



Performance Optimization of Green Wireless Networks

绿色无线网络 性能优化

朱容波 著



科学出版社

Performance Optimization of Green Wireless Networks

绿色无线网络 性能优化

朱容波 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书包括6章,全面系统地介绍绿色无线网络性能优化的基本理论、关键技术及最新成果,主要内容包括无线 Mesh 网络动态规划路由协议、认知无线网络备份路由算法、基于进化博弈论的认知无线网络频谱分配算法、基于博弈论的认知无线网络频谱接入算法、认知无线传感器网络绿色协作频谱感知技术等。

本书可供无线网络、计算机、软件工程、通信、数学等专业的科研人员、硕士和博士研究生参考,也可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

绿色无线网络性能优化 / 朱容波著. —北京: 科学出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-03-052740-0

I. ①绿… II. ①朱… III. ①无线网—研究 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 101340 号

责任编辑: 李 敏 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 李姗姗

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 13 3/4 插页: 2

字数: 400 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序 言

无线网络技术作为信息技术的重要组成部分，孕育着新的重大突破机遇，正加速向多网共存和业务融合方向发展，移动通信、各类无线应用已经完全融入人们工作和生活等各个方面。随着无线网络基础设施的扩展和网络流量呈指数级增长，无线网络所产生的负面影响也日趋明显，特别是对能源的需求和环境的污染，已经受到广泛关注。急速增长的网络使用与网络能量的低效率使用导致碳排放量逐年加剧。构建绿色网络、降低能源成本和碳排放量已经成为无线网络行业意义重大、亟待解决的研究课题。

为了实现构建绿色无线网络这一目的，学术界和工业界广泛关注网络能耗问题，并积极推动信息通信网络的节能方法研究和应用。目前的工作集中在绿色物理级、绿色链路级和绿色网络级三个方面，通过提高物理设施的部署、传输技术以及资源调度策略、网络拓扑结构调制等，提升能量效率。而为了实现绿色无线网络需求，能量效率和频谱效率将成为未来移动通信网络发展的两大关键因素。因此，如何在考虑高能效约束的同时，有机结合认知无线电技术，设计绿色无线网络协议与算法，成为绿色无线网络领域一个新的发展趋势和研究热点。

该书作者长期从事无线网络领域的科学研究与应用开发工作，重点研究高能效绿色网络协议设计与性能优化技术，取得了一系列重要成果。特别是在认知无线网络、无线网络干扰管理与高能效协议设计等方面的成果得到了国内外同行的好评，发表了一批高质量的学术论文，并培养了多名优秀的研究生。该书是他们这些研究成果的总结。该书的出版将为传播无线网络协议设计与性能优化的基础知识，交流绿色无线网络理论与技术，扩大无线网络的应用做出贡献。

作为从朱容波在读博期间就开始合作的国际同行，见证了他的努力学习、刻苦研究以及工作后的勤奋与付出，我为他取得的研究成果和学术著作的出版感到由衷的高兴，并表示由衷祝贺。

马懋德

2017年4月12日

前 言

对高效无线网络协议设计与性能优化技术进行研究,探索绿色无线网络新理论与新技术,对进一步普及各类无线应用、降低能源成本和碳排放量具有深远的意义。目前人们的研究主要集中在绿色物理级、绿色链路级和绿色网络级三个方面,较少涉及高效认知无线电技术。而为了实现绿色无线网络需求,能量效率和频谱效率是未来移动通信网络发展的两大关键因素。因此,如何在考虑高效约束的同时有机结合认知无线电技术,设计绿色无线网络协议与算法,成为绿色无线网络领域一个新的发展趋势和研究热点。

本书共6章。第1章介绍绿色无线网络技术的国内外发展现状与最新成果。第2章介绍绿色无线 Mesh 网络相关路由协议,重点对基于动态规划的无线 Mesh 路由协议进行研究。第3章介绍绿色认知无线电路由协议相关技术,研究基于时延约束的认知无线网络备份路由算法。第4章从网络架构、频谱分配行为、频谱分配方式及共享接入方式四个角度介绍绿色认知无线电频谱分配技术,重点对基于进化博弈论的认知无线电频谱分配算法进行研究。第5章介绍绿色认知无线电频谱接入技术,重点阐述采用博弈论模型来研究认知无线网络中的频谱接入问题,并设计两种基于双寡头博弈模型的认知无线网络频谱接入算法。第6章着重分析绿色认知无线传感器网络协作频谱感知技术,从审查和两步检测两个角度研究基于决策传输的协作频谱感知算法和基于两阶段感知的协作频谱感知算法。本书由中南民族大学朱容波撰写、统稿与校稿,研究生张浩参与了部分校稿工作。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目(NO. 61272497)、国家民委中青年英才培养计划项目、中央高校基本科研业务费专项基金(CZP17043)的支持,同时得到了科学出版社的大力支持,在此表示衷心的感谢。由于水平有限,对一些问题的理解和表述或有不足之处,诚请读者批评指正。

朱容波

2017年4月15日

目 录

序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 高能耗现状分析	1
1.3 绿色无线网络研究现状	3
1.4 绿色无线网络关键技术	3
1.4.1 绿色物理级	4
1.4.2 绿色链路级	5
1.4.3 绿色网络级	6
1.5 绿色无线网络新能源技术	8
1.6 未来绿色无线网络展望	9
1.7 小结	10
1.8 本书结构介绍	10
参考文献	10
第 2 章 无线 Mesh 网络动态规划路由协议	13
2.1 无线 Mesh 网络中的路由技术	13
2.1.1 无线 Mesh 网络	13
2.1.2 无线 Mesh 网络中的路由技术	21
2.2 动态规划路由建模	27
2.2.1 相关工作	27
2.2.2 无线 Mesh 网络动态规划路由模型	29
2.3 基于动态规划的路由协议	31
2.3.1 相关工作	31
2.3.2 新路由判据 EEDT	35
2.3.3 基于决策序列的路由算法 MDSR	36
2.3.4 仿真与性能分析	39
2.4 总结与展望	44
参考文献	44
第 3 章 认知无线电网络备份路由算法	48
3.1 CRN 中的路由技术	48

3.1.1	CRN 路由研究面临的挑战	49
3.1.2	CRN 路由协议分类	50
3.1.3	其他路由协议	58
3.1.4	路由协议比较	59
3.1.5	小结	60
3.2	基于时延约束的备份路由算法研究	60
3.2.1	相关工作	60
3.2.2	提出的算法	64
3.2.3	性能分析	67
3.2.4	小结	72
3.3	仿真分析	73
3.3.1	仿真环境	73
3.3.2	仿真实验及性能分析	73
3.3.3	小结	77
3.4	总结与展望	77
	参考文献	78
第4章	基于进化博弈论的认知无线网络频谱分配算法	82
4.1	基于博弈论的认知无线电频谱分配	82
4.1.1	频谱分配	82
4.1.2	基于博弈论的频谱分配模型	83
4.1.3	性能分析	92
4.1.4	小结	93
4.2	基于进化博弈论的频谱分配算法研究	93
4.2.1	相关工作	93
4.2.2	提出的算法	94
4.3	仿真分析	100
4.3.1	仿真环境	100
4.3.2	仿真实验与性能分析	100
4.3.3	小结	109
4.4	总结与展望	109
	参考文献	110
第5章	基于博弈论的认知无线网络频谱接入算法	114
5.1	认知无线电频谱接入技术	114
5.1.1	MAC 协议	115
5.1.2	MAC 协议分类	115
5.1.3	频谱分配	124
5.1.4	小结	135

5.2 基于博弈论的频谱接入算法研究	135
5.2.1 引言	135
5.2.2 一般模型	136
5.2.3 系统模型	137
5.2.4 算法描述	138
5.2.5 博弈算法分析	140
5.2.6 小结	144
5.3 仿真分析	144
5.3.1 仿真实验与性能分析	145
5.3.2 小结	152
5.4 总结与展望	152
参考文献	153
第6章 认知无线传感器网络绿色协作频谱感知技术	157
6.1 协作频谱感知技术	158
6.1.1 非协作频谱感知	158
6.1.2 协作频谱感知	160
6.1.3 性能分析	173
6.1.4 小结	174
6.2 基于决策传输的协作频谱感知算法	174
6.2.1 相关工作	174
6.2.2 节能可靠的决策传输	176
6.2.3 仿真分析	185
6.2.4 小结	190
6.3 基于两阶段感知的协作频谱感知算法	191
6.3.1 相关工作	191
6.3.2 认知自适应的两阶段感知	193
6.3.3 仿真分析	202
6.3.4 小结	207
6.4 总结与展望	207
参考文献	208

第 1 章 | 绪 论

1.1 引 言

无线网络技术作为信息技术重要的组成部分，孕育着新的重大突破机遇，正加速向多网共存和业务融合方向发展。在传统信息理论的指导下，蜂窝移动通信网、广播网、移动互联网、无线局域网和无线传感网等各类无线网络技术迅速发展，形成了多网共存的“通信战国时代”^[1]。随着无线技术的进步以及整个市场的大规模扩大，无线网络行业所依赖的工业产品、传输线路、终端设备、通信网络的核心系统、动力系统以及网络中心、基站等随之快速增加。由于不断升级的无线网络基础设施的扩展和呈指数级增长的网络流量，无线网络所产生的负面影响也日趋明显，特别是对能源的需求和环境的污染，已经受到广泛关注。根据文献 [2] 和文献 [3]，信息通信技术 (information and communication technology, ICT) 产生的 CO₂ 排放量约占整个人类社会总排放量的 2%~4%，近似相当于全年汽车 CO₂ 排放量的 1/4，且将继续保持高速增长，预计将从 2002 年的 5.3 亿 t 增长到 2020 年的 14.3 亿 t。而无线通信系统作为 ICT 的重要领域之一，碳排放量始终占据着很大比例，预计将从 2002 年的 42% 增长到 2020 年的 51%^[4]。

传统的网络系统设计的两个原则有悖于低碳节能的目标：一是超额资源供给，在缺少服务质量支持的因特网架构下，超额资源供给使网络承受突发的峰值负载；另一个是冗余设计，通过冗余链路和设备提高网络的可靠性，以应对突发的故障失效^[5]。但这两个原则均建立在牺牲网络能耗的基础上。随着网络用户的逐渐增多、网络设备的更新换代、网络规模的扩展以及环保意识的加强，无线网络能耗增长、利用率低、浪费严重等问题得到暴露。云计算和大数据处理的发展、智能手机和平板电脑等智能终端的出现，在给用户带来便利的同时也产生了大量的网络流量。互联网、通信网、传感网以及物联网等网络设施的建设与数据传递大大增加了网络的复杂性与能耗。优化无线网络能效不仅能降低对环境的影响，还能降低网络成本，从而使网络在普遍环境更加实用。由此可见，构建绿色网络、降低能源成本和碳排放量已经成为无线网络行业意义重大、亟待解决的研究课题。构建绿色网络的目的是减少能源消耗，降低电磁辐射，提高资源利用率并使资源消耗对环境的影响最小。

1.2 高能耗现状分析

如今，无线网络产生高能耗的原因大致可分为如下两种。

1. 急速增长的网络使用

据国际能源署(International Energy Agency, IEA) 统计数据和全球电子可持续性倡议组织(Global e-Sustainability Initiative, GeSI) 的预测报告《Smart 2020: 实现信息时代的低碳经济》, 全球 ICT 产业在 2007 年的碳排放量为 8.3 亿 t, 到 2020 年预计将增至 14 亿 t。其中, 互联网、移动通信网络和终端设备(包括手机、无线路由器和机顶盒等) 在产业总能耗中所占比例分别为 45%、43% 和 12%^[6]。国际电信联盟在 2011 年发表了 M. 2243 报告, 指出 2015 年的数据业务流量是 2010 年的 30 倍, 而 2015~2020 年数据业务量更将显示出指数级增长^[7]。图 1-1 所示为 2013~2017 全球无线通信资本支出情况。

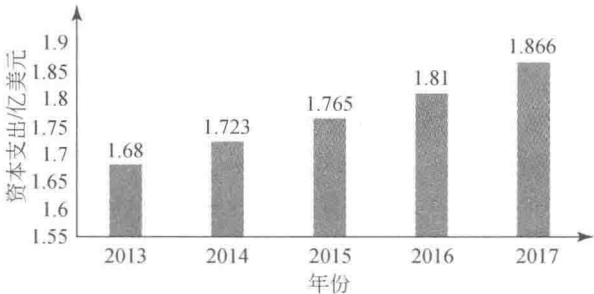


图 1-1 2013~2017 全球无线通信资本支出情况

在中国, 截至 2015 年 12 月底, 全国移动电话用户总数达到 13.06 亿户, 移动通信基站总数达 466.8 万个, 移动互联网接入流量消费达 41.87 亿 G, 且还在持续增长。随着用户数量和网络流量的增加, 网络运营商不得不持续增加基站数量和大范围覆盖 WiFi 热点, 构建无线传感器网络以及无线 Mesh 网络; 同时引入了宏基站、微基站、微微基站等混合覆盖的新式网新模式。这些数量庞大的移动终端、基站以及传感器节点无时无刻不在进行着无线通信, 不仅能量消耗巨大, 且其数量以及用户数均在持续增长, 如果不加以控制, 后果不堪设想。

2. 网络能量的低效率使用

为了实现对故障的应急反应, 提高网络鲁棒性, 传统的无线网络在设计时存在冗余设计的问题, 在配置时预设了大量的备用链路以及设备。实验表明, 网络设备在低负载和满载条件下能耗非常接近。而在大多数正常情况下, 闲置链路和网络设备并不需要使用, 却不得不全天满功耗地工作, 能量却一直在被使用, 造成了大量浪费。据估计, 骨干网即使在业务量高时设备平均利用率也不足 30%, 这就意味着大部分网络在闲时平均利用率不到 5%^[5]。

同样, 频谱作为一种稀缺的自然资源, 也存在低能效的问题。首先, 频谱资源存在大量频段无法使用的问题。其次, 在业务量较少的时段里, 频谱的使用存在明显的浪费。根据美国联邦通信委员会的报告, 目前大部分授权频段在长时间内均处于闲置状态。如何高效运用频谱资源, 对不同空闲频段加以利用, 实现对快速增长的无线网络流量传输以及大

量设备的连接请求，是目前面临的巨大挑战。

1.3 绿色无线网络研究现状

为了达到构建绿色无线网络这一目的，各国际组织、机构和研究者广泛关注绿色通信网络能耗问题，并积极推动信息通信网络的节能方法研究和应用。

在政策与国际组织方面，2010年，贝尔实验室率先成立 Green Touch(绿色沟通)组织。Green Touch 通过对近年无线网络的研究，结合对网络架构以及网络性能的分析，认为通信网络的能效性在之后5年有望提升1000倍以上^[8]。2012年建立的TREND项目旨在优化无线网络性能，建设绿色电信行业^[9]。美国投入重金于智能电网的研究和运营之中，使电网运行、能源效率、资产利用率和可靠性得到了改善。加拿大高级研究和创新机构在减少数据中心和制冷设备的能耗方面取得了突破。2009年10月中国通信标准化协会成立了“通信产品环保标准特设任务组”，为移动终端设备节能功耗参数与测量方法制定了标准。同时，我国在2011年将节能减排列为“十二五”规划中的重大专项，国务院发布了《节能减排“十二五”规划》以及《“十二五”节能减排综合性工作方案》，我国工业和信息化部也发布了相关绿色节能政策。

在学术界方面，电气和电子工程师协会(IEEE)对绿色无线网络关注密切。在近几年国际会议上，IEEE多次召开与绿色无线网络相关的专题会议，并建立了802.3az工作组来对能量有效性进行标准的定义。IEEE在ICC 2009、GLOBECOM 2009、GLOBECOM 2010连续举办了3届以“绿色通信”为主题的国际会议。同时，在2010年和2011年策划了3期以绿色通信为主题的专刊，并陆续策划了相关征稿活动。

在企业方面，许多无线通信企业均投入到绿色网络的相关研究和服务中。美国Version电信公司制定了环保采购规范，新购置的节能产品相比以前产品能节省20%的能源。日本NTT电信公司采用能源系统绿色设计，提出了“绿色一体化”概念，形成了绿色数据中心、绿色咨询、绿色能源、绿色监控等一系列的节能解决方案。中国移动等运营商积极开展绿色节能行动，在2007年便签订了“绿色行动计划”合作协议。中国电信集团也推进节能工程，开展了空调管理、自适应节能技术和供电节能系统。华为提供了时隙级关断功能，成功解决了馈电损耗这个难题，实现了40%以上的基站功耗节约^[10]。

1.4 绿色无线网络关键技术

如今，绿色无线通信的研究从网络构架方面出发可分为绿色物理级、绿色链路级和绿色网络级三方面。绿色物理级以无线网络的物理设备以及物理层优化为切入点，通过优化基站、无线节点等物理设施的部署和提高能效性以及无线资源效率的优化来达到节能的目的。绿色链路级则着重研究如何采用高效率的传输技术以及资源调度策略来达到提升资源使用效率的目的。绿色网络级从无线资源管理和网络拓扑的方向切入，研究通过调整如传感器网络、Mesh网络等网络的拓扑结构来使网络的能量效率达到最大。下面分别从这

三方面详细描述相关绿色无线网络技术。

1.4.1 绿色物理级

如图 1-2 所示，在无线接入网络中，基站是能源消耗的主要来源。据估计，接入网基站的能耗超过整个网络能耗的 60%。全球大约有 300 万个基站，总共消耗 4.5GW 的能量^[11]。因此，如何在保证服务质量的前提下提高基站的能量有效性，降低基站的功率需求必然是当今研究的重点。

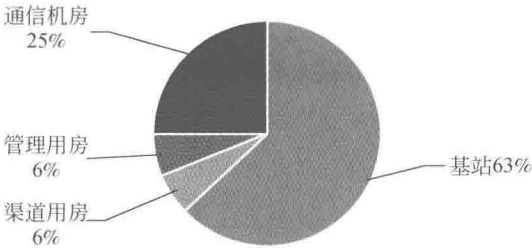


图 1-2 无线通信能耗模型

基站系统的构成主要分两部分：基站收发台和基站控制器。其中基站 50%~70% 的能量都消耗在功率放大器(power amplifier, PA)中。而这其中，80%~90% 的 PA 能量是以热能的形式浪费的，并且为了降温，空调的消耗又增加了更多的能源成本。因此，如何增大功率放大器的效率一直是研究的重点之一。文献 [12] 提出了基于基波以及二次谐波调谐的 J 类放大器，能实现较高的功放效率。文献 [13] 提出了基于数字预失真的多尔蒂架构和 GaN 架构的放大器，能有效地将能效提升 50% 以上。另外，采用开关模式的功放器也能很大程度上提高能效。与标准功放器相比，开关模式功放器更容易冷却，且仅需要较小的电流。

由于用户的流动性等因素，蜂窝网络中的流量负载在空间和时间上有明显的波动，这会导致部分基站处于高负荷状态而另一部分处于低负荷状态的情况。因此，静态的基站部署在流量波动的情况下效率是比较低的，特别是在基于微蜂窝和微微蜂窝等网络中。采用合理的睡眠节电模式周期性地关断系统部分模块能有效降低系统能耗^[14]。伴随着 LTE (long term evolution) 发展出的自组织网络(self-organizing network, SON) 技术，通过添加网络管理和智能系统使网络能够优化配置和自我修复，同时降低成本，提高网络的性能和灵活性^[15]。文献 [16] 提出一个相似但更灵活的概念“蜂窝缩放(cell zooming)”。基站可以根据网络或流量情况调整单元格大小来达到平衡流量负载，同时减少能源消耗的目的。无法缩放的细胞甚至可以进入睡眠模式，以减少能源消耗。

小基站(small cell)是低功率的无线接入节点，覆盖 10~200m 的范围。由于其拥有体积小、安装灵活、功耗低、快速部署等特点，从而可以有效提高频谱分配效率和服务质量。与宏基站相比，小基站可更加有效地改善室内深度覆盖，增加网络容量，提升用户感知，因而近年来受到了广泛的关注。文献 [17] 提出小基站周期性开启机制，解决了双层

异构蜂窝网络中系统无法获取用户与关断小基站之间信道信息的问题, 仿真证明该机制能够有效节约86%的小基站总能耗。文献[18]分析了目前异构网络中宏基站与小基站的部署特点, 并根据异构网的立体组网特性着重研究城市密集区域和偏远稀疏区域两种特殊场景来探讨异构网的覆盖组网技术, 对现有宏基站-小基站异构网节能覆盖方案作出了评价。

大规模多输入多输出技术(massive MIMO)^[19]通过在基站端安装数百根天线, 使信号通过发射端与接收端的多个天线传送和接收, 从而改善通信质量, 同时使线性检测器的性能达到最佳并提高频谱效率, 达到减小基站部署密度与减轻频谱受限的压力, 提高系统信道容量, 减低功率的目的。所以也被称为下一代移动通信的核心技术。

1.4.2 绿色链路级

测量表明, 以太网处于空闲和100%链路利用率的情况下功耗几乎是相同的, 即以太网功耗与链路利用率无关。在实践中, 即使在没有帧发送的空闲时段, 链接为了保持同步也需要连续发送无意义的数据。因此, 在链路处于低利用率时, 根据信道条件来选择不同的调制方案, 通过降低链路速率能有效地降低链路能耗。

目前, 链路自适应速率调节主要从两方面研究: ①空闲时段关闭链路, 也称为睡眠-唤醒机制; ②在低利用率期间降低链路速率, 也称为动态速率调节机制。两种方法均是根据不同数量级的网络流量选择对应数量级的链路, 自适应地调整链路速率, 从而有效避免网络流量和链路等级不对等情况, 节省了不必要的能耗。

睡眠-唤醒机制只包含两种链路状态: 睡眠状态和唤醒状态。该机制的困难之处在于在系统的反应性和节能之间找到合适的折中。在文献[20]中, 作者通过测量数据包到达的间隔时间来让节点决定它们的接口状态, 并且考虑这个间隔是否足够长来证明在连续两帧有明显的能量节省。文献[21]中, 作者提出了双状态睡眠模式策略, 第一状态对应于常规操作模型, 第二状态为节能模型。从节能模型转换到操作模型时, 会消耗部分时间且产生能量消耗巅峰。而反向转换时则恰恰相反。目前, 低功耗休眠机制已经被IEEE 802.3az 标准采用, 作为IP网络的重要节能技术。

相比只有两种状态的睡眠-唤醒机制, 动态速率调节机制通过使用不同的传输速率来实现更广泛的调节可能, 而在今日被更多地使用。动态速率调节的难点在于转换状态时的成本花销。以太网定义了从10Mbit/s到10Gbit/s的数个传输速率, 在不同状态之间的转换所需要的能耗与时间均不同, 过长的转换时间则会造成系统性能的损失, 如延迟增加、报文丢失等。例如, 对PC端系统的网络接口卡(network interface card, NIC)的数据速率从10Mbit/s增加到1Gbit/s, 结果增加了约3W能耗。而对于普通转换, 相同的吞吐量只会增加约1.5W的能耗^[22]。文献[23]表明进行速率转换所消耗的时间是不可忽略的, 并且时间不仅与起始状态和终止状态有关, 而且是不对称的。所以在进行成本计算时还需考虑转换的方向。自适应调节结构如图1-3所示。

其次, 无线频谱作为我国重要的战略性资源, 是非常宝贵的。但研究发现, 当前频谱资源的管理中, 频谱资源的使用与分配上已经产生了较大的矛盾。一方面, 随着通信需求

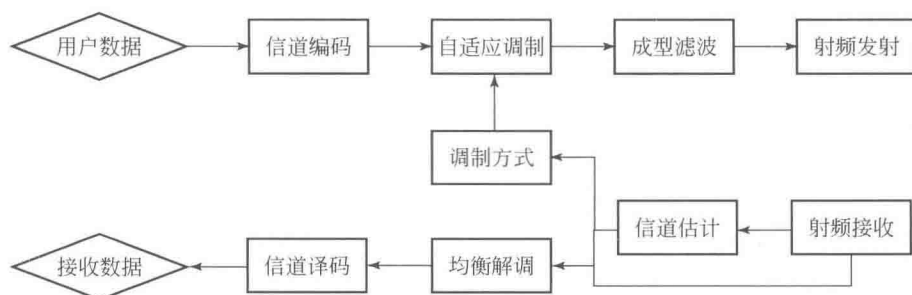


图 1-3 自适应调节结构图

的膨胀以及业务量的增长，频谱资源的分配已所剩无几；另一方面，当前频谱分配的分配方式使得频谱的利用率很低。美国国家无线网络研究实验台项目的一份测量报告表明，3GHz 以下频段的平均频谱利用率仅有 5.2%。所以，如何提高频谱资源的利用率也是无线绿色网络的关键技术之一。

正交频分多址接入(orthogonal frequency division multiple access, OFDMA) 技术由于具有较高的频谱利用率，支持灵活的带宽扩展性，易于与多天线技术结合，易于与链路自适应技术结合的特点，已经成为新一代无线网络标准广泛采用的物理层标准。文献 [24] 最先提出 OFDMA 能效优化的资源分配方法。文章通过对电路能耗以及射频能耗对系统能效影响的研究，提出了通过调整发射总功率以及子载波功率的网络优化方案，并证明该方案能够实现 20% 的能量节能优化。文献 [25] 对 OFDMA 网络上、下行链路调度问题进行了研究。文章通过建立相应分配模型，对链路最优功率和最优子载波分配进行分析，提出了上、下行信道资源分配的次优算法。

终端通信技术(device to device, D2D) 是一种新型的设备到设备间通过复用小区资源直接传输的通信技术。D2D 技术在宏蜂窝基站的控制下获得通信所需的频率资源和传输功率，这使得用户除了能够通过基站进行通信，还可以通过 D2D 链路进行直接通信或者转发数据。D2D 技术能够在保证了服务质量(quality of service, QoS) 及通信鲁棒性的前提下有效提高频谱利用率，同时降低基站负荷。D2D 通信在如车载通信、就近通信等领域非常受欢迎。同时可将其运用到公共安全和灾难场景中，以解决网络容量过载、网络连接受限等难题^[26]。作为 5G 关键技术之一，D2D 可采用广播、多播、单播等模式，未来将发展其增强技术(advanced D2D)，如多天线技术和联合编码技术等，必将在未来有很大的应用前景^[27]。

1.4.3 绿色网络级

传统的网络部署一般着重考虑网络性能及资金花销。但近年来，随着对绿色通信认识的逐步加强，关注网络能效与能耗的网络部署渐渐受到人们的关注。基站作为能耗大户，对其部署进行优化势在必行。分布式基站技术使用光纤替代馈线将基站射频部分延迟，从而缩短了连接设备的电缆长度。文献 [28] 通过研究宏蜂窝内微蜂窝个数对网络性能的影响，证明在合理部署微小区的情况下，能够有效提高网络能效，降低无线通信的能耗。

3GPP(generation partnership project) Release 10 提出宏蜂窝、微蜂窝、微微蜂窝和家庭基站共同组网的层叠型网络, 其中宏基站仍发挥其广覆盖的特点, 而微蜂窝及微微蜂窝则着重服务高速业务的热点区域, 家庭基站为室内提供服务。不同基站发挥特长、互相弥补, 节省了不必要的资源开销^[29]。文献 [30] 通过在基站与核心网络之间增加协同服务器, 提出了一种新型网络架构, 实现逻辑结构可变的常规通信以及基于基站控制的多播和短距离通信。实验表明, 该结构实现功率资源与业务的优化匹配, 提高了网络的功率效率。

中继网络通过在基站与用户间建立廉价的中继节点而成为一种经济、新颖的网络构建方案。中继技术通过把多跳技术融入现有蜂窝网络, 网络信号经历不同的衰落信道得到分集增益而提高频谱效率, 从而提高信号可靠性以及降低基站的发射功率。如图 1-4 所示, 在该小区内部署若干中继节点并采用中继技术, 这使得相距较近的基站与用户之间可以采用直接通信方式, 而距离较远的通信则可以采用多跳方式, 即通过中继节点进行转发。

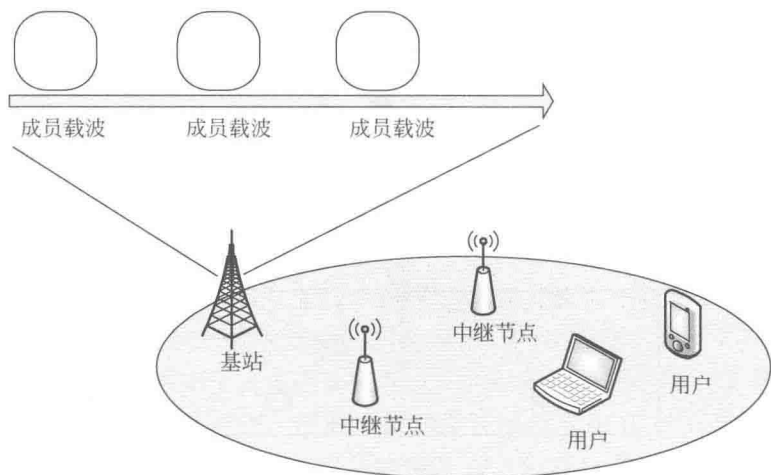


图 1-4 小区内部署中继节点

基于传统蜂窝网络, 其他无线网络技术也在近年发展迅速, 无线局域网、广播网、无线传感网、卫星网、移动互联网、Ad hoc 网等都为追求绿色节能, 提高能效而在网络拓扑结构、路由算法等方面进行了优化。

在无线传感器网络中, 大部分能量消耗均来自于节点间通信, 且由于难以进行电池更换, 如何节约通信能耗、延长网络生命周期是目前绿色传感器网络的主要研究方向。在无线传感器网络拓扑研究中, 文献 [31] 提出一种分布式能量有效性无线传感器拓扑算法。网络通过拓扑构建和拓扑维持两个阶段使得节点传输范围内的其他节点均接收到数据包, 以减少数据包重传次数。同时算法设定多个不同阈值来动态调节节点能耗使用率, 以此平衡网络能耗, 延长网络周期。文献 [32] 通过节点移动来均衡网络节点的密度, 使得网络的能量分布变得均衡, 另外以每跳通信的时延大小为标准确定参与通信的节点, 用能量等级高的节点取代能量快耗尽的节点, 使能量等级低的节点处于唤醒状态, 而能量等级高的节点处于休眠状态, 也平衡了网络的能量负载。通过减少通信时的数据传输量来节约能耗

是另一项研究热点。其中，通过数据融合方法对来自不同数据源的数据进行网内处理，去除冗余信息，以形成高质量的融合数据被广泛运用于传感器网络中。目前使用较多的融合算法包括 D-S 证据理论、神经网络、模糊逻辑、遗传算法和卡尔曼滤波等。文献 [33] 针对大规模传感器网络，在保证数据可靠、准确的前提下，运用卡尔曼滤波对收集的数据进行预测，将状态估计相似的节点转换为睡眠模式，以此减少活跃节点的个数，以达到节约能耗、增加传感器网络生命周期的目的。文献 [34] 基于加权平均法思想，提出了最小能量可靠聚集算法(minimum energy reliable information gathering, MERIG)。针对无线传感器中由于环境等因素引起的数据包出错率(包括包丢失和数据比特错误)问题，对数据包可靠传输进行了优化。文章提出信息权重的概念，以此表示数据包中包含的信息量或融合后的数据包的重要性/准确性。如在测量房间温度的传感器网络中，传感器可分为房间融合节点、角落融合节点以及普通节点，如图 1-5 所示。通过动态地设定每个数据包的重传次数，在满足足够的传输可靠率的前提下，降低了数据的传输总量，达到了降低能耗的效果。

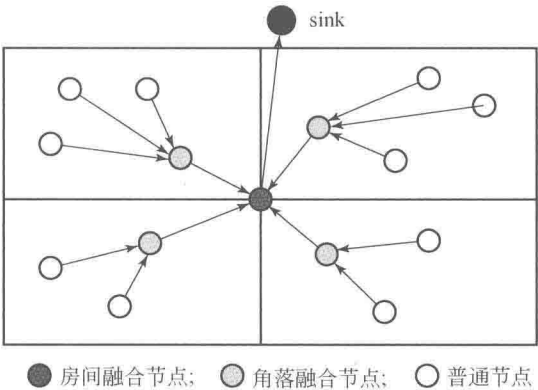


图 1-5 MERIG 算法测量房间温度

1.5 绿色无线网络新能源技术

随着化石资源的日益枯竭以及人们对自然环境的日益重视，通过利用新能源来降低碳排放量被广泛地运用在无线通信行业中。新能源是指除了煤炭、石油之外的具有可持续性的资源，如风能、太阳能、燃料电池等，其特点包括具备可再生特性、对环境影响小、分布广等。新能源产业的发展既能弥补现阶段化石能源供应的日益减少，也是环境保护和减少碳排放量的重要措施，满足人类社会可持续发展的需要。

目前，使用新能源供电主要以风力发电和太阳能发电系统为主，或者是风光互补系统，主要形式包括新能源独立供电系统、新能源与柴油发电机互补供电系统、新能源与市电互补供电系统等。风力发电的特点是获取容易且功率密度大，成本低廉，但存在稳定性差等问题。故为了保证系统的供电安全，系统需配备较大的风机容量和蓄电池容量。相较

之,太阳能供电则更为稳定,但其供电成本非常高,且占地面积比较大,系统功率密度和转换效率相比风力发电均较低^[35]。

燃料电池是一种将存在于燃料与氧化剂中的化学能直接转化为电能的发电装置。与一般的电池不同,燃料电池只需要不断提供燃料源供给,便能依靠电极持续发电。由于燃料电池不需要燃烧燃料,这使得化学反应过程变得安静、无污染,同时电池效率高达45%~60%。燃料电池还具备很多其他优势,如减少污染排放,噪声低;具有高度的可靠性,模块化,便于维护;适用能力强,可以使用多种多样的初级燃料等,具有很强的过负载能力^[28]。

1.6 未来绿色无线网络展望

传统的无线网络建设主要围绕如何提升容量、增加覆盖等方面进行。而为了实现绿色无线网络需求,能量效率和频谱效率将成为未来移动通信网络发展的两大关键因素。基于此,未来绿色无线网络技术可能的几个研究方向包括:

1. 高效能认知无线电技术

认知无线电技术通过实时感知四周的无线网络环境并及时自主地调节各工作参数,使网络能够通过对频谱的感知和分析以“机会方式”让次级用户动态接入空闲频谱,提高频谱资源的利用率。目前,国内外认知无线电技术的研究大都集中在物理层、MAC(medium access control)层、网络层的功能方面,如频谱感知、功率控制、频谱共享、频谱移动性管理、跨层设计等技术。未来,更多的研究可以关注设备的功耗问题,以及如何减少功耗和提高能效性来延长设备续航时间。同时,认知无线电技术 MAC 协议的吞吐量研究及其所带来的认知容量增益的研究也将是未来研究的主要方向。

2. 异构网络优化

随着多种接入制式共存、部署密度加强异构网络的逐渐增多,无线网络将受到更多的传输干扰,节点分流、网络容量等均会大幅度降低。由此,在部署前对网络站点的选址以及密度进行规划是极其重要的。同时,频谱资源的分配也会极大地影响无线通信效率,如何尽量减少同频干扰、减少频谱空洞现象将是研究重点。为了降低基站能耗,可以构建唤醒-睡眠异构网络,根据用户业务量动态变化而适当地关断唤醒部分节点,以此来降低基站能耗,实现绿色通信理念。

3. 无线网络虚拟化技术

早期网络虚拟化主要集中在核心网部分,如虚拟局域网(virtual local area network, VLAN)、软件定义网络(software defined network, SDN)、网络功能虚拟化等。但随着5G网络的临近,无线网络虚拟化也得到越来越多的关注。目前的无线网络技术尚不成熟,由于是多种类型的物理网络垂直独立共存,使得网络协议各不相同,节点属性亦不同。同