



专题:异构网络

异构协同无线网络的多向中继技术:从理论到实践

杨延平^{1,2}, 陈巍¹, 珂珂², 李鸥²

(1. 清华大学电子工程系 北京 100084; 2. 国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450011)

摘要:提出了一种基于协同中继技术的异构网络融合方案,通过中继节点构建异构无线网络通信基础,采用协同通信的多向中继技术解决异构无线接入网间的传输瓶颈。进一步具体化结合无线局域网与蜂窝网络,研究其有效融合的场景和关键技术问题,提出可能的解决方案,兼顾室内数据高速率需求和室外高移动性要求,从而高性价比地提升用户体验质量。

关键词:移动通信;异构网络;多向中继;网络编码调制;密集立体覆盖

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015243

Multi-Way Relaying Techniques for Heterogeneous Cooperative Wireless Network: From Theory to Practice

Yang Yanping^{1,2}, Chen Wei¹, Ke Ke², Li Ou²

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. National Digital Switching System Engineering & Technological R&D Center, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: A heterogeneous network integration scheme based on cooperative relay technology was proposed, then the foundation of heterogeneous network was conceived through the relay node, with the aim to solve the transmission bottleneck between heterogeneous wireless access network by using the multidirectional relay technology, with the aid of cooperative communication. More specifically, based on WLAN and cellular networks, the effective integration and key technologies of the scene problems were investigated, then some possible solutions, with the purpose of meeting the indoor high data rate requirements and the outdoor high mobility requirements, so as to cost-effectively improve the quality of the user experience, were put forward.

Key words: mobile communication, heterogeneous network, multidirectional relay, network-coded modulation, dense 3-dimensional coverage

收稿日期:2015-08-20;修回日期:2015-09-11

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2013CB336600, No.2012CB316000),国家自然科学基金优秀青年科学基金资助项目(No.61322111),国家自然科学基金资助项目(No.61201380, No.61321061),网络与交换技术国家重点实验室开放课题,国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2012AA121606),创新人才推进计划基金资助项目(No.2013RA2151),北京市科技新星计划基金资助项目(No.Z121101002512051),教育部新世纪优秀人才计划基金资助项目(No.NCET-12-0302),清华大学高层次人才建设计划(“221”计划)基金资助项目

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB336600, No.2012CB316000), NSFC Excellent Young Investigator Award(No. 61322111), NSFC Project(No. 61201380, No.61321061), Open Subject of National Key Laboratory of Network and Switching Technology, The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA121606), National Innovative Talents Promotion Program (No. 2013RA2151), Beijing Nova Program(No. Z121101002512051), MoE New Century Talent Program(No. NCET-12-0302), Tsinghua University High Level Talent Construction Program (221 Program) Foundation Funded Project

论文引用格式:杨延平,陈巍,珂珂等.异构协同无线网络的多向中继技术:从理论到实践.电信科学,2015243

Yang Y P, Chen W, Ke K, *et al.* Multi-way relaying techniques for heterogeneous cooperative wireless network: from theory to practice. Telecommunications Science, 2015243

1 引言

移动通信网络的高速发展为用户提供了多样的信息服务,种类和制式多样的无线通信网络构成了日趋复杂的网络环境。微基站、室内覆盖、中继站、家庭基站等同制式的无线接入网与 WiMAX、2G/3G/LTE 网络、无线局域网(WLAN)等不同制式的无线接入网共存于高校、商场等城市密集区域,多种类型无线网络的共存形成了异构网络(heterogeneous network),而各种不同类型网络的异构特性导致的网络间互联、协作融合的研究问题已成为现阶段通信领域研究的重点。异构网络中,宏基站和微基站、小区间的负载分布、频谱资源分配、功率资源分配、系统间的干扰协调和保密通信等十分复杂和关键。从制式上讲,多种异构网络间需要统一的管理机制和相应的功能模块来解决复杂的接入问题;从网络结构和实际设计上讲,异构网络需要结合成本和能源消耗探索合适的技术。

认知协同通信是具备自主感知、自适应和频谱资源管理能力的无线电技术,能够有效地分析和学习周围的无线环境和用户行为,通过调整系统的参数来选择最佳状态以适应周围环境,从而提高频谱利用率和服务质量。中继技术是认知协同通信技术中最重要的技术之一,是经济便捷的网络覆盖方案,目前 3GPP 在 LTE-Advanced 已经启动了中继技术的研究工作,作为蜂窝网络的增强覆盖技术。中继技术具有以下特点:

- 相比光纤等有线网络,其具有低成本、安装方便快捷、控制容易等特点;
- 易与宏基站结合,协同的中继为弱覆盖区域提供更高的速率,改善宏基站的资源利用率,增加整个系统的容量;
- 在微蜂窝/微微蜂窝、家庭基站和中继协作等蜂窝网增强方案中,前两种技术依赖固定的回传通道,有着站址选择和回传链路等限制,无法完全解决小区边界和阴影区域覆盖问题。此外,微蜂窝需要额外的光纤/微波回路资源,因而布置成本相对较高,家庭基站自由化程度大,管理难度高。而协作中继不仅部署灵活、成本低,且具有很强的组网灵活性。

为此,有必要深入挖掘中继协作传输技术的潜力,拓展中继协作的应用场景,如异构网络融合。基于协同通信

和无线中继技术的异构无线网络融合方案,通过集中式的管理和技术把各种无线网无线融合在一起,能够充分满足大部分网络 and 用户的需求^[1]。将中继技术作为异构网络融合方案有一些问题尚待解决:

- 中继技术的优势在于解决覆盖问题和提升可靠性,在异构网络融合中对于增加网络容量来讲,相比微基站、家庭基站没有明显优势;
- 中继在异构网中存在链路选择、干扰抑制、自组织自适应功能问题,有待进一步研究;
- 异构网络本身规模大,构成复杂,具有异构性、独立性、多变性特点,不同类型的业务对网络的要求不同,因此异构网络的接入设计、资源管理、路由、用户 QoS 需求以及认证和安全技术等都是待解决的关键问题。

针对协同中继技术和异网融合结合的相关技术难点和需求,以解决异构网络融合中一些重要问题为目的,提出了一种以多向中继为基础,以网络编码技术为核心的融合方案,结合自适应调制、QoS 机制、高效信道编码等技术,实现异构网络的非对称传输机制,提高网络的容量和服务质量,并简化网络融合的设计,为上述问题提供可能的解决方案。

2 认知中继的异构网融合:理论到实践

异构网络的一般定义为“不同的接入技术、不同的网络架构、不同的传输方案或不同覆盖范围的接入点所构成的网络”。城市密集立体覆盖网络为典型的异构网络场景,如图 1 所示。图 1(a)表示典型的高层建筑室内通信高密度异构小基站网络^[2]。此网络中主要包含蜂窝通信网络和无线局域网,网络面临的问题主要包括非对称遮挡、干扰和异网融合等,如图 1(b)所示。中继基站在此类网络中作为同网内部和同异网之间衔接的桥梁,起着增加网络覆盖、承载非对称数据交换、网络切换、提升服务质量的关键作用。

中继协作在扩展网络覆盖和提高网络可靠性上的优势十分明显,并且已经被产业界广泛应用,如 IEEE 802.16j/m 和 3GPP、LTE-Advanced 等标准都倾向于采用多载波中继协作技术来改善网络的覆盖性和可靠性。中继协作的异构网络融合是解决无线通信发展问题的一个重要突破点,以图 1 为出发点,着重分析了该异构网融合中的以下几个关键技术问题。

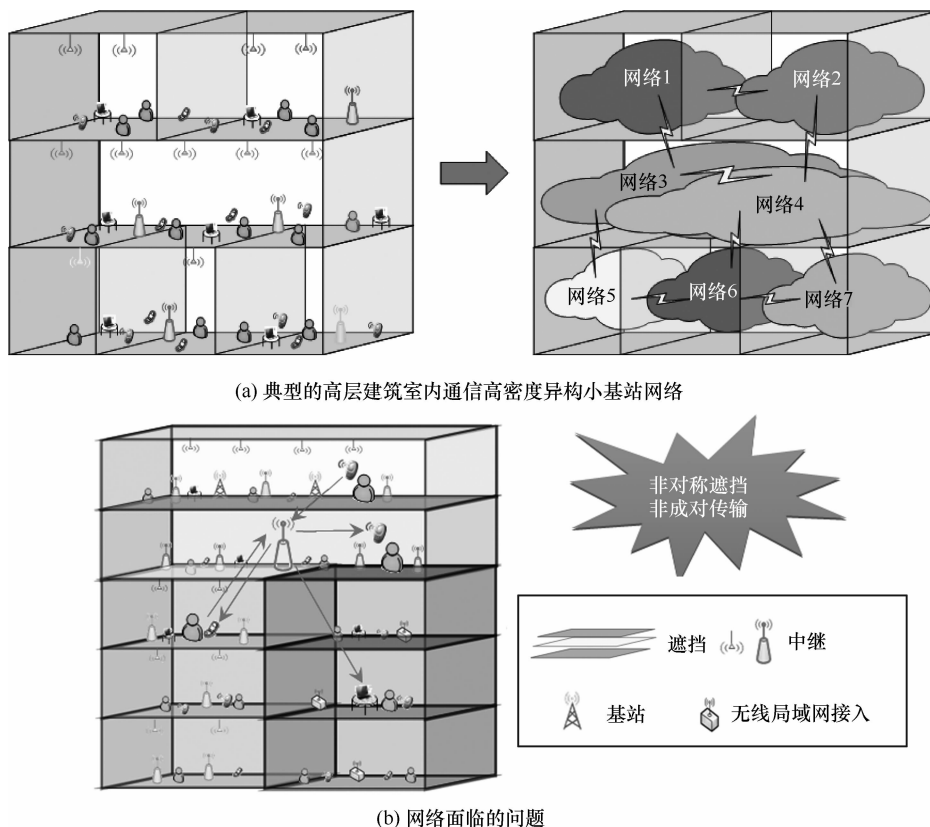


图1 高层建筑室内通信高密度异构小基站网络

- 协同中继的异构网络融合模型设计。模型设计之后才能合理地选择接口,形成可靠的商用异构无线网络。
- 异构网络间的容量低。和中继以时分双工方式轮流地进行接收和发送,牺牲了一定的传输时间资源,其容量往往低于无中继的点对点直传。
- 干扰问题十分复杂。中继会引入干扰,如基站与中继,中继之间的干扰都会降低系统性能,因此需要采用干扰抑制技术。
- 资源分配问题。异构网不同用户的业务需求不同,导致了传输速率、质量要求不同,网络资源合理配置和维护不同特性业务的传输质量等研究十分重要。
- 安全性问题。用户实现异构无线网络条件下信息的安全传输,其前提条件是必须先在异构无线网络中实现鉴权、认证、安全,而无线网络自身存在安全缺陷,和异构无线网络互联时产生安全问题。
- 环境感知、抗衰落和服务质量问题。为了降低部署难度以及提升系统的整体性能,中继节点需要具有自适应功能。期望中的中继应该是可以降低人工维

护成本、具备感知环境自优化、整体性能有显著提高的设备。

针对上述问题,将在第3节研究基于网络编码和协同中继技术的异构网络融合,并结合自适应调制、ARQ跨层设计、信道编码等技术,逐层递进,为上述关键技术问题提供可能的解决方案,并对相应方案进行仿真分析验证。

3 认知协同的多向中继技术

认知网络协同通信能够对周围无线环境进行感知并通过重构设备参数(调制方式、发射功率、工作频率等),使得网络吞吐量、覆盖范围、能量有效性等诸多性能显著提高。研究新的中继技术在认知协同通信上有着十分广阔的应用前景,主要提出了基于网络编码的中继技术在双向/多向中继中的资源分配优化方案:首先分析了网络编码技术结合中继有效提升网络的覆盖性和可靠性,然后分析了结合自适应技术、ARQ技术、信道编码技术的网络编码调制方案,相应解决抗衰落、服务质量、吞吐量问题,为第2节的技术问题提供可能的解决方案。

网络编码(network coding)最早由 Ahlewe R 和 Yeung

R W 等人提出,其基本思想是网络节点不仅参与数据转发,还参与数据处理,从而大幅提高网络传输的效率、容量和顽健性。认知协同中继通信的核心思想是:无线网络利用多个中继节点完成源节点与目的节点间的通信。多向中继网络的转发方式有解码转发(DF)和放大转发(AF),基于中继的网络编码由于需要在节点对数据进行解码和从新编码获得编码增益,因此采用 DF 方式,以最基本的三时隙 DF 双向中继(DF-TWR)模型为基础,如图 2 所示。包含一个中继节点和两用户,分时隙传输,在第一、二时隙两用户分别将信息传输至中继节点,中继节点对其进行解码和网络编码,在第三时隙将信息广播至两用户,最后用户节点利用自己原有的先验信息解调出来其需要的信息。

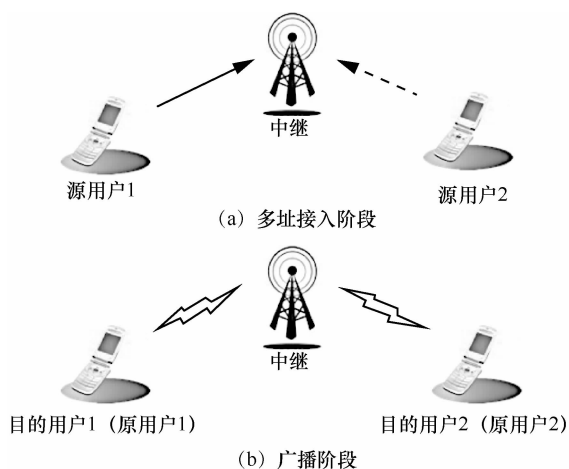


图2 三时隙解码转发双向中继模型

3.1 异构网的双/多向中继技术

两用户单中继模型是最基本的中继场景模型,在用户密集的实际场景中,往往难以布置太多中继节点,因此基本模型的应用在用户数相对较少的场景能够应对,而在密集区域的应用有限。以两用户双向中继为基础,此模型进一步可扩展为多对用户的双向中继模型,参考文献[3]通过采用盖尔芳德平斯克编码和网络编码相结合,解决了多个成对用户的信息互传问题,参考文献[4]进一步研究了三用户的多向中继网络编码技术。由此可见,基于协同中继的网络编码技术能够很好地解决异构密集网络中的覆盖问题。

异构网络的特点决定了用户业务数据流往往是不对等的,如视频流需要的速度和连续性要高,而语音服务对速率要求低但对 QoS 要求高。网络编码调制技术的引入能够很好地解决非对称传输问题^[5],从而将异构网络的信息

交换简化为在同一中继节点对数据流和数据分组的操作,实现基本的融合。

3.2 网络编码的安全性和干扰消除

有研究认为,基于先验信息的网络编码可能引发对安全的担忧,由于窃听的存在可能导致用户信息泄露^[6]。美国麻省理工学院的 Medard 教授在研究网络编码时提出,网络编码在执行过程中能够有效地伪装和承载数据,实际上增强了信息的安全性,相比在网络上传输不可破译的算法流的传统加密技术更安全。数据分组在进行混合时,本身就具备了数据隐藏功能,具有先验信息的合法用户才能通过反操作得到期望信息。此外,网络编码技术还能在点对点(P2P)传输中检测恶意攻击,并纠正错误。

干扰消除技术有基于干扰重构/减去技术和干扰抑制合并接收技术。基于网络编码的协同通信技术允许中继节点对经过它的数据进行解码和网络编码,因而能够进行干扰消除技术研究,比如基于 IDMA 的迭代干扰消除技术。参考文献[5]提出的基于欧式距离的最大比合并接收(MRC)技术是接收机实现技术,能够提升干扰消除效果。

3.3 自适应网络编码调制(ANCM)

异构无线网络的动态特性和用户业务需求意味着不同网络面临的通信环境相差可能很大,现有的协议和应用不灵活,容易导致资源利用率低下。自适应技术能够根据信道状态动态地调整传输速率、发送功率、编码方式等,充分地利用现有网络资源,达到系统容量最大、功耗最小等目标。

在图2所示系统模型的基础上,基于参考文献[5]所提出的网络编码调制(network coded modulation, NCM)和参考文献[7,8]提出的自适应调制编码(adaptive modulation and coding, AMC),提出联合功率—速率可变的网络编码调制^[9],对下行衰落信道的信道容量进行了研究,并通过仿真验证了系统的性能。

图3给出了自适应网络编码调制的信道模型,参考文献[9]提出了速率连续功率连续的 NCM 方案,并给出了其衰落信道下可达容量的解析解,进一步提出了离散速率可变功率的 NCM 方案,由于离散优化问题难以得到闭式解,提出次优搜索算法,并仿真验证得到其信道容量。从图4和图5(QAM 调制方案)可以看出,基于中继的自适应网络编码方案^[9]与点对点传输方案^[7]的信道容量的差别几乎可以忽略不计,且和固定功率的自适应方案相比,其容量更高,尤其在低信噪比条件下。AMC 和 NCM 结合方案能够有效解决资源分配问题和提高频谱利用率。

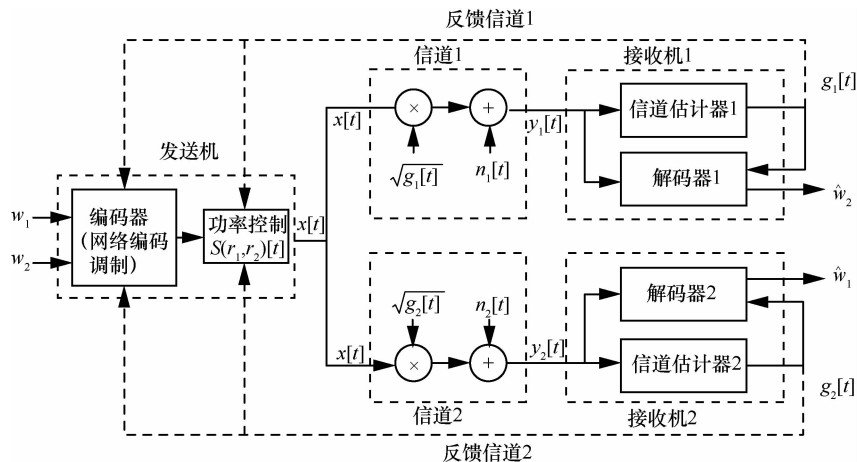


图3 自适应网络编码调制系统和信道模型

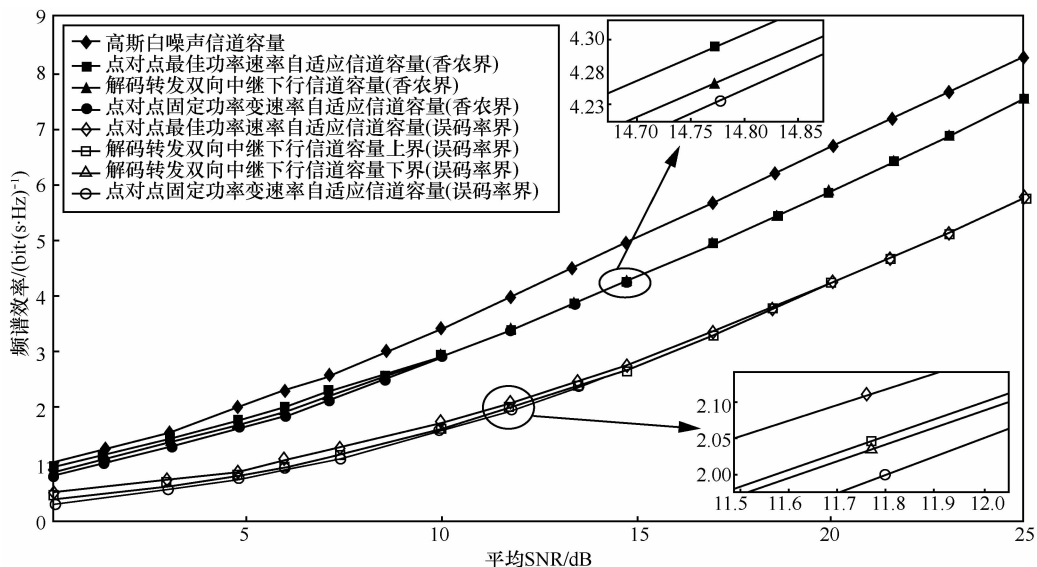


图4 自适应QAM网络编码调制(连续速率)

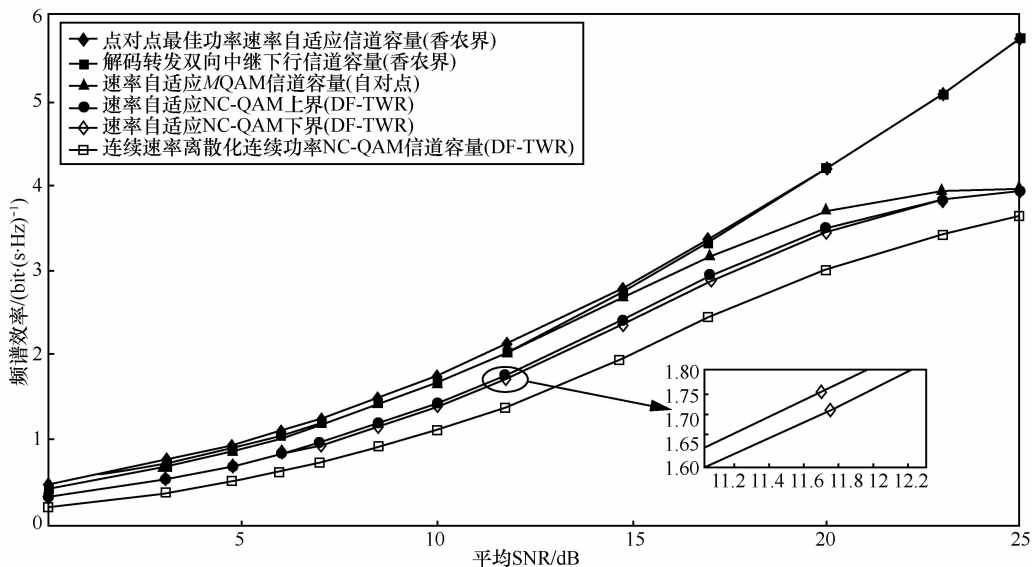


图5 自适应QAM网络编码调制(离散速率)

3.4 结合 ANCM 和 ARQ 的跨层设计研究

自适应调制编码技术灵活多变,对于衰落信道的适应能力强,然而实际应用中容易受到信道估计误差和时延的影响。在之前所研究的自适应网络编码调制中,所采用的假设与参考文献[7,8]中类似,即假设了信道估计误差为 0、时延为 0,而这在实际中需要强纠错机制来实现,实用性有所降低。另一方面,无线通信系统中,用户对数据速率和服务质量(QoS)的要求在不断提升,自动重传请求(ARQ)对信道测量误差和时延不敏感,而且可以在保证系统可靠性的前提下,提高系统的吞吐量^[10],因此结合 AMC 和 ARQ 的

链路自适应技术能够进一步改善系统的整体性能。参考文献[11]创新性地提出了 AMC-ARQ 的跨层设计,其性能优于 AMC 系统的性能和采用固定编码的 ARQ 系统的性能。

基于 Goldsmith 在参考文献[12]中提出的自适应调制方案和 Liu 等在参考文献[11]中提出的跨层设计,提出一种自适应网络编码—ARQ 结合的跨层设计方案,其网络结构如图 6 所示,并通过仿真证明了系统性能能够进一步提升,仿真结果如图 7 所示。

3.5 结合 TCM/Turbo 和 ANCM 的编码调制

传统的数字传输系统需要通过纠错编码来提高信息

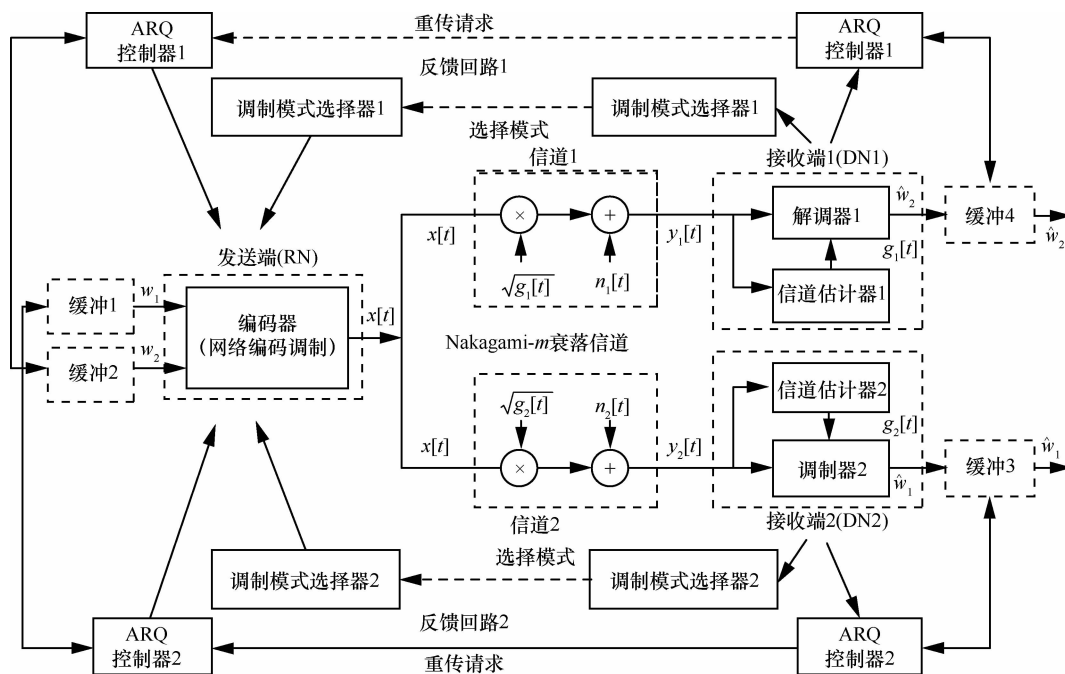


图 6 自适应网络编码-ARQ 系统信道模型

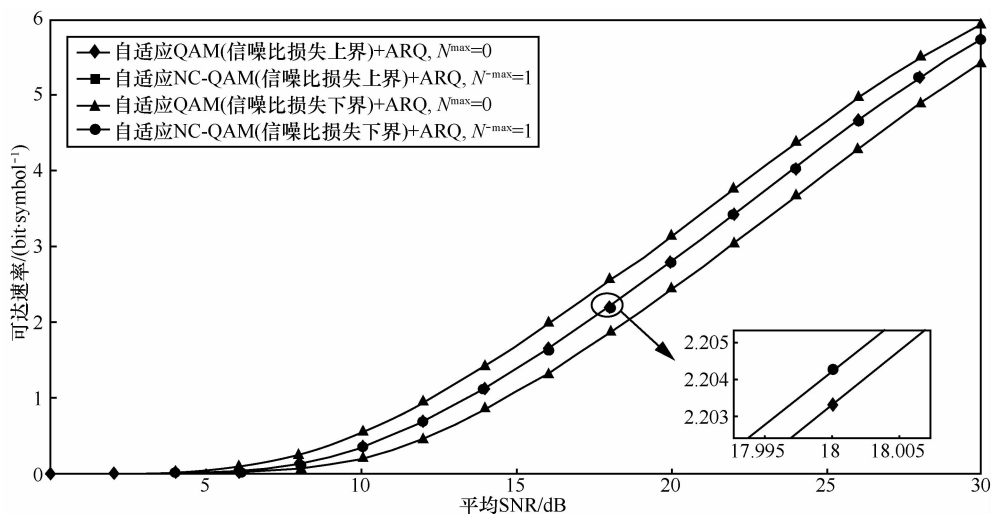


图 7 截断式 ARQ 自适应网络编码可达速率

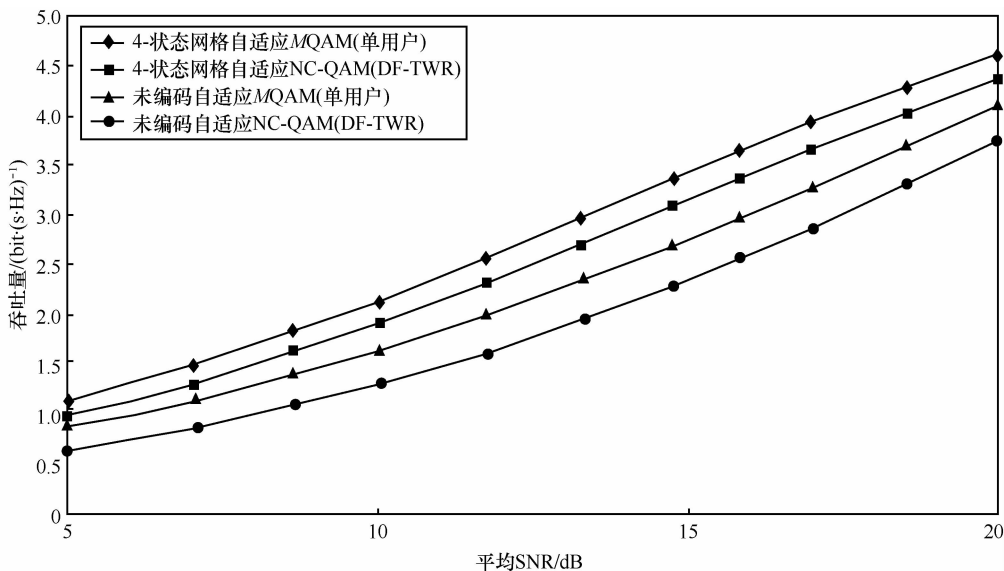


图8 自适应TCM—网络编码调制的可达速率(MQAM, $M=\{0\ 4\ 16\ 64\}$, $\omega=0.5$, $\text{BER}=10^{-3}$)

传输的可靠性,而纠错编码会带来频带利用率的下降,为了提高频带利用率,同时也希望在不增加信道传输带宽的前提下降低差错率,提出将编码和调制结合设计的方法,即网格编码调制(TCM),这种方法以牺牲设备的复杂化为代价换取编码增益。Turbo 是 Berrou C 等人在 1993 年首次提出的一种级联码。基本原理是编码器通过交织器把两个分量编码器进行并行级联,两个分量编码器分别输出相应的校验位比特;译码器在两个分量译码器之间进行迭代译码,分量译码器之间传递去掉正反馈的外信息,这个方法称为 Turbo 码。Turbo 码具有卓越的纠错性能,性能接近香农限,而且编译码的复杂度不高。

参考文献[13]提出了自适应信道编码的一般模型,参考文献[14]提出了自适应 Turbo 编码,两种方案均极大地提升了点对点网络的性能。基于上述两种方案,分别提出了结合 TCM 和 Turbo 的自适应网络编码调制方案,以获得更大的编码增益,由于 TCM 码和 Turbo 码具有很强的纠错性能,结合方案能够极大提升衰落信道下的网络传输效率,同时保证信息传输的可靠性。图 8 分析验证了信道编码对系统性能的提升。

4 基于多向中继的蜂窝网和 WLAN 融合

从上述协同多向中继技术方案中不难看出,协同中继在提升网络容量、自适应自组织、抗干扰抗衰落、提升 QoS 方面有着巨大的发展前景。首先分析了异网融合和蜂窝网增强覆盖技术,总结小蜂窝网和中继的优缺点,然后

提出了以认知协同中继替代小蜂窝基站来作为蜂窝网和 WLAN 融合的方案,并尝试分析了融合的可行性和关键问题。

蜂窝网络目前仍是移动通信的主流硬件架构,而蜂窝网作为无线网络覆盖(GSM/3G/LTE 等)的基本形式,依旧存在边缘区域通信质量差和阴影区域覆盖问题。面向进一步提高网络容量和边缘覆盖的要求,研究具备认知能力的宏基站或/和多种小站(小蜂窝基站、家庭基站、WLAN)共存的方案是目前研究的热点,图 9 给出了协同中继在拓展网络覆盖和异构网络融合上的示意。各用户网络通过中继协作通信实现互补,在宏蜂窝基站实现对中继节点进行资源管理优化。

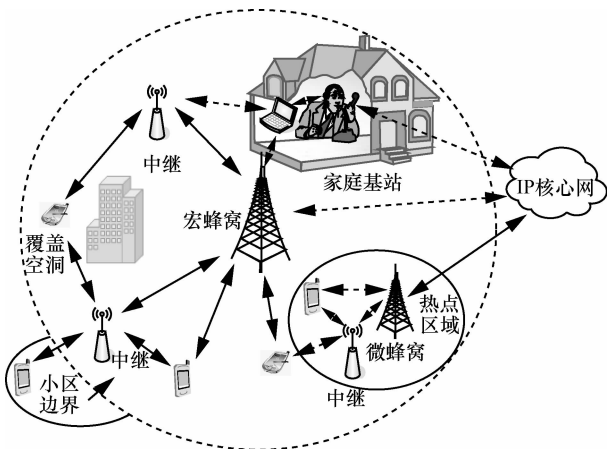


图9 基于协同多向中继的蜂窝网络异构覆盖场景

表 1 对比了作为增强蜂窝覆盖实现异网融合的可能方案。可以看到,协同中继技术方法能够很好地服务于异构网络融合。基于网络编码的认知协同中继设计思路,通过智能管理和自适应资源优化,能够弥补网络容量的不足,同时能够有效消除干扰。提出以认知中继作为宏蜂窝网络的重要附加方案,实现异构网络融合,其融合网络场景可包含宏基站、家庭基站、微基站和无线局域网。认知异构网络中基于认知感知能力和中继协作保证了各种无线网络共存、相互补充、协同工作、支持终端无缝移动的异构融合网络,必将有效地利用各种无线网络的接入技术和各自的优势以取长补短、融合地为用户提供高质量的服务体验。

4.1 蜂窝网和 WLAN 融合分析

从 IEEE 802.11 标准颁布以来,由其演变的各种 Wi-Fi 标准和设备具有可移动性、传输速度快、成本低廉、提供更丰富多彩的高带宽业务等特性,得到广泛的关注和应用,IEEE 802.11 系列标准已经成为事实上的无线局域网技术标准。认知 Wi-Fi 2.0 网络是基于认知无线电技术,工作于授权频段的类似于传统 Wi-Fi 系统的无线局域网。它利用授权频段的良好传播特性,为用户提供更好的服务以及更大的覆盖范围。在总结上述蜂窝网和 Wi-Fi 技术的基础上,参考文献[15]提出了基于认知的异构蜂窝网络和无线局域网的认知融合网络,能够充分挖掘异构频谱资源,发挥其授权频段和非授权频段的效益。与此同时,此异构融合网络也面临着前所未有的复杂干扰问题,网络中不同节点间干扰主要有以下原因。

- 部署难以统一规划。WLAN 往往由用户自行随机部署,使用时间自由,开关随意,而运营商难以管理此类网络。
- 接入限制不统一。部分无线局域网由于某些原因对用户接入限制,宏基站往往有可能因为受限而无法

接入,反而由于资源频段相近受到干扰。

- 功率差异相对较大。宏基站与低功率节点(WLAN)由于发射功率相差大,业务负载往往分布不均衡。
- 上下行链路的层间干扰严重。

解决蜂窝网和 WLAN 融合的关键在于构建认知资源管理机制,要求管理决策能够实现以下方面:自主资源决策实现网络层间和层内干扰的有效抑制;宏基站用户和 WLAN 用户有高效资源保障,满足 QoS 要求;实现有效资源的快速探测和高效利用。

4.2 结合网络编码的异构网络融合

根据对蜂窝网和 WLAN 融合的分析,对以网络编码技术为基础的中继方案分析其可行性。链路层以上网络融合的管理机制和控制技术在许多文献中有所研究,参考文献[16]研究了 3G 与 Wi-Fi 网络融合的方案。而从物理层技术角度出发,研究基于网络编码的协同中继技术来解决蜂窝与 WLAN 融合的关键问题是可行的,具体如下。

- 易于宏基站的管理,增加中继节点自组网和接入机制的研究能够有效解决 WLAN 难以统一的问题,参考文献[17]对负载均衡的异构网络接入选择和业务转移做了详细研究。
- 参考文献[18]利用盲自适应频移滤波器的结构,提出了异构网络中 TDD 蜂窝和 Ad Hoc 网络信号互干扰抑制方案;参考文献[19]系统研究了异构网络资源分配和干扰抑制的分布式资源分配方法,尤其研究了基于功率优化的资源分配算法,有利于解决异网设备功率差异大导致的干扰问题。
- 参考文献 [17] 所提出的异构网络动态负载均衡方案,能够根据接入选择方案把接入任务均衡地分配到各个中继基站中,在接入阻塞率、切换掉线率、负载均衡性、系统利用率上提升系统性能,可以作为

表 1 异构网络融合中微基站、家庭基站、中继基站优缺点对比

基站	优点	缺点
微基站、微微基站	运营商部署、可部署密度高、开放式基站、网络容量提升快、低功率、覆盖范围几十米到几百米	城市中部署运营商需应对多种类型通信设备及考虑基站安装位置,需额外配备光纤或微波回路;户外公共区域部署必须解决和宏蜂窝的网络干扰问题;运营商需要在网络中持续监控和调整配置,以满足用户流量需求
家庭基站	低成本、低功率、能有效提升网络容量、用户部署、覆盖范围一般小于 100 m	封闭式基站,用户部署自由度大,运营商难以统一管理,干扰问题还不能得到有效解决
普通中继基站	运营商部署方便、易实现完全覆盖、覆盖性可靠性高、成本低廉、覆盖范围几十米到上千米	网络容量提升有限、异网间的干扰问题较大
协同中继基站	适合异构组网、实现资源自适应管理、容易实现宏基站控制、有效提升资源利用率、网络容量提升空间大、抗干扰能力强	设计复杂度高、硬件成本相应提升



辅助的负载均衡策略。

- 基于中继的网络编码采用时分传输,因此能够避免上下行链路干扰。

上述分析从部分角度加以研究,尝试性地给出一些可能的解决方案。异构融合网络中用户环境的多变性、网络环境的异构性和业务环境的多样性,真正实现异构网络融合仍存在不少问题需要解决,此协同中继异构网融合方案有着广阔的发展潜力。

5 结束语

在城市密集立体化、业务海量化的通信发展形式下,各种无线网络规模大、覆盖广、构成复杂、业务种类及服务要求多样,且各个网络的特征与结构、协议与设计方法以及物理层技术均呈现异构化倾向,异构网络融合已是大势所趋。如何探索实用的技术来解决异构网络融合问题,进一步提升网络的资源利用率,是无线与移动通信领域尚待解决的重要问题。

分析了这种趋势下一种可有效提升频谱利用率的网络融合方案——基于中继的异构协同网络,该方案以中继为基础构架,以网络编码为核心技术,利用自适应调制、ARQ以及高效信道编码来改善中继技术的短板,从而提高了系统的可靠性、吞吐量和干扰消除。结合实际的蜂窝网络和无线局域网,对此异构网的融合进行了初步分析,尝试性地总结和论述了基于网络编码的中继技术在融合中的可行性和研究进展。异构网络融合的相关研究目前尚处于起步阶段,网络编码技术、协同中继技术等将在未来的通信网络中融为一体,同时也将面临着巨大的技术挑战,对异构网络融合的基础理论和关键技术进行深入研究,必将推动多制式、一体化、智能化移动通信网络的技术创新,为未来无线城市网络的建设提供关键支撑。

参考文献

- Landström S, Furuskär A, Johansson K, *et al.* Heterogeneous networks-increasing cellular capacity. The Data Boom: Opportunities and Challenges, 2011(4)
- 陈巍, 王东明, 王家恒等. 密集立体覆盖: 未来移动通信的机遇和挑战. 电信科学, 2013, 29(6)
Chen W, Wang D M, Wang J H, *et al.* 3-dimensional dense coverage: opportunities and challenges for future mobile communications. Telecommunications Science, 2013, 29(6)
- Sima J, Chen W. Joint network and Gelfand-Pinsker coding for 3-receiver gaussian broadcast channels with receiver message side information. Proceedings of IEEE Int Symp Inform Theory(ISIT), HA, USA, 2014: 81~85
- Sima J, Chen W. Joint network and dirty-paper coding for multi-way relay networks with pairwise information exchange. Proceedings of IEEE Global Commun Conf, TX, USA, 2014: 1565~1570
- Chen W, Cao Z, Hanzo L. Maximum euclidean distance network coded modulation for asymmetric decode-and-forward two-way relaying. IET Communications, 2013, 7(10): 2179~2184
- Wang D, Bai B, Chen W, *et al.* Energy efficient secure communication over decode-and-forward relay channels. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(3): 892~905
- Goldsmith A J, Soon-Ghee C. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels. IEEE Transactions on Communications, 1997, 25(3): 1218~1230
- Hanzo L. Quadrature Amplitude Modulation: From Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MC-CDMA Systems. NewYork: Wiley, IEEE Press, 2004.
- Yang Y, Chen W, Li O, *et al.* Variable-rate, variable- power network-coded-QAM/PSK for bi-directional relaying over fading channels. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(10): 3631~3643
- 夏玮玮, 沈连丰. 异构网络融合中的 QoS 与通信容量研究. 中兴通讯技术, 2008, 14(3): 5~8
Xia W W, Shen L F. QoS and communications capacity in heterogeneous networks convergence. ZTE Communications, 2008, 14(3): 5~8
- Liu Q W, Zhou S L, Giannakis G B. Cross-layer combining of adaptive modulation and coding with truncated ARQ over wireless links. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(5): 1746~1755
- Goldsmith A J, Soon-Ghee C. Adaptive coded modulation for fading channels. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(5): 595~602
- Goldsmith A. Wireless Communications. London: Cambridge University Press, 2005
- Sriram V, Goldsmith A. Adaptive turbo-coded modulation for flat-fading channels. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(6): 964~972
- 3GPP RWS-120010. Requirements, Candidate Solutions & Technology Roadmap for LTE Rel-12 Onward, 2012
- 3GPP TR 22934 V6.2.0. Feasibility Study on 3GPP System to Wireless Local Area Network(WLAN) Interworking (Release 6), 2013
- 朱思峰, 沈连丰, 柴争义. 基于接入选择和业务转移的异构网络动态负载均衡机制. 高技术通讯, 2014(10): 1007~1013
Zhu S F, Shen L F, Chai Z Y. A dynamic load balance for

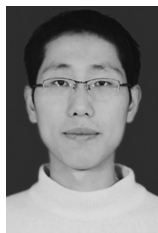
heterogeneous wireless networks based on access selection and calls transfer. Chinese High Technology Letters, 2014(10): 1007~1013

- 18 吴名, 黄琳, 鲍煦等. 一种新的异构网络互干扰抑制方案及其收敛性分析. 全国第十三届微波集成电路与移动通信学术会议, 杭州, 2010

Wu M, Huang L, Bao X, *et al.* A new mutual interference suppression scheme for heterogeneous networks and its convergence analysis. Proceedings of the 13th National Microwave Integrated Circuit and Mobile Communication Academic Conference, Hangzhou, China, 2010

- 19 Liu J, Kawamoto Y, Nishiyama H, *et al.* Device-to-device communications achieve efficient load balancing in LTE-Advanced networks. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(2): 57~65

[作者简介]



杨延平,男,国家数字交换系统工程技术研究中心博士生,现就读于清华大学电子系认知与协同通信实验室,主要研究方向为无线认知通信、网络编码、自适应调制,参与国家“973”计划项目“密集立体覆盖移动通信的基础理论与方法”,已发表论文 IEEE TCOM 1 篇、IEEE ICC 1 篇。



陈巍,男,博士,清华大学教授、博士生导师,电子工程系教学委员会主任、系务会成员,主要研究方向为无线通信、信息论与网络理论,主持国家“973”计划青年科学家专题项目、国家自然科学基金优秀青年科学基金项目、国家科技重大专项和教育部自主科研项目等 10 余项;已发表论文 130 余篇,其中被 SCI/EI 检索 100 余篇。



珂珂,女,博士,国家数字交换系统工程技术研究中心讲师,主要研究方向为认知通信、无线自组网、异构网络融合、无线网络安全。



李鸥,男,国家数字交换系统工程技术研究中心教授、博士生导师,主要研究方向为无线通信、无线传感器网络、无线自组网和无线认知网络等,已发表论文 60 多篇。