



国家自然科学基金资助项目

智能家居无线传感器 网络路由

*Research of Routing for Wireless Sensor
Networks in Smart Home*

◆ 李晓卉 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



智能家居无线传感器网络路由

李晓卉 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统介绍了智能家居无线传感器网络路由的理论、方法和实际应用。全书分五个部分共十章，主要包括智能家居无线传感器网络协议——ZigBee 协议的路由研究；智能家居无线传感器网络的 AODVjr 路由的改进研究；智能家居无线传感器网络局部单播路由研究；基于复杂网络理论的智能家居无线传感器网络路由研究；智能家居无线传感器网络的分簇算法和智能家居能耗控制算法研究。本书所提出的理论，方法和技术实现要点是作者多年从事智能家居无线传感器网络路由的研究成果与实际经验的总结。

本书可供从事无线传感器网络和智能家居网络的各类工程技术人员参考，亦可作为高等院校相关专业教师和研究生的教学参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

智能家居无线传感器网络路由 / 李晓卉著. —北京：电子工业出版社，2014.3
ISBN 978-7-121-22524-6

I. ①智… II. ①李… III. ①无线电通信—传感器—计算机网络—路由选择
IV. ①TN915.05

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 033577 号

责任编辑：韩同平 特约编辑：李佩乾

印 刷：三河市鑫金马印装有限公司

装 订：三河市鑫金马印装有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：9 字数：230 千字

印 次：2014 年 3 月第 1 次印刷

印 数：1 500 册 定价：45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

前 言

物联网产业是我国战略性新兴产业的重要组成部分,已深入经济社会各个行业领域。发展物联网是促进传统产业转型升级的重要手段,在智能家居系统中应用物联网,将有力推进产业化和信息化的深度融合,从而促进我国经济和信息技术的前进发展。无线传感器网络无须布线,易于配置和扩展,低成本和低功耗的特点,使其逐渐成为未来智能家居物联网的发展主流和研究热点。能量高效和可靠传输的路由算法在智能家居无线传感器网络(Wireless Sensor Networks for Smart Home,简称 WSNH)通信中起着至关重要的作用,研究智能家居无线传感器网络路由技术,无论是从无线传感器网络理论研究的角度,还是从智能家居物联网的实践角度,都有重要理论意义和广泛应用前景。

本书作者在博士生和博士后阶段对智能家居无线传感器网络路由算法进行了多年的研究积累。为促进学术和技术交流,作者撰写本书以求共同进步,为智能家居物联网技术做一点贡献,为智能家居无线传感器网络路由设计提供一种新的思路和途径。到目前为止,书中所涉及的相关路由算法已在国际期刊、会议上公开发表。书中重点研究了智能家居无线传感器网络的路由算法,采取网络仿真的方法研究所有关键算法的有效性和算法运行性能,取得了一些具有一定创新性的研究成果。本书共5部分,按提出问题、分析问题、解决问题的思路,循序渐进地阐述了作者的研究结果。

1. 对工程实践中广泛使用的智能家居无线传感器网络协议 ZigBee 进行了详细的仿真研究,并提出了在工程实际应用中 ZigBee 的层次路由和 AODVjr 路由进行改进的方案。

2. 在第1部分的研究结果中,作者发现 ZigBee 的 AODVjr 路由算法主要采取洪泛的方式查找路由,洪泛查找路由带来的直接问题是网络节点能量消耗过大,易产生 MAC 层广播风暴,从而引起实际应用中网络数据包投递率过低。因此,作者从如何限定和调整洪泛路由区域的角度研究了 AODVjr 的一些改进方法,以达到提高智能家居无线传感器网络路由的数据包投递率的目的。

3. 在第2部分的研究结果中,作者发现使用洪泛或区域性洪泛技术查找路由时节点能耗和通信开销仍然较高,还是会引起 MAC 层负担过重的问题。因此,作者研究了如何在智能家居无线传感器网络路由中引入启发式的局部单播路由决策的方法。

4. 在第3部分的研究结果中,作者发现虽然在智能家居无线传感器网络路由中引入启发式的局部单播路由决策方法达到了网络节点能耗有效降低,数据包投递率显著提高的目的,但是出现了网络能耗不均衡的现象。因此,作者研究了如何将复杂网络理论引入到启发式的局部单播路由决策中,将网络流量以更为均衡的方式分配到网络中的多条路径上,延长了智能家居无线传感器网络生命期。

5. 在研究智能家居无线传感器网络路由通信的基础上,对智能家居无线传感器网络应用展开了探索性研究。主要研究了有关智能家居无线传感器网络的分簇算法和智能家居能耗控制算法。

本书的出版得到了国家自然科学基金(项目号:61105070,61104215)、湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(项目号:T201302)、国家国际科技合作专项项目(项目

号：2013DFG72850)、国家重点基础研究发展计划项目(973 项目，项目号：2012CB724400)的资助和电子工业出版社的大力支持，在此致以由衷的谢意。

本书撰写过程中得到了我的博士生导师、武汉科技大学方康玲教授和我的博士后合作导师、华中科技大学关治洪教授的指导和支持。两位教授渊博的学识，谦和的为人，宽广的胸怀，严谨的治学态度，开拓进取的创新意识都深深地影响着我，是我今后工作中学习的楷模，在此我谨向两位教授表示深深的敬意和衷心的感谢。

本书撰写期间，作者曾多次前往韩国 Hanyang 大学无线传感器网络研究中心学习和交流，受到了该中心负责人 Hong Seung Ho 教授的悉心指导，他为作者提供了良好的科研环境以及大量参与工程实践锻炼的机会。Hong 教授渊博的学识，严谨的治学态度和忘我的工作精神深深地激励着作者。在该中心的学习使作者受益匪浅，在此对 Hong Seung Ho 教授表达最诚挚的谢意。

本书的出版还得到了以下领导、专家的关心，指导和支持，在与这些专家教授的长期学术交流、合作过程中收益很大，在此深表感谢，他（她）们是：武汉科技大学柴利教授、吴怀宇教授、陈和平教授、王斌教授、刘振兴教授、吴谨教授、顾进广教授、刘斌教授、张涛教授和杨永立教授，澳大利亚 Queensland University of Technology 的田玉楚教授，国家电网信息通信有限公司博士后张翼英，北京邮电大学崔宝江教授，德国法兰克福大学的博士后潘林，中国电力科学研究院计量研究所所长章欣、副所长徐英辉和高级工程师赵兵，韩国 LSI 公司 Kwon Bong Hyun 常务，韩国 Nestfield 公司 Kim Dae Joo 常务，武汉研能科技有限公司严宇峰经理，武汉麦希力德科技有限公司鲁彦玉经理。

作者的工作还得到以下领导、教授和同事的热情帮助与支持，在此表示感谢，他（她）们是：武汉科技大学马娅婕博士、黄卫华博士、章政博士、蒋铮博士、刘晓玉博士、黄浩军博士、赵敏老师、陈彬老师、刘毅敏老师、周红军老师、方红萍老师、杨玲贤老师、徐望明老师、梁开老师等，华中科技大学姜晓伟博士、曲峰林博士、池明博士、陈超洋博士和王宝贤博士，韩国 Hanyang 大学的丁月民博士、段权珍博士和余萌萌博士。

感谢在该领域早期探索并有诸多贡献的先行者们，没有他们的贡献这本书将难以为继并顺利完成。由于篇幅限制，还有不少同志为本书中的研究成果及本书的出版做了不少工作，在此不能一一列出，谨向所有同志致以衷心的感谢！

特别感谢我的父母，他们在我多年的求学生涯中给我充分的理解、鼓励和支持，他们的默默奉献使我有更多的时间和精力投入科研之中，感谢他们为我所做的一切；感谢我的丈夫冯文利，他的理解每每使我倍感温暖，还有我的女儿冯悦辰的开朗的笑声使我忘记疲劳。谨以此书献给他们！

由于作者水平有限，书中错误和缺点在所难免，欢迎读者批评指正。

作者

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，本社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E - mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 国内外研究现状	(2)
1.2.1 无线传感器网络路由设计的研究现状	(2)
1.2.2 智能家居无线传感器网络路由的研究现状	(5)
1.3 全书结构安排	(5)
第 2 章 智能家居无线传感器网络	(7)
2.1 无线传感器网络概述	(7)
2.1.1 无线传感器网络及其应用	(7)
2.1.2 无线传感器网络的特点	(9)
2.1.3 传感器网络的体系结构	(9)
2.2 智能家居的应用领域	(10)
2.3 智能家居无线传感器网络结构	(11)
2.4 智能家居常用的无线网络协议	(12)
2.4.1 IEEE 802.15.4/ZigBee	(12)
2.4.2 其他标准	(12)
2.5 WSN 的链路稳定性分析	(13)
2.5.1 室内无线传播模型	(13)
2.5.2 链路稳定性分析	(14)
2.6 WSN 中的定位服务	(15)
2.6.1 WSN 中的定位算法	(16)
2.6.2 WSN 中的定位服务	(16)
2.7 智能家居无线传感器网络路由的需求	(17)
2.8 本章小结	(17)
第 3 章 Zigbee 路由协议的分析和路由策略的改进	(18)
3.1 IEEE 802.15.4 协议	(18)
3.1.1 概述	(18)
3.1.2 基于 IEEE 802.15.4 的传感器网络性能特点	(19)
3.2 Zigbee 路由算法	(20)
3.2.1 层次路由	(20)
3.2.2 AODVjr	(21)
3.2.3 路由实现	(22)

3.3	Zigbee 路由仿真分析	(23)
3.3.1	仿真性能衡量指标	(24)
3.3.2	仿真参数及场景设计	(24)
3.3.3	仿真结果和性能分析	(26)
3.4	Zigbee 路由策略改进	(30)
3.4.1	层次路由算法的改进	(30)
3.4.2	ZigBee 路由策略改进	(31)
3.4.3	实验结果和分析	(32)
3.5	本章小结	(34)
第 4 章	基于位置信息的动态自适应路由算法	(35)
4.1	基于位置信息的路由研究综述	(35)
4.1.1	利用位置信息限定路由查找区域	(36)
4.1.2	利用位置信息确定路由下一跳	(38)
4.1.3	利用位置信息实现分层路由	(39)
4.2	研究背景	(40)
4.3	WSNSH-LBAR 中路由请求域的定义	(41)
4.3.1	路由发现	(41)
4.3.2	请求域的定义	(42)
4.3.3	仿真及性能分析	(45)
4.4	WSNSH-LBAR 中路由请求域的动态调整	(48)
4.4.1	Rzone 的大小对数据包投递率的影响	(49)
4.4.2	基于贝叶斯估计的 Rzone 的动态调整	(50)
4.4.3	仿真及性能分析	(53)
4.5	WSNSH-LBAR 仿真及性能分析	(55)
4.6	本章小结	(57)
第 5 章	基于动态混合查找的自适应路由算法	(58)
5.1	网络模型	(58)
5.2	自适应路由算法	(59)
5.2.1	折半查找和指数查找	(59)
5.2.2	请求域的半径搜索策略	(59)
5.3	仿真及性能分析	(61)
5.4	本章小结	(63)
第 6 章	基于位置信息的启发式路由算法	(64)
6.1	研究背景	(64)
6.2	启发式算法概述	(65)
6.2.1	智能仿生类算法	(66)
6.2.2	启发式搜索算法	(67)
6.3	基于位置信息的启发式路由算法	(68)

6.3.1	A*算法在路由中的应用	(68)
6.3.2	基于位置信息的启发式路由算法	(69)
6.3.3	链路状态分类	(71)
6.4	仿真及性能分析	(71)
6.5	本章小结	(75)
第7章	基于局部网络介数的能量均衡路由研究	(76)
7.1	研究背景	(77)
7.1.1	复杂网络理论	(77)
7.1.2	无线传感器网络和复杂网络	(80)
7.2	局部贪婪转发	(82)
7.3	局部网络介数	(82)
7.3.1	网络介数	(82)
7.3.2	网络介数概念的扩展	(83)
7.4	基于局部网络介数的路由算法	(84)
7.4.1	算法描述	(84)
7.4.2	一个简单的路由例子	(85)
7.5	仿真及性能分析	(86)
7.5.1	网络模型	(86)
7.5.2	网络场景	(86)
7.5.3	仿真结果及性能分析	(87)
7.6	本章小结	(90)
第8章	具有基站的智能家居无线传感器网络分簇算法	(91)
8.1	分簇算法研究综述	(91)
8.1.1	链路分簇算法	(92)
8.1.2	加权分簇算法	(92)
8.1.3	层次分簇算法	(93)
8.1.4	网格分簇算法	(95)
8.2	研究背景	(96)
8.3	具有基站的智能家居无线传感器网络分簇算法	(97)
8.3.1	K-means	(97)
8.3.2	簇数目的范围	(98)
8.3.3	簇头选择算法	(98)
8.3.4	簇生成算法	(100)
8.3.5	仿真效果	(101)
8.4	本章小结	(103)
第9章	基于用户期望价格的需求响应模型研究	(104)
9.1	系统模型和问题定义	(104)
9.1.1	需求响应算法的输入	(105)

9.1.2	需求响应算法的输出	(106)
9.2	基于用户期望价格的需求响应算法设计	(106)
9.2.1	负荷转移	(107)
9.2.2	能量存储系统与需求响应算法的集成	(110)
9.2.3	需求响应算法	(110)
9.3	仿真及性能分析	(113)
9.3.1	仿真 1	(113)
9.3.2	仿真 2	(116)
9.4	本章小结	(119)
第 10 章	结论和展望	(120)
10.1	工作总结	(120)
10.2	进一步工作展望	(121)
参考文献		(122)

第1章 绪 论

1.1 引 言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, 简称 WSNs)是微电子技术、Ad Hoc 无线网络、分布式计算等信息技术发展和融合的产物^[1]。它是一种由大量集成有传感器、处理器和无线通信模块的传感器节点构成的、以向用户及时提供感知信息为主要目的、以自组织协作作为主要工作方式的无线网络。WSNs 利用低成本、低能耗、可计算的无线传感器网络节点收集和处理用户感兴趣的监测对象的数据,并在此基础上形成满足用户需求的高层应用^[2,3]。正是由于无线传感器节点具有数据检测、数据采集和对象控制的功能,无线传感器网络具备感知精度高、布设灵活、整体可靠性好、造价低廉、覆盖均匀的特点,使得无线传感器网络在很多领域得到了广泛应用^[4]。

智能家居是利用系统集成的方法,将智能计算机技术、通信技术、信息处理技术与信息家电技术有机结合,通过对家居设备的自动监控、对信息资源的高效管理、为使用者提供充足的信息服务,使技术与家居完美的结合,使业主能对家居合理投资的同时享有安全、高效、舒适、节能、便利和灵活的优质生活环境。智能家居是社会信息化与经济全球化的必然产物,是多学科、高新技术的巧妙集成,它将成为未来家居业发展的主流,其本质是通过综合配置家居内的各个功能子系统,以网络系统为桥梁,实现对整个家居的高效管理、控制和共享。无线传感器网络技术在智能家居网络中具有很大的应用前景^[7],其技术优势具体体现在以下几个方面:

(1) WSNs 的引入使得智能家居的安装成本和安装周期大大缩小。相比于有线网络,WSNs 不仅可以节省传输线的成本而且使得网络的安装和拓展变得很容易,新设备的加入和老化设备的更换不再需要调整整个网络。

(2) WSNs 的引入使得智能家居也可以应用在一些特殊的环境中。比如在历史悠久的古建筑中,传统智能家居的布线势必会破坏古建筑。WSNs 通过无线传输信息,在省去了布线的麻烦的同时也很好地保护了古建筑。

(3) WSNs 中每个节点都具有一定的通信能力,移动设备(如 PDA)可以很容易地接入到网络中实现数据收集和控制功能。

(4) 利用无线传感器网络技术,智能家居能实现能源使用的总体规划,达到节约能源,降低用户成本的目的。随着智能电网概念的提出,智能家居的能源规划必将成为智能电网发展的关键技术,而无线传感器网络的发展为智能家居中的能源总体规划、实时信息显示、自我监测和矫正提供了技术保障。

尽管 WSNs 是一个很有应用前景的网络技术,但是在智能家居(Smart Home)网络中结合 WSNs 技术还有很多技术上的挑战。本书将智能家居与无线传感器网络的结合简称为 WSNsH(Wireless Sensor Networks in Smart Home)。WSNsH 中多个通信能力有限的节点共同组成一个多跳无线网络,每个节点既担负数据采集和控制的功能,又担负数据中继转发功能。

因此,路由是 WSN 中非常重要的一项功能,设计适应 WSN 特点的路由算法已成为 WSN 中一项非常重要的工作。WSN 中路由算法设计的特殊性主要体现在以下几点。

(1) 智能家居无线传感器网络应用环境的复杂性

智能家居的环境中存在较多障碍物,节点无线信号传输距离有限,不少节点之间不能直接进行通信。网络中外部源的干扰较多,易产生多径效应。网络的通信链路具有随机损耗以及分组丢失率动态变化的特点^[10]。链路传输的动态不可靠性不仅导致节点能量的浪费,而且不能提供有保证的数据传输服务。这就需要很好的路由算法既能保证数据的可靠传输又能满足 WSN 的一些特殊特性。

(2) 路由设计目标的特殊性

近些年来,国内外许多学者提出了众多基于无线传感器网络的路由协议,如将经典的自组织(Ad Hoc)网络中的路由协议设计思想应用于 WSN 中(如 AODVjr),但是 WSN 路由与传统的 Ad Hoc 网络路由有着不同的设计目标,后者在高度移动的环境中通过优化路由和资源管理策略最大化带宽的利用率,同时为用户提供一定的服务质量保证^[1,19]。在 WSN 中,除了少数节点需要移动以外,大部分节点都是静止的。部分节点能源无法替代,设计能量高效的策略延长网络的生命周期是 WSN 设计的核心问题。包括 Ad Hoc 网络在内的传统的无线网络路由技术无法直接应用到 WSN 中^[19]。

(3) WSN 网络结构的特殊性

虽然针对 WSN 中数据传送的特点,已经提出许多新的较为有效的路由协议,如平面式路由、层次式路由、基于位置信息的路由。但这些路由算法大多针对大规模的 WSN 进行设计,为保证可靠传输,节点的布置是冗余的,主要使用洪泛技术实现全网通信,使用分簇技术实现能量高效的传输数据,算法较为复杂^[1,9,19]。WSN 网络规模较小,考虑智能家居需要降低安装成本的要求,节点应按需布置,且要求算法简单。

(4) 工程实践中面临的问题

IEEE 802.15.4/ZigBee 是目前工程实践中主流的无线传感器网络协议^[10,36,37]。IEEE 802.15.4 定义了无线传感器网络的物理(Physical,简称 PHY)层和媒体访问控制(Media Access Control,简称 MAC)层标准。ZigBee 是针对连网、安全和应用层的标准。ZigBee 支持 AODVjr(Ad-hoc On-Demand distance Vector junior routing)路由算法,它是一种精简了的 Ad Hoc 网络的按需距离(Ad-hoc On-Demand distance Vector,简称 AODV)路由协议。AODVjr 使用洪泛技术发现路由,而 IEEE 802.15.4 标准是针对低速率业务量少的应用领域而制定的,具有业务载荷小,适合静态网络拓扑应用的特点,因此在工程实践中,AODVjr 洪泛发现路由的过程极易引起 MAC 层的广播风暴,直接导致数据包投递率下降。因此改进 WSN 工程实践中的 AODVjr 路由算法性能也是一项亟待解决的工作。

由于在 WSN 的路由算法设计中还存在以上问题,因此需要针对智能家居这个应用背景设计相应的路由算法以克服上述问题。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 无线传感器网络路由设计的研究现状

传统无线通信网络研究的重点放在无线通信的服务质量(Quality of Service,简称 QoS)

上,而无线传感器节点为随机分布、电池供电,因此目前无线传感器网络路由协议的研究重点放在如何提高能量效率上。现有无线网络的路由协议,如 WLAN 和 Bluetooth 都不具有自组织能力,Ad hoc 虽具有自组织能力,但其路由协议在支持的节点数目和能量利用率等方面远达不到 WSN 的要求,因此需要研究新的适合不同应用的 WSN 的路由方式^[19]。

在过去的几年里,针对 WSN 特性已设计出较多路由算法,研究取得初步的进展。由于无线传感器网络路由与应用高度相关,单一的路由算法很难满足各种应用需求,因而人们研究了众多的路由算法。这些路由算法可以从不同的角度进行分类。从是否需要节点事先知道自己的地理位置出发,可分为地理定位辅助路由和无地理定位辅助路由;从路由查询发起策略出发,可分为先应式路由与反应式路由;从网络拓扑结构图出发,可分为平面路由、分层路由和地理位置信息路由;从路由协议使用的对象不同,可以分成查询路由(从汇聚节点到传感器节点)和汇聚路由(从传感器到汇聚节点);从路由协议的操作特点出发,还可以分成 QoS 路由、安全路由和多径路由等^[20,21]。本文将主要根据网络拓扑结构,将路由算法分成平面路由、分层路由和地理位置路由进行阐述。

(1) 平面路由

在平面结构中,所有节点的地位是平等的,不存在任何等级和层次差异,传感器节点之间通过相互协作来完成传感任务,具有较好的健壮性。其缺点是可扩充性差,维护动态变化的路由需要大量的控制信息。典型的平面路由算法有定向扩散(Directed Diffusion,简称 DD)路由^[22],谣言路由(Rumor Routing)^[23],基于信息协商的路由(Sensor Protocol for Information via Negotiation,简称 SPIN)^[24],能量意识路由(Energy Aware Routing,简称 EAR)^[25]和基于梯度的路由(Gradient Based Routing)^[26]等。

平面路由的代表算法就是 DD,它是一种典型的以数据为中心的信息传播协议,后续很多平面路由算法都是在它的基础上进行的改进。DD 基本思想是传感器节点产生的数据用属性值来表示,当汇聚节点(sink)需要采集数据时,发送兴趣(interests)消息,泛洪到全网。拥有数据标志属性和 interests 相匹配的传感器节点将数据按 interests 的反向路径发往 sink。这样 sink 不需要的数据将不再发送,大大减少了冗余信息的传送,节约了网络的能量,延长了网络的时间。DD 路由算法可以分为周期性的兴趣扩散、梯度建立和路径加强三个阶段^[22]。谣言路由可以看成一种特殊的 DD 路由,但其适合应用在数据传输量较少的无线传感器网络中。DD 路由需要经过查询消息的泛洪发送和路径增加机制才能确定一条优化的数据传输路径,当网络的传输数据量很小时,DD 路由的开销显得太大。谣言路由的基本思想是事件区域中的传感器节点产生代理(Agent)消息,代理消息沿着随机路径向外单播扩散,同时 sink 发送的查询消息也沿着随机路径在网络中传播;当代理消息和查询消息的传输路径交叉在一起时,将会形成一条 sink 到事件区域的完整路径^[23]。SPIN 的基本思想是任何两个节点在传输数据前都要进行协商^[24]。节点使用元数据(Meta data)对原始数据进行描述,元数据中包含了原始数据的一些关键信息。邻居节点根据元数据中的信息,决定是否需要传送原始数据。当信息冗余度很高,原始数据量大大高于元数据的情况下,使用这种基于信息协商的路由能大大减少数据的发送量。EAR 算法类似于 DD 算法,但它维护多条路径而不是强迫使用一个最优化路径^[25]。它通过一定的概率选择路径并维护它们,概率值的确定依赖于每条路径上能量的大小,这样可以防止过分依赖某条路径而导致该路径能量消耗过大。GBR 算法也是 DD 路由的一种变种路由算法,其关键思想是当 DD 中的兴趣消息扩散到整个网络时,节点需要记住到 sink 的跳数,把这个跳数作为节点高度,邻居节点之间的高度差就是链路的梯度。当

数据报文发往 sink 时, 沿着梯度最大的方向传送^[26]。

(2) 分层路由

在分层路由中, 网络中的节点被分成很多个簇(cluster), 每个簇由簇头节点(cluster head)和普通节点组成。通常按一定规则选取出能量高的节点担任簇头, 它可以处理和转发信息, 而能量低的节点功能比较简单, 不需要维护复杂的路由信息, 可只执行传感任务^[20,21]。簇的建立和簇头特定任务的分配对于整个系统的可扩展性、寿命和能量效率起非常大的作用。分层结构能够在簇首进行数据融合, 减少网络整体需要的数据传输量和网络中路由控制信息的数量, 具有很好的可扩充性。其缺点是簇头选择算法的实现较为复杂, 簇的建立会增加额外开销, 且簇头节点可能会成为网络的瓶颈。典型的分层路由包括能量自适应分层簇结构(Low-Energy Adaptive Cluster-based Hierarchy, 简称 LEACH)^[27], 传感器信息系统中能量高效收集算法(Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems, 简称 PEGASIS)^[28]和敏感门限能耗高效的传感器网络协议(Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols, 简称 TEEN)^[29]等。

分层路由的代表算法就是 LEACH, 后续很多层次路由算法的思想都是来源于对这个算法的改进。LEACH 协议的基本思想是通过随机循环地选择簇首, 将整个网络的能量负载平均分配到每个传感器节点中, 从而达到降低网络能源消耗、提高网络整体生存时间的目的^[27]。LEACH 在运行过程中不断地循环执行簇重构过程。每个重构过程分成两个阶段: 簇的建立阶段和传输数据的稳定阶段^[27]。为了节省资源开销, 稳定阶段的持续时间要长于建立阶段的持续时间。与一般的基于平面结构的路由相比, LEACH 网络的整体生存时间能够更长。LEACH 的不足之处在于每轮都要选择簇首和分簇, 所以建立阶段的控制开销较大; 其次, 它要求传感器节点之间以及传感器节点与 sink 之间均可以直接通信, 所以网络的扩展性不强, 不适用于大型网络。不同于 LEACH 的多簇结构, PEGASIS 在传感器节点中采用链式结构进行连接, 链中每个节点向邻节点发送和接收数据, 并且只有一个节点作为簇首向基站 sink 传输数据^[28]。采集到的数据以点到点的方式传送、融合, 并最终被送到 sink。协议的优点是减小了 LEACH 在簇重构过程中所产生的开销, 并且通过数据融合降低了收发过程的次数, 从而降低了能量的消耗。它的缺点是链中远距离的节点会引起过多的数据延迟, 而且簇首节点的唯一性使得簇首会成为瓶颈。TEEN 是应用在响应型传感器网络中的路由协议。在 TEEN 中定义了硬、软两个门限值, 以确定是否需要发送监测数据^[29]。初始阶段, 簇头发送给成员一个硬门限值(测量值)和一个软门限值(测量值的变化值)。当监测数据第一次超过设定的硬门限时, 节点用它作为新的硬门限, 并将数据发送到数据采集点。在接下来的过程中, 如果监测数据与硬门限值相比较, 差值大于软门限界定的范围, 则节点传送最新采集的数据, 并将它设定为新的硬门限。通过调节软门限值的大小, 可以在监测精度与系统能耗之间取得合理的平衡。

(3) 地理位置路由

考虑到 WSN 中某些节点能够通过某种技术手段获取自身地理位置信息, 在很多 WSN 路由算法中借助节点的位置信息寻找路由, 这类路由算法的思想部分来源于在 Ad Hoc 研究中取得的成果, 其优点是算法理论基础成熟, 实现简单, 借助位置信息能大大减少路由控制开销和能量消耗, 缺点是如何利用位置信息实现路由发现的算法设计较为复杂。典型的地理位置路由包括地理自适应保真路由协议(Geographical Adaptive Fidelity, 简称 GAF)^[30]和地理能量识别路由(Geographic and Energy Aware Routing, 简称 GEAR)^[31]。

GAF 路由是基于位置信息的能量感知路由协议,其最初是应用在 Ad Hoc 网络中,但对于很多传感器网络同样适用。协议的基本思想是将网络区域划分成很多小区,每个小区内的节点相互协作,一部分节点保持正常工作状态,完成数据收集和转发等任务;另一部分节点可以处于睡眠状态以节省能量,延长网络整体寿命^[30]。小区内处于正常工作的节点就相当于群首。GEAR 算法与 GAF 相似,也是将整体网络按地理区域划分成多个小区域,也为一种基于位置信息的能量感知路由。其路由思想与 DD 路由类似,所不同的是它将 DD 中的兴趣消息限制在一定的区域,而不是在全网广播^[31]。

1.2.2 智能家居无线传感器网络路由的研究现状

传统的家庭自动化是一项研究得比较成熟的技术,已有不少文章对该技术的特性做了详细描述,文献[10~12]很好地描述了家居自动化的特性。WSNSH 的网络规模一般比较小,节点非冗余,节点的数目大小和安装取决于家庭的结构和具体应用。网络更多地用于当人在室内的时候,网络的通信量要远远大于人不在室内的时候。通信链路的不稳定也是 WSNSH 的一大特性,因为在室内无线信号的传输要受到比室外更严重的反射、衍射和折射。如果人在室内的话,链路不稳定会更加严重,因为人的走动会对无线信号的传输产生很大的干扰,文献[13~18]分析了链路不稳定对路由协议的影响。

针对智能家居应用环境的特点,部分学者提出一些有关 WSNSH 路由设计方案。文献[32]提出了针对以基站为中心的 WSNSH 的路由设计方案,在该方案中有外接电源的节点(无线嵌入式节点)被用作路由中继节点及数据汇聚节点,保证了路由转发的可靠性。文献[33]提出了一个能量高效的路由设计方案,该方案将 WSNSH 的覆盖区域划分为以基站为中心的多个扇型区域,每个区域选取出一个剩余能量高的管理节点(manage node)负责路由转发,从而减少网络总体的能量消耗。文献[34]针对智能家居链路状态不稳定的特点提出一个基于两跳的实时路由协议,其着重于根据链路状态预测信息来选择下一跳路由。文献[35]提出了应用 Ad Hoc 网络的按需路由设计思想,借助位置信息限制洪泛从而减少能量消耗的路由设计方案。此外,目前 WSNSH 工程实践中大都使用 ZigBee 标准^[36,37],该标准的路由协议使用的是 AODVjr 算法——一种精简了的 Ad Hoc 网络的 AODV 路由协议,该协议主要运用洪泛技术来实现路由发现过程。

1.3 全书结构安排

全书分为 10 章。

第 1 章为绪论。本章详细介绍了智能家居无线传感器网络路由研究的目的及意义,对国内外无线传感器网络路由算法的研究现状进行了综述,并阐述了本书的主要研究成果及其结构安排。

第 2 章在详细介绍智能家居应用领域的基础上,从网络结构、无线网络协议、网络链路状态和位置信息获取四方面阐述智能家居无线传感器网络的特点,并在此基础上分析智能家居无线传感器网络路由的设计需求。

第 3 章详细分析了 IEEE 802.15.4 协议和 ZigBee 路由算法。结合 WSNSH 的实际应用环境,构造四种不同的仿真场景分析和评估 ZigBee 的 AODVjr 路由算法的特点。设计了一种改进的 ZigBee 路由策略以满足不同的 WSNSH 应用要求。

第4章首先详细研究了利用位置信息的路由技术。对地理位置路由的基本思想、主要问题以及典型算法做了较为全面、详细的介绍、分析和归纳。其次结合智能家居应用特点,设计了一种基于位置信息的动态自适应路由算法,并仿真和评估了该路由算法的性能。

第5章在第4章基础上进一步对圆柱形路由请求域的调整方法展开研究,研究了一种基于动态混合查找的WSN自适应路由算法(DHSR),并仿真和评估了该路由算法的性能。

第6章首先对启发式算法的典型算法,即智能仿生算法和启发式搜索算法做简要介绍,在此基础上设计了基于位置信息的启发式路由算法,最后给出相应的仿真及路由算法性能分析。

第7章从能量均衡的角度考虑智能家居无线传感器网络路由算法的设计,将复杂网络理论引入到对路由算法的设计中,研究了一种基于局部网络介数的能量均衡路由算法,并给出了和最短路径路由算法相比较的仿真性能分析。

第8、第9章主要介绍了作者在无线传感器网络的应用方面的研究进展,简要介绍了有关智能家居无线传感器网络的分簇算法和智能家居能耗控制算法的研究成果。

第10章是全书总结及对今后研究的展望。

第2章 智能家居无线传感器网络

无线传感器网络的逐渐普及,促进了信息家电和电网技术的快速发展。家庭网络的主要设备已由单一的PC向多种家电设备扩展,无线传感器网络技术为信息家电和设备的连接提供了一个基础平台。智能家居无线传感器网络有其自身的特点,本章在分析智能家居应用领域的基础上,从网络结构,无线网络协议,网络链路状态和位置信息获取四方面阐述其特点,并在此基础上分析智能家居无线传感器网络路由的设计需求。

2.1 无线传感器网络概述

2.1.1 无线传感器网络及其应用

近年来,随着人们在无线通信技术、微机电技术(Micro-Electro-Mechanism System, MEMS)、微传感器技术方面取得的巨大进步,一种集成了感知、计算、通信能力,具有低成本、低功耗、多功能、体积小和短距离无线通信等特点的传感器节点,以及由该种节点构建网络的技术得到了越来越多的关注。这种传感器节点集成了传感器技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术和无线通信技术等功能,由这种节点组成的网络可以协同工作,实时或长期监测被监测区域内的各种对象数据,并对这些数据进行分布式预处理后传递给最终用户,从而为用户提供直观的观察效果。由于节点间通信一般采取低功耗、低速率的无线通信手段,因此,这种网络可以称为无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)。

无线传感器网络被认为是21世纪最重要的技术之一,它将对人类未来的生活方式产生巨大影响,麻省理工学院的《技术评论》(Technology Review)杂志评出了对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术,无线传感器网络位于这十种新技术之首^[38]。无线传感器网络作为一种具有传感能力的网络,并不是简单地将传感器连接成网络,其与传统的无线网络有着不同的设计目标,后者在高度移动的环境中通过优化路由和资源管理策略来最大化带宽利用率,同时为用户提供一定的服务质量保证。而在无线传感器网络中,除了少数节点可能会移动以外,大部分节点的位置都是静止不动的。由于它们通常工作在无法接近的恶劣甚至危险的远程环境中,能源无法及时补充,因此设计有效的策略延长网络的生命周期成为无线传感器网络的核心问题。

图2.1示意了传感器节点的系统结构图。它主要包括四个模块:能量单元,通信单元,处理器单元和传感单元。能量单元为节点的各个其他单元提供能量供应。通信单元包括一个无线通信信道。处理器单元包括存储数据和软件系统的内存、一个微处理器(MicroController Unit, MCU)和一个模拟/数字转换器(Analog/Digital Converter, ADC),模拟/数字转换器负责把从传感器单元得到的数据转换成数据信号。传感器单元负责感知周围环境的变化,是连接传感器节点和物理世界的桥梁,包括一系列的传感器(温度、压强、磁场、加速度等)或执行器等,传感器单元的配备主要由具体的应用来确定。