和用户,起到外界的控制单元与用户进行信息交换的作用。

1.2 无线传感器网络的特点

无线传感器网络是一种特殊的无线自组织网络,比较类似于传统的无线自组织网络,主要表现在自组织特性、分布式控制、拓扑动态性等方面^①。

(1)自组织特性。在许多无线传感器网络应用中,传感器节点通常是随机部署的,事先无法确定节点的位置和节点间的相邻关系。例如,通过飞机将大量传感器节点撒播在面积广阔的原始森林或用火炮将传感器节点投射到敌方战区。因此,传感器节点需要具有自组织能力。在部署后,能够在任何时间、任何地点自动构建成多跳的无线网络,组网跟任何固定网络设施关系都不大,并且能够在网络拓扑发生变化的情况下自动重构网络。

(2)分布式控制。无线传感器网络没有严格的控制中心,所有传感器节

^① 郑军,张宝贤.无线传感器网络技术[M].北京:机械工业出版社,2012.

点地位平等,可以通过分布式控制协调来完成节点之间的工作,是一个分布式感知网络。节点可以随时加入或离开网络,任何节点的故障不会对整个网络的运行造成任何影响,抗毁性比较强。

(3)拓扑动态性。无线传感器网络的拓扑结构会由于各种不同的因素而频繁发生变化。例如,环境条件的变化会影响到无线信道的质量,导致通信链路的间断。传感器节点由于工作环境恶劣容易损坏,并随时可能由于各种原因发生故障而导致失效,节点会由于能量耗尽而死亡,节点会加入或离开网络,某些节点和监测目标具有移动性等。所有这些情况的发生都会使网络的拓扑结构发生变化。因此,无线传感器网络的拓扑结构具有很强的动态性。

但是,无线传感器网络与传统的无线自组织网络差别非常明显,重点表现在网络规模大、节点能力受限、节点可靠性差、多对一传输模式、应用相关性、冗余度高、以数据为中心等方面。

(1)网络规模大。为了保证网络有效、可靠地工作,获取准确的监测数据或目标信息,无线传感器网络通常需要大规模地部署在指定地理区域。这里,大规模主要体现在以下两个方面:一方面是传感器节点分布的区域范围大且节点数量多。例如,在原始森林采用传感器网络进行森林防火或环境监测,需要部署成千上万个传感器节点;另一方面,传感器节点部署的密度高,在一个很小的区域范围内,密集部署了许多传感器节点。和传统无线自组织网络比起来,其节点的数量和密度均有若干数量级的提高。无线传感器网络不是依靠单个节点的能力,而是通过大量冗余节点的协同工作来完成所指定的任务。

(2)节点能力受限。传感器节点通常由电池供电。由于传感器节点的微型化,节点的电池容量十分有限。而且在大多数情况下,传感器节点被部署在恶劣或敌对的环境下,更换电池或给电池充电的难度比较大甚至是无法实现。因此,传感器节点的能量十分受限,这对节点的工作寿命和网络的生存时间具有决定性的影响。同时,传感器节点低成本、微型化的要求使节点的处理能力和存储容量大打折扣,也就无法再进行复杂的计算。此外,传感器节点在体积、能量方面的限制会在很大程度上影响节点的通信能力。

(3)节点可靠性差。无线传感器网络通常部署在恶劣或敌对的环境中,传感器节点往往在无人值守的状态下工作,导致维护节点和网络的难度非常大,甚至不可能。因此,传感器节点容易损坏或发生故障。

(4)多对一传输模式。在无线传感器网络中,节点所监测和采集到的信息和数据通常由多个源节点向一个汇聚节点传送,呈现为多对一的数据传

输模式。这种数据传输模式与传统网络中的模式差别非常明显。

(5)应用相关性。无线传感器网络是以任务或应用为出发点的,不同的传感器网络所要收集的数据类型也会有所差别,故导致了在设计网络时要按照不同的要求来进行,也就无法避免其硬件平台、软件系统和网络协议之间的差异。因此,在传统计算机网络中使用统一的通信协议的情况不会发生在无线传感器网络中。要根据具体的应用需求来设计传感器网络,传感器网络与传统网络设计之间的差别也主要体现在该方面。

(6)冗余度高。无线传感器网络通常采用大量传感器节点协同完成指定的任务,这些节点在指定的地理区域被密集部署,多个传感器节点所获取的数据和信息通常具有较强的相关性和较高的冗余度。

(7)以数据为中心。无线传感器网络是一个以数据为中心的网络,用户通常只关注指定区域内所监测对象的数据,而某个具体节点所监测到的数据不是其关注的对象。用户在查询数据或事件时,通常直接将所关心的对象或事件发布给网络,而不是传送给网络中某个具体的节点,网络在获取指定对象或事件的信息后汇报给用户。这就是无线传感器网络以数据为中心的特点,区别于传统网络的寻址过程,各个节点的信息能够被快速、有效地收集起来,融合提取出有用信息并直接传送给终端用户。

1.3 无线传感器网络的应用领域

1.3.1 军事应用

传感器网络可快速部署、可自组织、隐蔽性强且容错性高,满足作战要求^①。典型设想是用飞行器将大量微传感器节点散布在战场的广阔地域,这些节点自组成网,将战场信息边收集、边传输、边融合,为各参战单位提供“各取所需”的情报服务。传感器网络由大量的随机分布的节点组成,即使有一部分节点被敌方破坏,余下的节点仍然可自组织形成网络,传感器网络可以通过分析采集到的数据,得到十分精确的目标定位,并由此为火控和制导系统提供精确制导。

^① 余成波,李洪兵,陶红艳.无线传感器网络实用教程[M].北京:清华大学出版社,2012.

1.3.1.1 智能微尘

智能微尘是一个具有电脑功能的超微型传感器,其是由微处理器、无线电收发装置以及使它们能够组成一个无线网络的软件共同组成。将一些无线传感器节点散放在一定范围内,它们就能够相互定位,收集数据并向基站传递信息。近几年,由于硅片技术和生产工艺的突飞猛进,集成有传感器、计算电路、双向无线通信模块和供电模块的微尘器件的体积已经缩小到沙粒般大小,但信息收集、信息处理以及信息发送所必需的全部部件仍然包含在其内部。未来的智能微尘甚至可以悬浮在空中几个小时。搜集、处理、发射信息,它能够仅依靠微型电池工作多年。智能微尘的远程传感器芯片能够跟踪敌人的军事行动,可以把大量智能微尘装在宣传品、子弹或炮弹中,在目标地点撒落下去,形成严密的监视网络,对敌军进行监视。

1.3.1.2 战场环境侦察与监视系统

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等,为更准确地制定战斗行动方案等提供情报依据。它借助于“数字化路标”,为各作战平台与单位提供所需要的情报服务。该系统由撒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。

1.3.1.3 传感器组网系统

美国海军最近也确立了“传感器组网系统”研究项目。一套实时数据库管理系统为传感器组网系统的核心环节。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,而管理工作无须借助于其他专用设备,只需通过一台专用的商用便携机即可。该系统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。该系统可以部署到各级指挥单位中。

传感器网络已经成为军事 C4ISR (Command, Control, Communication, Computing, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance and Targeting) 系统必不可少的一部分,受到军事发达国家的高度重视,各国均投入了大量的人力和财力进行研究。

1.3.2 工业领域

无线传感器网络可用于工业领域中的危险环境^①。在煤矿、石化、冶金行业,无线传感器网络把部分操作人员从高危环境中解脱出来的同时,使其在井下安全生产的诸多环节得到更高的安全保障,也可为矿难发生后的搜救工作提供更多的便利。成功应用的系统还有成峰公司与陕西天和集团共同研发的矿工井下区段定位系统,其结构框图如图 1-2 所示。

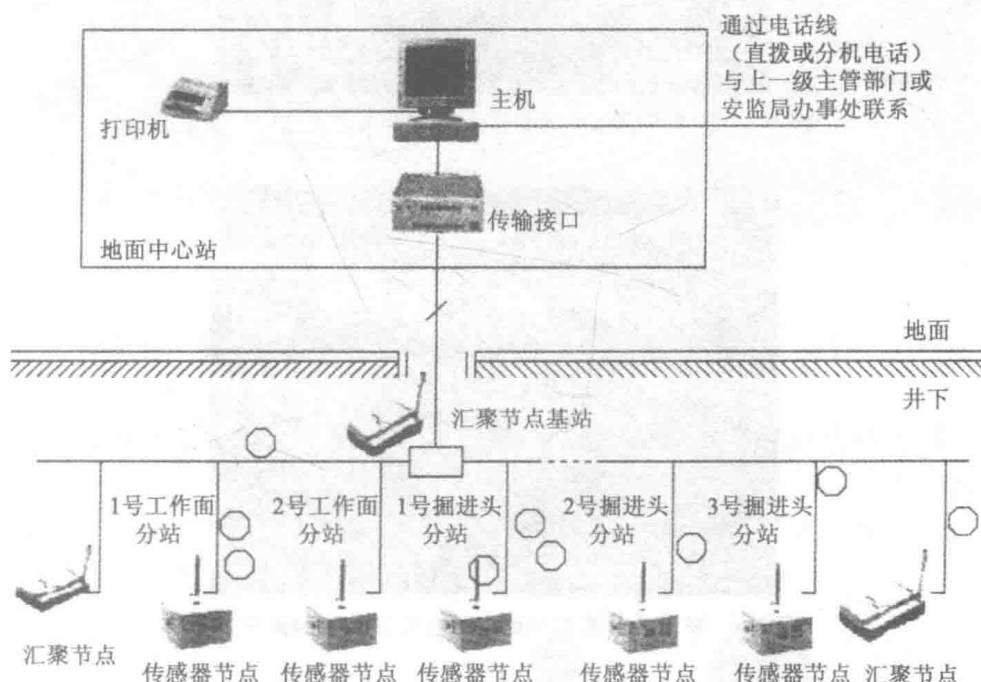


图 1-2 煤矿安全环境监测无线传感器网络的基本结构

1.3.3 建筑领域

利用适当的传感器,可以有效地构建一个三维立体的防护监测网络(图 1-3)。该系统可用于监测桥梁、高架桥、高速公路等道路环境,能减少桥梁事故所造成的生命财产损失^②。

将具有温度、湿度、压力等传感器的节点布放在珍贵的古老建筑保护对

① 张永恒. 物联网核心技术与应用[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2016.

② 巩秀钢. 物联网中的关键技术及应用探析[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2015.

象当中,无须拉线钻孔,便可有效地对建筑物进行长期的监测(图 1-4)。

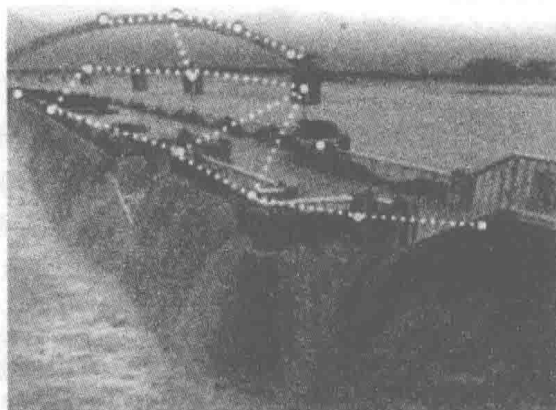


图 1-3 基于无线传感器网络的桥梁结构监测系统示意图

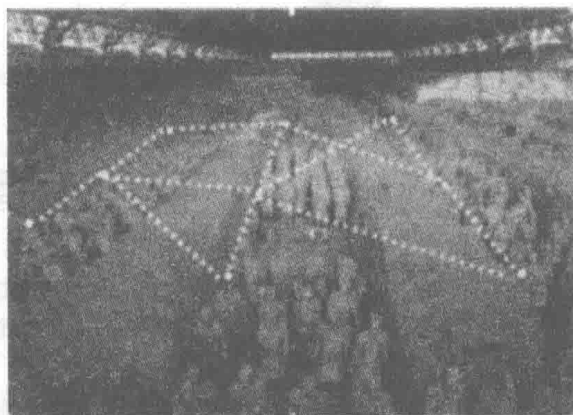


图 1-4 将无线传感器网络应用在珍贵文物的保护场地

1.3.4 环境观测和预报领域

随着人们对于环境的日益关注,环境科学所涉及的范围越来越广泛。环境检测中对无线传感器网络的应用^{①②},一是利用无线传感器网络的节点分布的广泛性,可以大范围地采集数据。另一方面,利用无线传感器网络的自组织的特点,可以借助于航天器布撒的传感器节点实现对星球表面长时间的监测。除了空间工作站,目前空间探索特殊的环境需要极高的自动化。因此,无线传感器网络技术在空间探索方面有着巨大的应用。

① 巩秀钢. 物联网中的关键技术及应用探析[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2015.

② 张永恒. 物联网核心技术与应用[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2016.

无线传感器在生物种群研究方面得到了广泛的应用。2005 年,科研人员利用传感器来探测北澳大利亚蟾蜍的分布情况,科研人员将采集到的信号在节点上就地处理,然后将处理后的少量结果数据发回给控制中心。通过处理,就可以大致了解蟾蜍的分布、栖息情况,如图 1-5 所示。

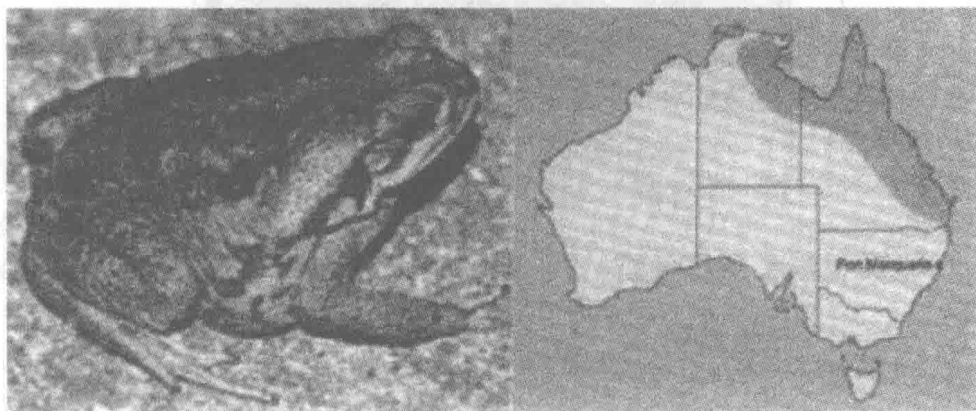
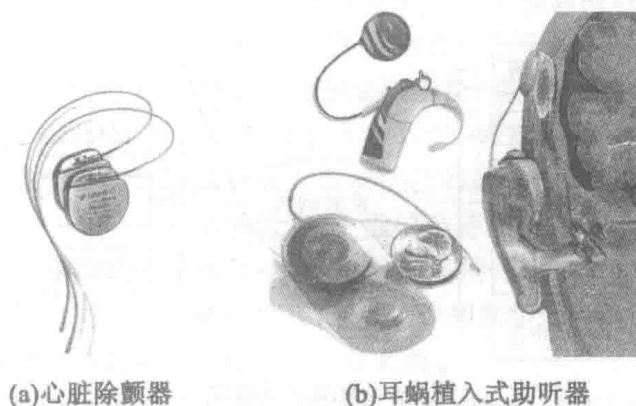


图 1-5 北澳大利亚蟾蜍的分布情况

1.3.5 医疗健康与监护领域

植入式传感器(图 1-6)具有体积小、重量轻等特点,因此这类传感器可应用于监视病人活动的**心脏起搏器**。此外,研究人员开发出了基于多个加速度传感器的无线传感器网络系统^①,用于进行人体行为模式监测,如坐、站、躺、行走、跌倒、喝水等(图 1-7)。



(a)心脏除颤器

(b)耳蜗植入式助听器

图 1-6 植入式传感器

^① 巩秀钢. 物联网中的关键技术及应用探析[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2015.



图 1-7 基于无线传感器网络技术的人体行为监测系统

1.3.6 智能家居

现有智能家居多以有线网络为主,布线较为烦琐,且网络处理能力非常有限。传感器网络能够应用在家居中。在家电和家具中嵌入传感器节点,通过无线网络与 Internet 建立连接,可以为人们提供更加舒适、方便和更具有人性化的智能家居环境。利用远程监控系统可完成对家电远程遥控。智能家居的发展跟家庭网络技术在家庭内部的推广密切相关。家庭网络是整个智能家居系统的基础,要实现家居智能化,就必须能够实时监控住宅内部的各种信息,例如水、电、气的供给系统等,从而采取相应的控制,为此智能家居必须能够运用传感器采集各种信息,如温度、湿度、有无燃气泄漏、小偷入室等。图 1-8 为智能家居构成。

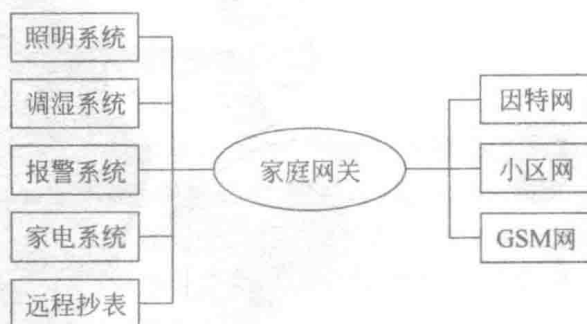


图 1-8 智能家居构成