

国家自然科学基金项目

国家高技术研究发展计划（863计划）项目

中央高校基本科研业务费项目

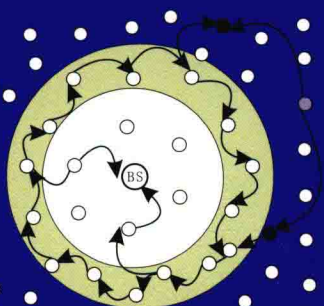
四川省科技支撑计划项目

分层无线传感器

网络关键技术

FENCENG WUXIAN CHUANGANQI
WANGLUO GUANJIAN JISHU

王佳昊 秦志光 侯 宇◎编著



电子科技大学出版社

国家自然科学基金项目

国家高技术研究发展计划（863计划）项目

中央高校基本科研业务费项目

四川省科技支撑计划项目

分层无线传感器 网络关键技术

FENCENG WUXIAN CHUANGANQI
WANGLUO GUANJIAN JISHU

王佳昊 秦志光 侯 宇◎编著



电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

分层无线传感器网络关键技术 / 王佳昊, 秦志光,
侯宇编著. — 成都: 电子科技大学出版社, 2017. 1
ISBN 978-7-5647-3856-3

I. ①分… II. ①王… ②秦… ③侯… III. ①无线电
通信—传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第205730号

内 容 简 介

分层结构凭借良好的效率和易于管理等优势成为无线传感器网络中的一个重要分支, 在科学研究和实际应用中都受到高度重视。本书在对分层路由算法归类的基础上比较深入地分析和总结了分层无线传感器网络结构和特点, 从安全、效率和应用的角度出发对其中的分层路由、密钥管理、数据融合、节点定位、多目标跟踪和位置隐私6个关键问题进行了深入探讨。汇集了相关内容最典型的代表性成果, 并融合国内外最新研究进展进行了总结。

本书面向从事物联网工程、计算机相关领域研究的科研人员, 也可作为相关专业高等院校研究生和本科高年级教材, 对从事无线传感器网络技术研发、应用和管理的研究者具有一定参考价值。

国家自然科学基金项目(60903157)

国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA010706)

中央高校基本科研业务费项目(ZYGX2011J066)

四川省科技支撑计划项目(2013GZ0022)

分层无线传感器网络关键技术

王佳昊 秦志光 侯宇 编著

出 版: 电子科技大学出版社(成都市一环路东一段159号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 曾艺

责任编辑: 曾艺

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 三河市明华印务有限公司

成品尺寸: 185mm×260mm 印张 13.75 字数 350千字

版 次: 2017年1月第一版

印 次: 2017年1月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-3856-3

定 价: 59.00元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

序 言

随着近年来人们对传感网和物联网的关注度不断提高,无线传感器网络作为一种重要的前端信息感知技术正逐渐由研究测试阶段步入实质应用阶段,渐渐展现出其巨大的市场价值。

无线传感器网络综合了传感器技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术和无线通信技术,能够监测、感知和采集网络铺设区域内的各种环境或对象信息,并自组织地进行网内协作来对这些数据进行处理,从而获得详尽而准确的侦测数据,传送到需要这些信息的用户。随着人们对该类型网络研究的深入,其中的分层网络结构由于能够获得较好的网络效率、结构清晰且易于与实际应用相结合,成为无线传感器网络中的一个重要分支,在科学研究和实际应用中都受到高度重视。

尽管对于无线传感器网络本身已有不少相关书籍和资料,但其中关于分层结构无线传感器网络的描述往往只占很少篇幅,专门针对其中关键技术进行详细分析的书籍更是缺乏。为了对该课题下关键技术进行有效的总结和提炼,本书在对分层路由算法归类的基础上比较深入地分析和总结了分层无线传感器网络结构和特点,从安全、效率和应用的角度出发对其中的6个关键问题进行了深入探讨。汇集了相关课题最典型的代表性成果,并融合国内外最新进展对各领域的研究方向进行了总结。

全书共分为7章,其中第二章分层路由协议重点解释了分层无线传感器网络的特征和实现原理,是对本书后五章所介绍的各个关键技术的铺垫和基础。读者可以按顺序先阅读第二章,再根据兴趣从第三至七章中选择其它感兴趣内容阅读。或根据需要直接跳到后面相应专题选择阅读。第三至五章是分层无线传感器网络实施本身需要解决的安全、融合与定位基本功能。第六、七章是从应用角度介绍了多目标跟踪技术的实现和信息采集过程中的位置隐私保护问题。

本书旨在为从事物联网,尤其是无线传感器网络研究领域的读者服务,主要从算法、协议角度出发,较系统地阐述了分层无线传感器网络基础架构和关键技术。本书面向的主要对象包括从事相关领域研究的科研人员,学习物联网相关课程的高等院校物联网工程类、计算机类专业研究生和本科高年级学生,以及从事无线传感器网络技术研发、应用和管理的工程技术人员。

在本书的编写过程中,包红来、郭祥、徐志富和王瑞锦对本书的内容组织和撰写作出了巨大贡献,在此对他们表示真诚的感谢。另外我们整个科研小组的同学都为本书的

编写提供了帮助，他们包括：黄义夫、王星、陈浩、屈宏、胡龙、游小荣、王启旭、丁哲、张翔、杜力等。同时还感谢吴劲老师和靳京博士的大力帮助，通过与他们的讨论得到了许多宝贵意见，在此对他们表示深深的感谢。

由于作者水平有限，书中内容难免有不尽周全之处。本书仅涵盖了分层无线传感器技术的 6 个方面，还有很多重要内容未能涵盖进来，不足之处希望得到广大读者朋友的指正。如果您有任何意见或建议，欢迎发邮件到 wangjh@uestc.edu.cn 与我们联系。也欢迎相关领域的同仁能与我们加强交流，共同扩展该领域的研究。希望本书能为推进无线传感器网络的进步略尽绵薄之力。

作者

目 录

第1章 分层无线传感器网络	1
1.1 无线传感器网络	1
1.1.1 无线传感器网络的组成	1
1.1.2 无线传感器网络的特点	2
1.1.3 无线传感器网络的体系结构	3
1.2 基于分层的无线传感器网络	4
1.2.1 分层无线传感器网络的结构	4
1.2.2 分层无线传感器网络的关键技术	5
1.2.3 特点及性能指标	6
1.3 分层无线传感器网络研究及发展	8
1.4 分层无线传感器网络的应用	9
1.5 本书章节安排	11
第2章 分层路由协议	15
2.1 分层路由协议概述	15
2.1.1 分层路由协议的概念	15
2.1.2 组播技术	16
2.1.3 分层路由协议的分类	17
2.1.4 分层路由协议评估指标	18
2.2 静态分层路由	19
2.2.1 基于随机选举的分簇协议	19
2.2.2 基于树的分簇协议	20
2.2.3 基于能量的分簇协议	24
2.2.4 基于地理位置信息的分簇协议	26
2.3 动态的分层路由	28
2.3.1 基于网格划分的动态分簇路由协议	29
2.3.2 基于三角划分的分簇路由协议	31
2.3.3 基于动态移动组播的动态分簇路由协议	34
2.4 分簇协议比较	41
2.5 本章小结	41
第3章 组密钥管理协议	43
3.1 组密钥管理概述	43

3.1.1	组密钥管理机制	43
3.1.2	组密钥管理协议面临的安全威胁	44
3.1.3	组密钥管理协议的分类	44
3.1.4	组密钥安全性的基本要求	46
3.1.5	传感器网络加密机制	48
3.2	集中式的组密钥管理协议	49
3.2.1	GKMP 协议	50
3.2.2	HMKM 协议	51
3.2.3	BHEK 协议	56
3.3	分布式的组密钥管理协议	58
3.3.1	DFKM 协议	59
3.3.2	B-PCGR 协议	60
3.3.3	LKH 协议	62
3.4	分层式组密钥管理协议	63
3.4.1	Iolus 协议	63
3.4.2	随机密钥预分配方案	65
3.4.3	基于多项式求解的群组密钥管理协议	66
3.4.4	基于剩余定理与密钥树的群组密钥管理协议	68
3.5	本章小结	73
第 4 章	数据融合	75
4.1	数据融合概述	75
4.1.1	数据融合的作用	76
4.1.2	数据融合的层次	77
4.2	数据融合算法	78
4.2.1	数据融合算法分类	78
4.2.2	基于处理结构的分类	78
4.2.3	基于路由的数据融合算法	81
4.2.4	基于生成树的数据融合算法	82
4.2.5	基于时域预测的数据融合算法	85
4.2.6	基于隐私保护的安全数据融合算法	88
4.3	多传感器数据融合	95
4.3.1	多传感器数据融合原理	96
4.3.2	多传感器数据融合关键问题	96
4.3.3	多传感器数据融合方法	97
4.4	本章小结	103
第 5 章	定位技术	106
5.1	定位技术概述	106

5.1.1	定位技术的应用	106
5.1.2	定位技术相关术语	107
5.1.3	基本定位方法	108
5.1.4	定位算法性能评价指标	111
5.1.5	定位技术方法分类	112
5.2	基本定位方法	113
5.2.1	基于测距的定位算法	113
5.2.2	基于非测距的定位算法	116
5.3	基于移动锚节点的定位	119
5.3.1	典型的路径规划算法	120
5.3.2	基于凹凸网络的路径规划算法	121
5.4	基于复杂场景下的定位算法	122
5.4.1	基于网络分割的定位	123
5.4.2	立体空间网络	125
5.4.3	三维表面网络	131
5.4.4	NLOS 环境下的定位	134
5.5	安全定位算法	136
5.5.1	定位系统安全性分析	136
5.5.2	安全定位模型	137
5.6	本章小结	139
第 6 章	多目标跟踪	142
6.1	多目标跟踪概述	142
6.1.1	多目标跟踪问题	142
6.1.2	跟踪算法分类	143
6.1.3	目标跟踪的性能指标	144
6.2	基于树状的目标跟踪算法	145
6.3	基于簇状的目标跟踪算法	147
6.4	基于区域事件的目标跟踪算法	154
6.5	基于卡尔曼滤波的目标跟踪算法	160
6.6	基于多边形边权重值的多目标跟踪算法	163
6.7	本章小结	166
第 7 章	位置隐私保护	169
7.1	位置隐私保护概述	169
7.1.1	位置隐私面临的安全威胁	169
7.1.2	位置隐私保护的分类	171
7.1.3	位置隐私性能评价	173
7.2	节点身份匿名	174

7.2.1	简单匿名机制	174
7.2.2	加密匿名机制	174
7.2.3	基于单向加密哈希链的机制	175
7.3	源节点位置隐私	177
7.3.1	基于局部攻击者模型的方法	177
7.3.2	基于全局攻击者模型的方法	188
7.3.3	内部攻击者方法	193
7.4	汇聚节点位置隐私保护	196
7.4.1	局部攻击者模型	196
7.4.2	全局攻击者模型	200
7.5	基于时空匿名的位置隐私保护协议	201
7.5.1	KNN 协议	201
7.5.2	L2P2 协议	204
7.5.3	基于 Casper 框架方法	206
7.6	本章小结	209

第1章 分层无线传感器网络

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是传感器技术和无线通信技术的融合产物,近年来得到了研究人员越来越多的关注,成为信息技术研究的热点^[1-3]。无线传感器网络具有低能耗、低成本、自组织、部署方便、组网灵活,自动化数据采集,能在恶劣和特殊环境下工作等优点,在军事和民用领域里得到了广泛的应用。

随着无线传感器网络应用的发展,节点数量和网络规模不断扩展,传统的平面型网络结构已经不能适应网络情况,需要通过分层结构更好地利用能效,延长网络生命周期,从而实现更有效的网络管理。本书主要研究基于层次型的无线传感器网络,从网络架构到应用创新,对其中的6个方面的相关关键技术进行了深入的探讨,希望能够较为深入、全面的对该类型无线传感器网络加以介绍。

本章主要对无线传感器网络和基于分层的无线传感器网络基本内容进行介绍,然后对基于分层的无线传感器网络的研究及应用状况进行简要说明。

1.1 无线传感器网络

无线传感器网络是一种自组织的分布式无线网络,主要由大量的无线传感器节点和基站组成,并通过无线自组织通信方式形成一个智能网络系统,能够实时地对网络所处的环境进行监控、进行数据的融合及处理、进行事件的跟踪与定位等。本节首先对无线传感器网络的组成、特点以及体系结构进行介绍。

1.1.1 无线传感器网络的组成

微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)、无线通信技术和数字电子技术的快速发展使得廉价、低功耗且多功能的小型传感器节点间的短距离通信成为可能。大量具有感应、数据处理和通信部件的传感器节点通过协同工作构成了无线传感器网络^[4]。无线传感器网络作为特定对象的观察者,可监控、收集和处理所在区域监控对象的特征、活动和数据,并将这些信息发送给相关研究人员进行数据的深入处理或研究。

一个典型的无线传感器网络的结构包括分布式无线传感器节点(群)、汇聚节点或基站、后台数据处理中心等,无线传感器网络结构如图1-1所示。

其中监测区域为分布式无线传感器节点群所覆盖的区域,这些节点群随机部署在监测区域内部或附近,能够通过自组织方式构成网络。这些节点通常是一个微型的嵌入式系统,通过携带有限能量的电池供电,它们的处理能力、存储能力和通信能力相对较弱。从功能上看,这些节点不仅要对本地区域收集的信息进行处理,而且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的任务。

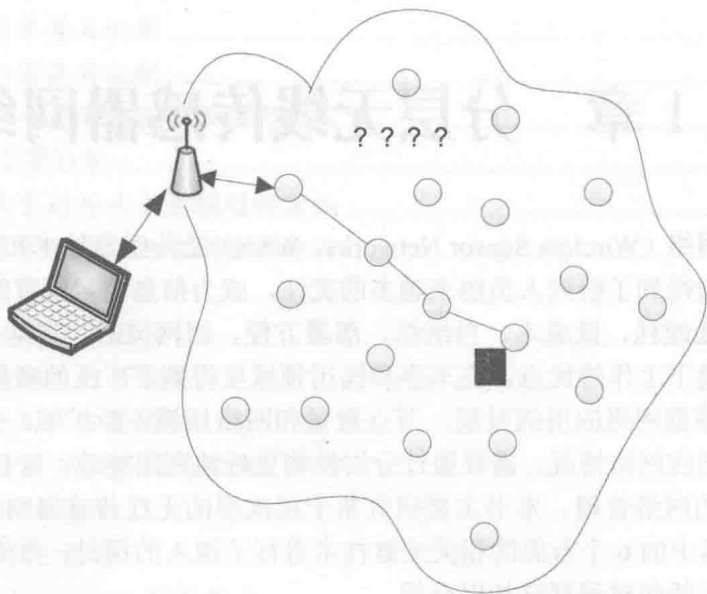


图 1-1 无线传感器网络结构

汇聚节点或基站的各方面能力相对于上述节点群而言比较强,它连接传感器网络和 Internet 等外部网络,实现两种协议栈之间的通信协议转换,同时发布监测任务,并把收集的数据转发到外部网络上。

1.1.2 无线传感器网络的特点

无线传感器网络是由大量的传感器组网而成的,作为一种特殊的自组织网络,与传统的无线网络有着许多不同,网络具有以下特点:

1. 节点的能量有限

传感器节点经常布放在无人照看的环境下。由于传感器节点本身很小,通常采用电池作为能量来源,因此每个节点的能量有限,一旦传感器节点的电池耗尽,该节点也就无法再进行工作。一些传感器节点甚至放在人员不容易到达的区域,给它们换电池一般不具有可操作性。因此在设计无线传感器网络时,必须要充分地考虑到传感器节点的能量要求特性,以延长整个网络的生命周期。

2. 节点的计算能力和存储能力有限

由于传感器节点本身比较小,因此,每个传感器节点的计算和存储能力是比较有限的。在设计无线传感器网络时,要充分考虑到节点的这一特性,充分发挥传感器节点有限的计算和存储能力,而不要将计算和节点本地存储要求很高的算法用于无线传感器网络。

3. 节点的通信能力有限

传感器节点的通信能力因传感器节点自身规模所限制,一般无线发射功率和通信距离都是有限的。

4. 以数据上传为主

传感器节点的主要任务是采集信息,并将信息上传。因此传感器节点的通信特征一般以数据上传为主。

5. 低移动性

在大部分的应用中, 传感器节点都是静止布放在监测区域, 其移动特征较小。

6. 节点的数量多、密度高

在监控区域, 一般需采用比较多的传感器节点以实现监控。单位区域内的节点密度相对比较高。通过分布式布放的传感器节点往往能提高整个网络信息采集的进度, 冗余节点的存在提升了整个网络的容错性能, 并能够降低监测盲区。

7. 网络的自组织特性、拓扑动态变化特性

在许多应用中, 传感器节点通常并不是预先固定的, 而是随意布放在监控区域。在使用过程中, 部分传感器节点可能由于能量耗尽等因素提前失效, 或是因环境影响造成无线通信的断续, 造成了网络拓扑结构的变化。因此, 无线传感器网络采用自组织结构, 以适应这些情况。

1.1.3 无线传感器网络的体系结构

无线传感器网络的体系结构由分层的网络通信协议、网络管理平台以及应用支撑平台组成, 如图 1-2 所示^[5]。



图 1-2 无线传感器网络的体系结构

物理层: 负责信号的调制和数据的收发, 所采用的传输介质主要有无线电、红外线、光波等。WSN 推荐使用免许可证频段 (Industrial Scientific Medical, ISM)。物理层的设计既有不利因素, 例如, 传播损耗因子较大; 也有有利的方面, 例如, 高密度部署的无线传感器网络具有分集特性, 可以克服阴影效应和路径损耗。

数据链路层: 负责数据成帧、帧监测、媒体接入和差错控制。其中, 媒体接入协议保证可靠的点对点 and 点对多点通信; 差错控制则保证源节点发出的信息可以完整无误地到达目标节点。

网络层：负责路由的发现和维持，由于大多数节点无法直接与网关通信，因此需要通过中间节点以多跳路由的方式将数据传送至汇聚节点。而这就需要在 WSN 节点与接收器节点之间多跳的无线路由协议。

传输层：负责数据流的传输控制，主要通过汇聚节点采集传感器网络内的数据，并使用卫星、移动通信网络、Internet 或者其他的路由与外部网络通信，是保证通信服务质量的重要部分。

支撑层：包括时钟同步和节点定位，其中时钟同步服务为协同工作的传感器节点提供本地时钟同步。由于功耗和成本的限制，节点通常无法使用 GPS 实现定位。WSN 的节点定位算法通过少数已知节点的位置，估计其他节点的位置，在系统中建立一定的空间关系，为目标定位提供保障。

应用层：由各种面向应用的软件系统构成。主要研究的是各种传感器网络应用的具体系统的开发，例如，作战环境侦查与监控系统，情报获取系统，灾难预防系统等等。

此外，在数据链路层、网络层和传输层设计中还应考虑数据安全性和 QoS，而拓扑管理和能量管理则贯穿在物理层外的其他各层设计中。

1.2 基于分层的无线传感器网络

随着无线传感器网络的节点数量和覆盖区域的发展，通过分层结构能够更有效地组织网络的统一性和协同性，更好地利用能效，从而延长网络的生命周期。基于分层的层次型无线传感器网络具有更高的网络复杂性，对网络的协同性以及能效应用有着更高的要求。它是无线传感器网络中比较常用和特殊的一种类型。它区别于其他网络主要是拓扑结构和路由协议的类型。下面从分层无线传感器网络的结构、优点以及关键技术方面进行阐述。

1.2.1 分层无线传感器网络的结构

在传感器网络中，大量传感器节点随机部署在监测区域内，节点以自组织形式构成网络。从网络的拓扑结构来看，主要分为层次型和平面型结构。

层次型结构将网络中所有的节点分为不同的级别，每个级别的节点都有特定的作用。高层级的节点通常作为主干节点负责管理其下层的若干分支链路上的节点，一个分支上的节点常组成一个簇，而高层级节点作为簇头，负责与基站（SINK）的直接通信以及与它所在簇内的下一层级节点，即簇成员节点的通信，并负担路由等功能，如图 1-3 所示。

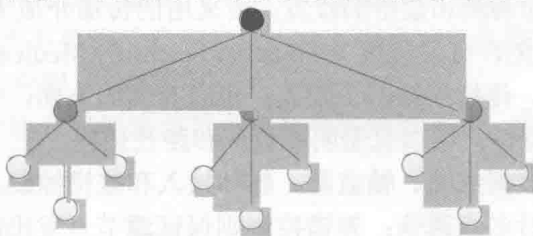


图 1-3 层次型拓扑结构

平面型结构,是无线传感器网络中最简单的一种拓扑结构,所有节点均对等,无等级和层次差异,具有完全一致的功能特性。每个节点均包含相同的MAC、路由、管理和安全等协议。这种网络结构由于没有中心管理节点,组网算法比较复杂。

分簇结构是层次型拓扑结构的经典结构,所谓簇(Cluster)就是具有某种关联的网络节点集合。每个簇由簇头(Cluster Head)和若干个成员节点(Member Node)组成,由簇头和基站通信。分簇型无线传感器网络的成簇就是在节点被随机部署后,根据监测任务需求,并结合能量有效的原则,节点间自组织形成簇。每个簇由多个成员节点和一个簇头组成,成员节点负责对监测区域内的环境或对象进行感知并传输给簇头。簇头节点承担簇内感知数据的聚集、簇间路由、接收和转发基站节点的命令等任务;基站节点负责对簇头的管理和控制,并把簇头传送来的数据通过Internet连接传送到上位机,供远程用户使用数据;簇成员节点只需要负责监控任务,而簇头节点同时要负责数据包的接收和转发,以及上下游控制、状态报文的转发,并且在转发的同时对数据进行前端的分布式计算和数据融合。

在最简单的分簇网络拓扑结构中,簇成员节点与簇头节点建立连接,同时簇头节点与基站建立链接。这种二级树结构的分簇网络是层次型网络中最简单的一种网络拓扑结构,其拓扑控制算法的设计也相对比较简单。

在分簇拓扑结构中,所有节点不需与基站直接通信,而是将数据发送给附近的簇头节点,从而使通信距离缩短并且节省了传输开销。由于簇头节点担负的职责较多,能耗要比簇成员节点大。因此,分层路由协议必须能够解决拓扑更新问题,在网络运行到一定时间后进行簇头轮换,将一些符合某些条件的节点调整成为新的簇头节点,尽可能取得全网范围内的节点剩余能量均衡,以延长节点和网络的使用寿命。

1.2.2 分层无线传感器网络的关键技术

分层无线传感器网络在网络拓扑结构逻辑上将网络分成不同层次,在各个下层分支上一般采用基于分簇的结构进行网络管理。它区别于其他网络主要是拓扑结构和路由协议的类型,在后面的章节中将着重介绍以分层路由协议为基础的无线传感器网络各方面关键技术及应用。本书将涵盖分层路由协议、密钥管理、数据融合、节点定位、目标跟踪和位置隐私保护等多个方面的重点内容,较全面地概括了本领域目前所取得的研究进展和最新技术。

1. 路由协议

在分层无线传感器网络中,节点采用能量有限的电池供电,所以在路由协议设计中,首先,应考虑节能问题,协议需要考虑全局网络的能量平衡,以使网络达到最大的生命周期;其次,考虑到部分分层无线传感器网络应用于比较恶劣的环境,可能导致节点的损坏进而导致网络的中断,所以路由协议的设计应尽可能的健壮;最后,分层无线传感器网络的应用应考虑数据的实时性,对目标的监测如果延迟太久就会失去实际的意义,所以路由协议应尽量减少数据传输的时间延迟。

2. 组密钥管理协议

安全作为分层无线传感器网络最基本的一项保障服务,网络节点被部署在敌方环境

时,攻击者能够轻易地捕获节点并得到节点中所包含的信息,利用这些信息可以伪装成有效节点进行恶意破坏。所以保证通信安全一直都被视为无线传感器网络中的最基本要求,而高效的密钥管理协议则为分层无线传感器网络提供了最基本的保障,利用密钥建立起安全的通信链路的同时也为其他机制提供了技术支持。组密钥管理协议是针对分簇路由协议中数据,是根据分组传送的特点而设计的,在分簇中进行密钥的协商是组密钥管理协议的关键。

3. 数据融合

数据融合是一种利用信息处理技术对网络中多份采集信息在一套算法框架内进行多方面、多层次、多级别的自动检测、相关估计和组合,以完成对目标对象最终的评估与决策任务的信息处理过程。利用数据融合得到的信息比单个传感器收集的信息完整、可靠,冗余数据小,传输量小,从而达到节省能量、延长网络生命周期、提高数据收集效率和准确度的目的。

4. 定位技术

除了路由协议、密钥管理和数据融合以外,定位技术是无线传感器网络应用的另一项重要支撑技术。因为无线传感器网络是由监测区域内的大量无线传感器节点组成的,这些传感器节点具有通信、感知、数据处理和存储等功能,并通过无线通信方式形成一个自组织的网络系统,能够协作地实时监测、感知和采集网络分布区域内监测对象的信息,并对信息进行处理。在无线传感器网络应用中,传感器节点的位置对于节点感知到的数据是非常有意义的。没有位置信息的感知数据是没有实际意义的,例如,目标跟踪、物流管理、智能交通和环境监测等许多应用都要求节点提供自身的位置信息。

5. 目标跟踪

目标跟踪一直是探测技术的一个重要方面,被科研人员反复研究。所谓无线传感器网络多目标跟踪,是指在由无线传感器网络构建的监测环境内,通过传感器节点上携带的各种传感器单元,探测并发现进入监测环境内的未知目标,从而获取目标在监测区域内的位置、状态信息的过程。

6. 位置隐私保护

由于无线传感器网络部署区域的开放性和无线通信的广播性,隐私问题是一个亟待解决的安全问题。例如,在战场上士兵作为广播查询的发起者时,他的位置本身应得到保护。位置通常意味着事件的物理位置,士兵的位置隐私一旦暴露,那么他的安全就会受到威胁。目前,位置隐私问题得到了越来越多的重视,是近年来一个研究热点。

1.2.3 特点及性能指标

综上所述,层次型结构的无线传感器网络具有以下特点:

(1) 层次型网络结构是分布式的,大规模节点可根据组网协议自组织的形成簇,便于对成员节点进行管理。簇头和簇头之间又可形成高一级的簇,使网络具有自相似性,便于网络的扩展与升级;

(2) 层次结构有利于容错技术的设计与实现,由于层次结构的层次性和局部性,使得故障的检测和恢复便于集中和控制;

(3) 在全网中合理分配能量消耗, 实现负载均衡, 实现整个网络的有效管理;

(4) 层次结构减少了路由的复杂程度, 在网络容量较大的情况下能够减少网络中路由控制信息的开销和拓扑结构变化带来的路由调整影响, 提高了网络带宽利用率;

(5) 在层次结构中, 通过簇结构将大量通信节点之间的通信限制在各个簇内, 减少了大量的长距离通信;

(6) 簇头具有数据聚集功能, 可将成员节点的感知信息经聚集后发送至高层节点或基站, 减少网内数据包的传送量, 进而减少远距离无线传输的能耗;

(7) 成员节点根据休眠—唤醒机制(Duty Ratio), 在无需向簇头提交数据时成员节点处于低能耗的休眠状态, 降低了节点能耗。

分层无线传感器网络性能指标主要包括网络的能耗、时延、感知精度、可扩展性和容错性 5 个方面^[6]。

1. 网络能耗

分层无线传感器网络中能量的消耗主要发生在传输阶段, 一个典型的节点数据无线发射及接收过程如图 1-4 所示。

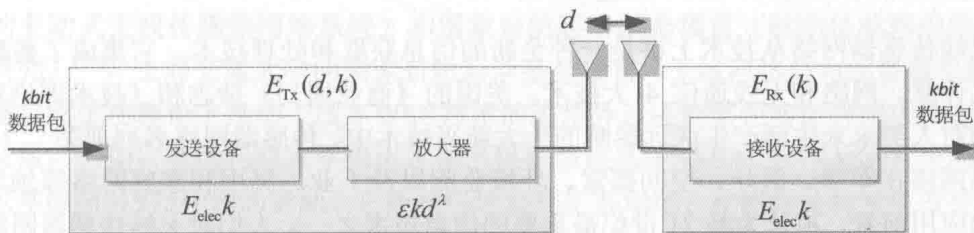


图 1-4 无线发射及接收过程示意图

这里假定节点 i 传输 k 比特的数据到节点 j , 设节点 i 传输消耗的能量为 $E_{Tx}(i, j, k)$, 节点 j 接收消耗的能量为 $E_{Rx}(j, k)$, 则计算公式如下:

$$E_{Tx}(i, j, k) = E_{elec} \times k + E_{amp}(i, j) \times k \quad (1-1)$$

$$E_{Rx}(j, k) = E_{elec} \times k \quad (1-2)$$

式中, $E_{amp}(i, j)$ 表示从 i 传输 1bit 数据到 j 所消耗的能量。一般的 $E_{amp}(i, j) = \varepsilon_{amp} \times dist(i, j)^4$ 。所以节点 i 传输 k bit 数据到节点 j 消耗的总能量为:

$$E(i, j, k) = E_{Tx}(i, j, k) + E_{Rx}(j, k) \quad (1-3)$$

另外, 通常节点都会在非通信时段设定一个睡眠模式来降低能量的消耗。

2. 网络时延

网络时延是指从源节点采集到数据开始, 直到将数据包传输到基站所消耗的时间。网络延迟与应用密切相关, 直接影响分层无线传感器网络的可用性和应用范围。通常分层无线传感器网络采用多跳方式进行通信, 跳数越多, 时延越大。将时延控制在合理的范围内是应用时需要考虑的一个主要因素^[7]。

3. 感知精度

指接收者接收到感知信息的精度。影响传感器精度的因素很多, 例如, 信息处理方法和网络通信协议等都会对感知精度有所影响。感知精度、时间延迟和能量消耗三者密

切相关。在分层无线传感器网络设计中,需要权衡三者的得失,使系统能在最小能量开销条件下最大限度地提高感知精度、降低时间延迟。

4. 可扩展性

分层无线传感器网络的可扩展性表现在传感器节点数量、节点覆盖区域、生命周期、时间延迟和感知精度等方面的可扩展程度。给定可扩展性级别,分层无线传感器网络必须提供支持该可扩展性级别的方法和策略。

5. 容错性

分层无线传感器网络中的节点经常会由于周围环境或电源耗~尽等原因而失效。因此,分层无线传感器网络的软、硬件必须具有较强的容错性,以保证系统具有高健壮性。当网络的软、硬件出现故障时,系统能够通过自动调整或重构纠正错误,保证网络正常工作。分层无线传感器网络容错性需要进一步地模型化和定量化,容错性和能源有效性之间存在着密切关系,在设计分层无线传感器网络时,通常需要权衡两者的利弊。

1.3 分层无线传感器网络研究及发展

无线传感器网络从技术上讲是一种全新的信息获取和处理技术,它集成了传感器、嵌入式计算、网络和无线通信 4 大技术。美国的《商业周刊》杂志和《技术评论》所评选出的对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术中,传感器网络名列前茅^[8-10]。无线传感器网络在军事、医疗、空间探索、环境监测以及工业、民用和家庭网络等领域具有广泛的应用前景,被认为是 21 世纪最重要的信息技术之一。人们对无线传感器网络各方面的研究也成为目前学术界的研究热点。一些关于无线传感器网络的具有代表性的研究项目有:

(1) WINS(Wireless Intergrated Network Sensors)

WINS 是由 DARPA 资助,加州大学洛杉矶分校与罗克维尔研究中心合作开展的研究项目^[11]。目标是结合 MEMS 技术、信号处理技术、嵌入式计算和无线通信技术,构造大规模、复杂的集成系统,实现物理世界与网络世界的连接。

(2) Smart Dust

该项目 1998 年由 DARPA/MTOMEMS 计划资助,美国加州大学伯克利分校研发^[12]。其目标是结合 MEMS 技术和集成电路技术,把一个完整的传感通信系统集成到一个体积不超过 1mm^3 ,使用太阳能电池,具有光通信能力的自治传感器节点上。由于体积小、重量轻,该节点可以附着在其他物体上,甚至在空气中浮动。

(3) SeaWeb

该项目由美国海军研究办公室支持,目标是研究基于水声通信的传感器网络组网技术。由于水声通信的带宽窄、速率低、时延抖动大等特点给通信协议的设计带来了很大困难,现有的仿真软件很难对水声信道时变、空变的特点进行建模。因此,在 1999~2004 年间进行了多次实验,取得了大量的现场数据,验证了水声传感器网络系统的可行性。

(4) SensorIT (Sensor Information Technology)

该项目是 DARPA 在 1998 年展开的研究计划。该计划共包括 29 个研究项目,分别在