



专题:分层异构无线网络

分层异构网络无线资源管理技术探讨^{*}

田 峰,刘翰焘,周 亮

(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

摘 要:随着通信技术的不断发展,用户随时随地获得高质量无线业务体验的需求造成网络的分层异构覆盖特征越来越明显。对分层异构网络中的无线资源管理关键技术进行了探讨,利用无线资源管理技术可以极大地提高分层异构无线网络环境下的传输速率并节约能量。

关键词:分层异构网络;无线资源管理;协同;性能优化

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.06.005

Research on Radio Resource Management for Hierarchical Heterogeneous Wireless Network

Tian Feng, Liu Hantao, Zhou Liang

(College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: With the development of communication technology, the hierarchical heterogeneous characters of coverage in networks become more and more clear, which is caused by the need of high quality for wireless applications to users. By the exploration of the radio resource management for heterogeneous hierarchical wireless network, the key techniques were demonstrated which could significantly improve the transmission rate and reduce the energy cost.

Key words: hierarchical heterogeneous wireless network, radio resource management, cooperation, performance optimization

1 分层异构无线网络的定义

随着社会的不断进步和通信技术的高速发展,人类跨入无处不在的移动互联网时代,无线网络的容量需求、频谱需求和能效需求等快速增长。无线网络中继、小小区、家庭基站、终端直通等技术不断被提出,以满足用户随时随地、零时延地获得高质量无线业务体验的需求,从而造成网络的分层异构覆盖特征越来越明显。通过改变现存网络结构,解决用户对流量的渴求,构建覆盖、频段、制式分

层的立体分层异构网络^[1,2],已经成为运营商和用户业务体验的必然选择。异种分层网络通过多模、多无线电、多频、多扇区等技术手段,有效保证单个基站向超宽带方向演进;同时,通过在宏蜂窝网络层中布放大量低功率的微蜂窝基站,重用系统已有频谱资源,提高频谱利用率,保证超宽带无处不在,为小区中心及边缘用户提供一致的业务体验,满足用户的零等待需求,帮助运营商提升网络竞争力,实现商业成功。立体分层异构无线网络场景如图1所示。但是分层异构技术在为人们提供机动灵活的业务服务的

^{*} 国家自然科学基金资助项目(No. 61201165, No. 61001077),江苏省博士后科研基金资助项目(No. 1201031C),江苏省“青蓝工程”基金资助项目

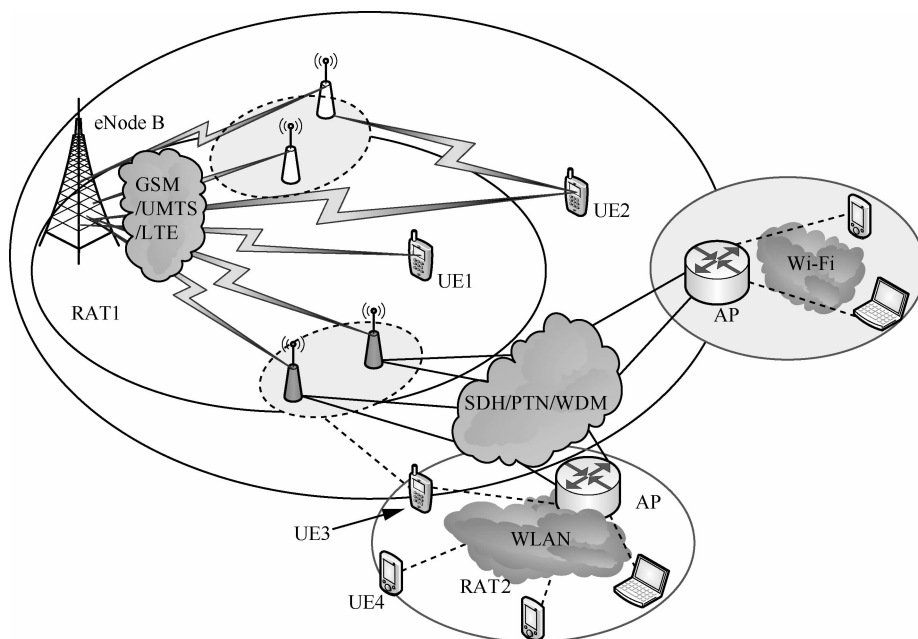


图1 立体分层异构无线网络场景

同时,也带来了一些问题,如不同用户业务质量要求不同,用户行为复杂多样,频谱资源日益匮乏,能量消耗增多和干扰形态复杂多变等。这些问题导致网络资源能效利用率低下,严重影响无线网络的可持续发展,如何提高异构网络环境下资源管理的传输速率(频谱高效)并节约能量(能量高效),是未来急需解决的问题。

2 分层异构无线网络的关键技术

为解决上述问题,分层异构网络采用随机组网、分层多播、移动性管理、分层无线资源管理等关键技术实现异构网络的协同与融合,其中协同无线资源管理是核心关键技术,包括异构无线信号协同处理、异构传输链路间协同、异构网络间协同等,体现在无线资源管理的各个方面,需要使用先进的跨层技术实现无线资源管理的性能优化。立体分层异构网络架构的物理层及媒体接入层主要讨论分层多播传输、协作中继配置、分层无线资源管理等问题;同时,认知无线电和多跳自组织网络将会对立体分层异构网络的架构产生巨大的影响。

基于虚拟小区的分层异构无线随机组网方案,核心是控制平面与用户平面分离,通过令虚拟小区使用较高频段,得到高的系统容量,并且能够满足包括移动性支持、网络部署密度、业务均衡处理和网络复杂度等在内的一系列设计要求^[3]。因此,虚拟化分层组网可提高频谱利用率和系统容量。

对于异构无线网络中的分层多播问题与解决方案,可根据数据分层的特点,从可扩展性、公平性和速率调整粒度等方面对方案进行综合评估。方案将分层多播的设计过程分为层次组织、层速率分配和确定实施主体3个阶段,并据此将现有算法分为累加层与非累加层、静态分层和动态分层、端到端和路由器支持3类,进行了深入的分析和比较,并给出了动态分层、控制不良行为者、稀疏环境和无线网络中的分层多播等研究趋势^[4]。因此,通过分层多播可提高异构无线系统的可扩展性和公平性。

异构无线网络中的移动性管理问题,是通过确定主机标识查找到随机移动的终端的当前位置,以向其传递数据或呼叫,并在其整个移动过程中保持通信的连续性。对于未来的移动性管理技术,为了支持异构分层的网络环境、支持用户跨异构接入技术的漫游和移动,其关键控制功能应包括:安全机制、位置管理、切换控制和互操作控制^[5]。因此,通过移动性管理可保持通信的连续性。

异构网络中协同无线资源管理技术不仅指无线频谱的分配,还包括对无线网络中的其他资源,如移动用户的接入权限、信道编码、发射功率、连接模式等的管理。相比于传统无线资源管理,异构协同无线资源管理则是针对所有异构网络的控制机制的集合。通过应用多种接入技术,如可重配置或者多模终端技术,支持智能的呼叫和会话接纳控制,支持业务、功率的分布式处理,实现无线资源的优化使用和系统容量最大化的目标^[6]。异构协同无线资源管理涵盖了原



有无线资源管理的各项功能。因此,通过无线资源管理不仅可获得较高的传输速率,而且可以节约能量。

基于认知网络技术的异构融合,已经成为保障异构环境下实现端到端智能通信的重要研究方向,也是研究认知异构无线网络架构的基本出发点^[7]。结合异构无线网络和认知网络的特性,建立面向未来的新型认知异构无线网络架构,可提高无线频谱资源利用率最大化时的系统容量。

3 分层异构无线网络的无线资源管理

不同类型、不同层次、相互重叠覆盖的各种无线通信网络要融合到一起协同工作,形成一个统一的异构无线系统。分层异构无线资源管理技术是无线通信系统中的关键技术和研究热点,用于实现无线资源的利用并平衡不同用户的业务需要和业务体验。它涉及的研究内容很广泛,包含呼叫接入选择与控制、切换控制、小区层选、负载控制、功率控制、分组调度、容量分析和协同无线资源管理等领域。

3.1 呼叫接入选择与控制技术

呼叫接入选择与控制是分层异构网络中无线资源管理的一个重要组成部分,依据一定的准则决定到达的呼叫请求是允许接入或拒绝接入,以实现接入选择和控制。呼叫接入选择与控制考虑的是如何能在复杂的场景下,实现最佳的系统利用率,并为用户提供最好的 QoS。

接入选择算法为了充分挖掘并且综合利用异构无线网络中的集群增益和多接入分集增益,必须为每个多模终端中的每个应用进行合理的接入选择^[8]。接入选择与控制的结合在异构无线网络的无线资源管理模块中构成了密切相关的管理功能。当异构无线网络中采用集中式算法进行接入选择时,可以很方便地将准入控制与接入选择过程结合在一起;但对于采用分布式接入选择的异构无线网络而言,终端在进行接入选择的过程中往往无法预知自己的接入选择决策是否能够被目标系统中的接入控制模块所接受,如果终端的接入请求被目标系统拒绝,终端就不得不重新进行接入选择,因而会增大整个垂直切换过程的时延。

呼叫接入控制可分为本地方案和协作方案^[9]。本地方案在采取接入决策时仅使用自己本地的信息,而在异构分层网络中,协作接入控制不仅要考虑本地信息,同时也要考虑来自其他小区的信息。在本地小区,当有新建呼叫请求接入时,本地小区会与其他一系列将会参与呼叫接入控制的其他小区进行通信。小区集群的构建方式、信息转换

方式和信息的使用方式决定不同的接入控制方案。

对异构分层无线系统中的各种呼叫溢出技术进行了统一的理论分析,并在建立的实际移动模型基础上对双向溢出呼叫接入控制方法进行了改进,兼顾了呼叫移动速度和小区覆盖面积^[10]。研究表明,快速和慢速呼叫双向溢出方法能够获得最大的信道利用率、最低的新呼叫阻塞率和切换呼叫掉线率。

由此可见,从分层异构的特点出发,根据异构小区的构建方式、各小区信息及其转换方式和使用方式可以设计不同的准则,设计分布式或集中式呼叫接入选择与控制方案,最大限度地提高信道利用率并减小阻塞和掉线。

3.2 路由选择与控制技术

路由选择是分层异构网络中无线资源管理的一个重要组成部分。分层异构网络体系设计应根据周围网络环境的变化(覆盖分层、频段分层、制式分层)进行自适应控制,并通过各节点、网络域和各协议层之间的协同,实现跨域、跨层、跨节点的实时业务 QoS 路由选择。

基于协作的异构多无线电无线 mesh 系统路由设计模型^[11],如图 2 所示,该路由协议模型按路由发现过程,分为 4 个子模块,分别为半同步式邻居发现机制、无线电异构刻画的路由度量、分层的信息发布模型、满足业务需求的路由算法。该路由协议模型对多无线电的异构性进行了刻画,采用分层协作方式共享网络拓扑信息。因此,考虑节点周围网络环境的变化,实现分层协作控制是设计路由技术的关键。

3.3 切换技术

切换是无线移动通信系统特有的、最重要的功能之一。用户在异构分层网络中不同网络之间的移动称为垂直

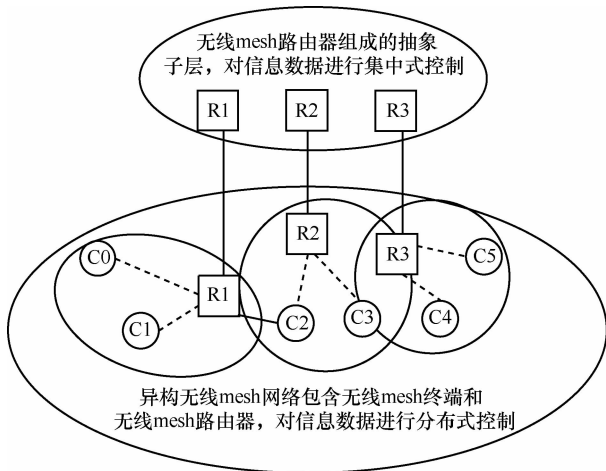


图2 异构无线 mesh 网络双层信息分布模型

移动,实现无缝垂直移动的最大挑战在于垂直切换。垂直切换就是在移动终端改变接入点时保持用户持续通信的过程。

针对异构分层无线网络,可实现保证业务 QoS 的切换策略^[12]。在充分利用层间呼叫溢出技术的基础上,提出一种基于保护信道、队列缓冲和信道侵占的切换策略。相对于只采用保护信道的方案和同时采用保护信道与队列缓冲的方案,提出的切换策略能显著降低快速和慢速实时切换业务的掉线率,同时快速和慢速非实时业务的切换性能也能得到保证。

充分利用层间协作设计垂直切换算法,可以在维持较小分组丢失率的情况下,有效地减少切换次数,消除“乒乓效应”,改善切换呼叫阻塞率,获得较好的切换性能。

3.4 流量均衡技术

流量均衡技术是指当某种类型的小区出现负载过重时,可以将其中的一些异构多模终端用户转移到流量较轻的重叠覆盖异构小区中,这样空出的资源可以供受限呼叫及其他呼叫使用,呼叫阻塞率将会减小,整个异构系统的利用率将得到提高。

针对负载控制进行了深入研究,提出了几种流量均衡算法^[10]。针对同层异构无线系统提出一种基于业务选择的流量均衡技术,采用半集中、半分布式的非周期性流量控制机制。针对异构分层无线网络提出了 3 种基于逗留时间的流量均衡算法,建立了小区逗留时间计算模型。第 1 种是基于逗留时间的流量均衡算法,第 2 种是基于逗留时间的动态流量均衡算法,第 3 种是基于逗留时间和业务的动态流量均衡算法。为进一步提高热点小区系统的信道利用率,结合信道借用和流量转移技术提出了一种混合动态流量均衡算法,该混合流量均衡算法不仅能大大降低热点小区的新呼叫阻塞概率和切换呼叫掉线率,而且整个异构系统的信道利用率比基于逗留时间动态流量均衡算法的高。

由此,充分考虑逗留时间和业务实现混合动态流量均衡,可以极大地提高整个异构系统的利用率,减小某类小区出现负载过重现象的概率。

3.5 速率和功率控制技术

无线异构网络环境下,降低系统发射功率、提高网络传输速率是无线资源管理的重要目标。异构分布式传输过程中,由于传输技术和终端发射功率的差异,信道的容量也随之不同,而某条较低的信道容量会限制整个协作传输的信道容量;而由于容量的限制,增加的某个终端节点的

发射功率也无法带来速率上的提升,反而会增大分布式传输消耗的总功率,所以根据实际情况,对异构分布式传输进行自适应调整功率分配、速率匹配和资源调度是十分有必要的。

针对异构分布式网络中中继节点的传输速率和功率控制问题,基于速率匹配的功率控制算法和多模接口融合方案^[13]如图 3 所示,算法可以通过功率控制,使得整个中继传输获得较高的速率,而且节约整个系统的能耗。无线中继节点上的功率分配对无线中继网络的性能有直接影响。

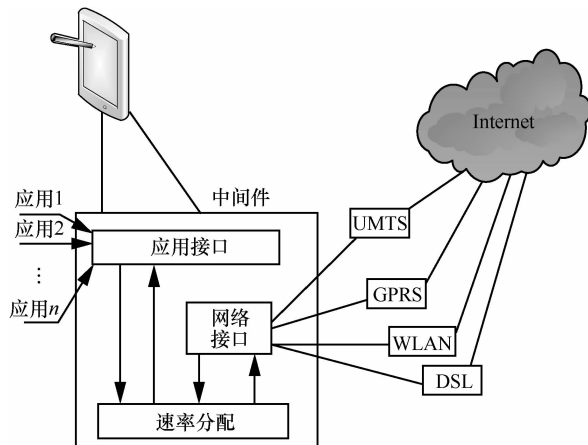


图 3 异构网络速率分配

基于协同通信和无线中继技术的融合机制^[14],以实现异构无线接入网的互联互通和融合。为了最大化所提异构协同网络方案的协同容量,从理论上给出了协同功率分配优化理论模型,并提出协同功率分配算法,该算法在合理设置发射功率保证第一跳和第二跳链路的传输速率匹配的前提下,能够优化系统性能。

基于吞吐量最大的协作速率分配、基于传输时间最短的协作速率分配、基于无线随机接入代价函数的协作速率分配、基于智能接入点 AP 的协作接入和基于势博弈的速率控制方案^[15],可以有效地提高异构网络的容量。

多信道、多无线电和多跳异构无线网络中的视频流资源调度问题可建模为凸优化问题^[16],并设计完全分布式的联合考虑信道分配、速率分配和路由的资源调度机制,使每个流在自私的最小化视频失真和全局的最小化网络拥塞之间达到一个平衡,最终实现最大限度地减少视频失真,并达到一定的公平性。

速率和功率控制是异构无线网络资源管理中的需要解决的重要问题。通过提出最大化速率、最小化功率并考虑公平性等能效或代价函数,建立最优化或博弈模型,设



计自适应集中式或分布式算法求解帕累托最优或纳什均衡解,最终可以实现异构无线网络资源管理速率和功率性能的优化。

3.6 干扰协调技术

通过改变现存网络拓扑结构,在宏蜂窝网络层中布放大量低功率的微蜂窝基站,通过认知无线电和频谱感知技术,充分利用系统已有频谱资源,提高频谱利用率,但新节点的引入改变了原有网络的拓扑结构,使这种网络结构的小区间干扰成为一个新的挑战。

分层异构无线网络干扰协调问题,通过结合作多点(coordinated multi-point, CoMP)传输技术的异构网络小区解决的方法有^[17,18]:

- 频分复用的方法;
- 波束成形的方法,如图4所示。图中缩略词分别为SFI-REQ(spatial feedback information request,空间反馈信息请求)、SFI(空间反馈信息)、RQI-REQ(resource quality information request,资源质量信息请求)、RQI(资源质量信息)、RQI-RS(resource quality information reference signal,资源质量指示信号)。
- 还可以采用跨层优化和资源调度的方法,如下:
- 子载波分配的方法;
- 功率控制的方法(如图5所示)。

通过上述方法可有效地降低异构网络间的干扰,提高频谱利用率。

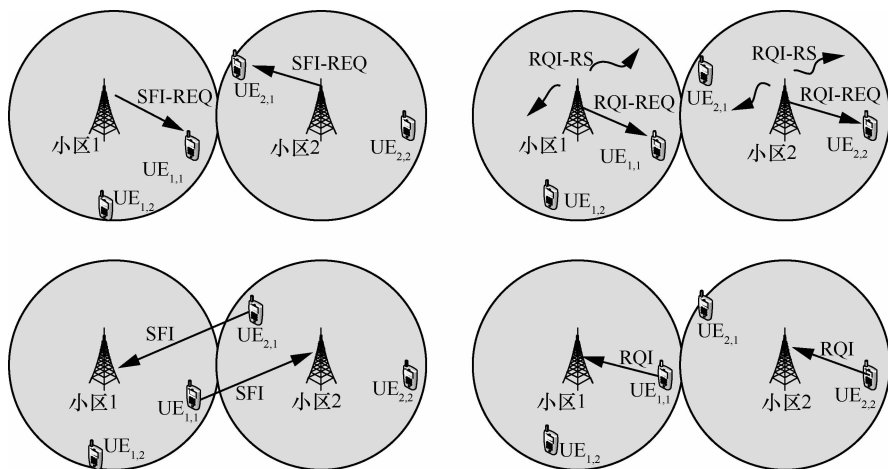


图4 CoMP 干扰协调示意

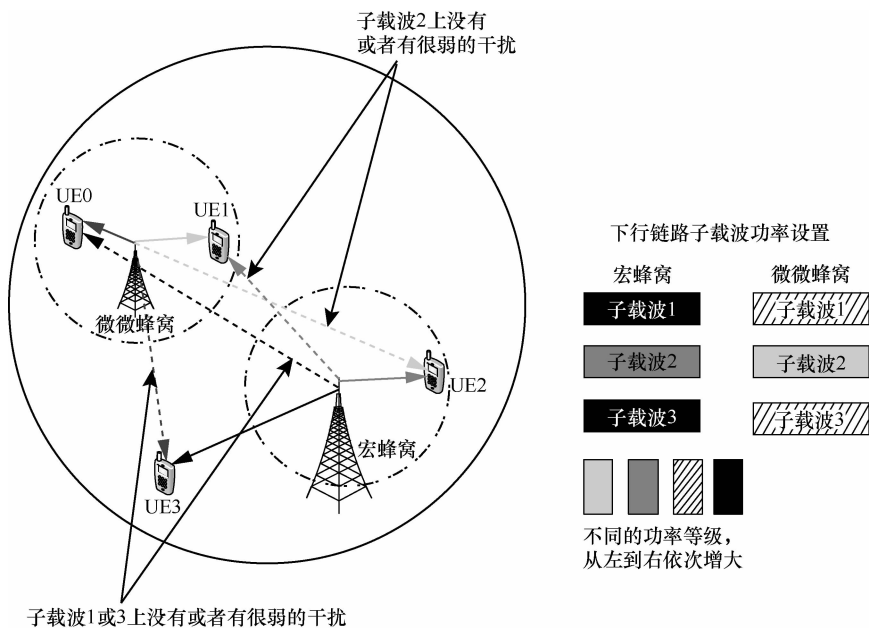


图5 功率控制的子载波在一个小区内的调度

3.7 协同无线资源管理技术

传统的无线资源管理都是利用某种核心管理模块对异构无线网络中的无线资源进行协同管理,即协同无线资源管理,通过协同无线资源管理使得原本分散在各系统中的相互独立的无线资源实现共享,有利于系统间的载荷平衡,从而产生了话务量理论中所说的集群增益。

采用多个放大重传的中继节点和解码重传中继节点构成异构中继系统,其中异构中继节点协作传输,目的节点同时接收放大重传和解码重传中继节点的信号^[9]。考虑联合编码和选择性传输作为协作异构中继传输方案,随中继节点的增加,系统性能趋于同构解码重传中继系统的性能,体现了较好的集群增益。

基于协同机理的异构无线通信机制^[10],研究了影响该异构协同通信系统分集传输性能的关键因素,从理论上给出了第二跳链路采用和不采用时间分集方案时,中断概率和协同中继节点数量、第一跳和第二跳链路的信道增益、标称功率等的关系(如图6所示)。

实际上,在异构无线网络中进行协同无线资源管理不仅仅能够产生集群增益。如果能够充分考虑每个多模终端在不同的无线接入系统中的传输效率以及终端中的每个无线应用在不同系统中的不同表现,从而将每个多模终端

中的每个应用在适当的时间连接到适当的无线接入系统中,还能够产生另一种形式的容量增益,即多接入分集增益。将集群增益效应与多接入分集效应进行对比可以发现,这两种效应的主要区别在于,无论是在独立的无线接入系统中,还是在异构无线网络中,只要能够通过某种方式实现资源共享就能够产生集群增益,而且资源共享的结果往往使得业务载荷的分布更加均匀;而多接入分集增益则是异构无线网络中所特有的效应,而且无线接入系统之间的差异性越大,分集增益效应就越明显。从上述呼叫接入选择与控制、切换、速率与功率控制和干扰协调等技术的描述中,可以看出协同无处不在,贯穿于无线资源管理的各项功能,是异构无线网络资源管理的核心关键技术。

4 结束语与展望

总之,对于无线网络的发展,容量和能效的解决(即性能优化)一直是关键所在,尤其是跨入无处不在的物联网时代,提高容量和降低能耗的需求呈非线性的高速增长,改变传统网络结构,加强节点和小区间的协同与协作,应对高速大流量的渴求,构建覆盖分层、频段分层、制式分层的立体异构网络,已经成为用户业务体验和运营商建设实施的必然之选。而立体分层异构网络的无线资源管理关键技术尚未完善,需要在无线网络的不断演进中,进一步探索研究分层异构无线资源管理的新技术,为业务的可持续发展和用户的业务体验提供坚实的保障。

参考文献

- 1 Peng M G, Liu Y, Wei D Y, *et al.* Hierarchical cooperative relay based heterogeneous networks. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(3): 48~56
- 2 张宇晨, 华为: 构建立体分层网 构建无处不在的无线网络. *通信产业报*, 2012-04-09
- 3 李玥, 彭木根. 基于虚拟小区的分层异构无线组网方案. *电信科学*, 2013, 29(1): 8~14
- 4 罗军舟, 陈晴. 异构网络中的分层多播: 问题与解决方案. *东南大学学报(自然科学版)*, 2005(6): 984~988
- 5 于黎. 异构无线网络中位置管理关键技术研究. 南京邮电大学硕士学位论文, 2011
- 6 田峰, 杨震. 基于 mesh 技术的网络融合与协同. *中兴通讯技术*, 2008, 14(3): 13~17
- 7 陈广泉. 认知异构无线网络若干关键技术研究. 北京邮电大学博士学位论文, 2011
- 8 贾会玲. 异构无线网络中的接入选择与准入控制研究. 浙江大学博士学位论文, 2007

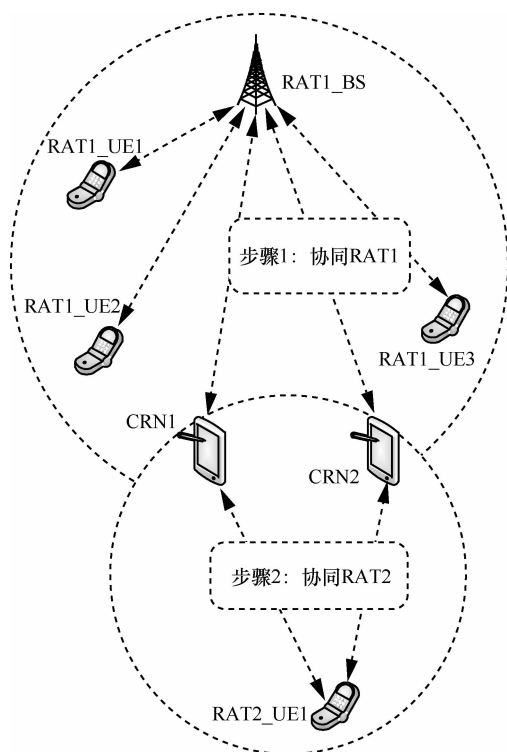


图6 异构无线通信系统的协同通信结构



- 9 吕安琪. 异构网络呼叫接入决策与控制算法研究. 南京邮电大学硕士学位论文, 2012
- 10 宁国勤. 异构无线系统中的无线资源管理技术研究. 华中科技大学博士学位论文, 2006
- 11 沈庆伟, 胡云, 杨寿保等. 多 radio 无线 mesh 网络跨层路由协议. 重庆大学学报, 2008(4): 457~463
- 12 宁国勤, 张静, 刘干等. 异构分层无线网络中基于业务 QoS 保证的切换策略研究. 计算机科学, 2010(1): 83~86
- 13 王冠男. 异构分布式网络环境的资源管理策略研究. 电子科技大学硕士学位论文, 2010
- 14 彭木根, 王文博. 异构无线通信系统的融合机制和协同功率分配算法研究. 电子与信息学报, 2009(10): 2348~2353
- 15 刘娇蛟. 异构无线网络协作接入的多速率控制. 华南理工大学博士学位论文, 2012
- 16 Zhou L, Wang X B, Tu W, *et al.* Distributed scheduling scheme for video streaming over multi-channel multi-radio multi-hop wireless networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(3): 409~419
- 17 Huang K, Lu S T, Guo J B. An optimized cooperative transmission scheme for interference mitigation in heterogeneous downlink network. Proceedings of 2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Québec City, Canada, 2012
- 18 苗小康, 沈嘉, 宋令阳等. 分层异构无线网络干扰协调——挑战 and 应对. 移动通信, 2009(24): 63~67
- 19 Jeong M K, Hwang S G, Kim D, *et al.* Performance analysis of cooperative communication with heterogeneous relays. Proceedings of 2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Toronto, Canada,

2011: 1104~1108

- 20 彭木根, 王文博, 张倩倩等. 异构无线通信系统的协同分集性能研究. 电子学报, 2009(1): 21~25

[作者简介]



田峰, 男, 博士, 南京邮电大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线通信与网络信号处理。



刘翰焘, 男, 南京邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为无线通信与信号处理技术。



周亮, 男, 博士, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线多媒体通信、体域网和车载通信等。

(收稿日期: 2013-05-14)

(上接第 16 页)

- 6 Wang F, Song L, Han Z, *et al.* Joint scheduling and resource allocation for device-to-device underlay communication. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Shanghai, Beijing, Apr 2013
- 7 Wang F, Xu C, Song L, *et al.* Energy-efficient radio resource and power allocation for device-to-device communication underlaying cellular networks. Proceedings of IEEE International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Anwei, China, Oct 2012
- 8 Wang T, Song L, Han Z. Dynamic popular content distribution in vehicular networks using coalition formation games. <http://arxiv.org/abs/1211.2081>, 2012
- 9 Zhang S, Song L, PP L. Hot topic: physical-layer network coding. Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Los Angeles, USA, 2006

[作者简介]



许晨, 女, 北京大学信息科学技术学院博士研究生, 主要研究方向为无线资源分配和管理、博弈论、未来通信系统。



宋令阳, 男, 北京大学信息科学技术学院博士生导师、研究员, 主要研究方向为自适应信号处理、估计和优化理论、认知和协作通信、信道编码、无线传感器网络、宽带无线接入和未来通信系统。

(收稿日期: 2013-06-04)