



专题: 分层异构无线网络

基于集中式接入网架构的异构无线网络资源管理技术研究

田霖^{1,2}, 翟国伟^{1,2}, 黄亮^{1,2}, 周一青^{1,2}, 石晶林^{1,2}

(1. 中国科学院计算技术研究所移动计算与新型终端北京市重点实验室 北京 100190;

2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 未来无线通信网络将是一个多种无线接入方式共存的异构网络, 如何实现异构网络在频谱、软硬件资源等方面的融合是一个亟需解决的问题。现有方案受限于不同网络独立部署的架构, 无法真正实现异构网络资源的融合。针对该问题, 提出了一种新型的基于集中式接入网架构的异构网络融合平台, 可以在集中式资源池基础上进行异构网络间处理资源及无线资源的共享与统一管理。基于该平台, 进一步阐述了异构网络资源管理的关键技术, 包括基站资源虚拟化、处理资源按需分配、动态频谱共享、网络覆盖优化及性能分析验证方法等, 为未来异构网络融合研究提供了一种可行的方案。

关键词: 异构网络; 集中式接入网架构; 资源融合平台; 资源虚拟化; 资源管理

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.06.004

Research on Key Technologies of Heterogeneous Wireless Network Resource Management Based on Centralized Radio Access Network Architecture

Tian Lin^{1,2}, Zhai Guowei^{1,2}, Huang Liang^{1,2}, Zhou Yiqing^{1,2}, Shi Jinglin^{1,2}

(1. Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The future broadband wireless communication network will be a heterogeneous network with multiple access technologies seamlessly integrated. In such heterogeneous network, the key issues are how to share resources such as frequency, software, hardware and so on among different types of networks to reduce cost as well as to provide better services to users. Therefore, a heterogeneous network resource convergence platform was proposed based on the centralized radio access network architecture. This platform provides a feasible solution to support resource cooperation among different networks. Moreover, the key technologies were illustrated in detail, such as resource virtualization, processing resource allocation, dynamic frequency share, network coverage optimization, system performance analysis, etc.

Key words: heterogeneous network, centralized radio access network architecture, resource convergence platform, resource virtualization, resource management

1 引言

近年来,随着无线通信技术的迅猛发展和人们对移动

接入需求的不断增加,仅靠一种无线通信技术或一种组网方式将无法满足不同用户随时随地高质量地获取丰富多彩的无线服务的需求。因此,异构网络融合的概念应运而生。在



异构融合的网络中,移动蜂窝网、广播网、无线局域网甚至无线传感网等网络协同共存,宏蜂窝、微蜂窝、微微蜂窝以及毫微微蜂窝等组网形式相互融合^[1-3],发挥各自的优势为用户提供服务。第4代移动通信系统(4G)的特点之一就是支持异构网络的融合。

然而,多种不同网络技术从体系结构、底层接入技术到实现方式的不同,给异构网络间进行有效的资源整合带来了巨大挑战。例如,在蜂窝移动通信网络中,各种制式的网络互相独立,升级网络意味着需要重新部署新的网络,如从2G网络升级到3G网络,则需要重新叠加部署一张3G网络,费用高、工作量大、已有投资难以得到利用;同时,不同网络之间的“孤岛”式存在导致无线资源和处理资源难以共享,无法实现异构网络间的有机融合,不能使资源发挥出最大的效用。虽然异构网络融合领域已经开展了大量的研究和工程实践,但现有网络融合方案主要致力于解决不同制式网络的互联互通问题,并未从根本上解决异构网络资源共享管理的难题。

集中式接入网架构将射频、基带、计算等资源进行水平池化供网络作统计复用并接受统一的资源管控,打破了传统通信系统中不同的基站间、网络间软硬件资源不能共享的瓶颈,从而为真正实现异构网络融合奠定了系统基础。产业界和学术界纷纷提出了具有不同特点的集中式接入网架构,例如中国移动通信集团公司(以下简称中国移动)提出的基于集中式基带处理、由远端天线射频单元和天线组成的协作式无线网络和基于开放平台的实时云型基础设施的无线接入网(C-RAN)^[4]概念;中国科学院计算技术研究所(以下简称中科院计算所)提出的物理集中、逻辑分布的超级基站架构,基于资源水平共享、统计复用,在统一的基础设施上通过基于任务管理的实时虚拟化技术实现多个虚拟基站的功能,实现基站逻辑功能与物理实体的分离以及基站处理资源动态按需分配。虽然集中式接入网架构方面的研究已经开展,但如何基于该架构实现异构网络资源融合,尚未有具体的方案给出。

2 研究现状

2.1 异构网络资源管理相关研究

异构网络资源管理的目标是将各种不同接入网中的资源进行分配和管理,以求在最大化资源利用率的同时,满足用户QoS需求,降低系统资源的整体耗费。当前,异构网络资源管理的研究主要包括无线资源管理架构、接入网

选择、移动性管理、无线资源调度等。

诺基亚公司针对异构网络无线资源管理问题,提出了CRRM(common radio resource management)功能模型^[5,6]。在CRRM模型中,不改变现有无线网络控制器(RNC)的功能,只是在CRRM控制器端做出决策后,调整相应参数进行切换控制,实现统一的流量控制、拥塞控制、QoS管理和负载控制等功能。参考文献[7]给出了无线资源管理架构的分类,包括集中式、分布式和混合式3种。集中式架构能够统一管理和分配全局的无线资源,在整个网络层面提高系统的无线资源利用率,提升系统性能,但在现有的网络架构下并不适用;分布式架构将集中式管理的联合管理实体功能分散到各个地位对等的实体中,实体间通过通信实现整个网络无线资源的统一分配和管理,但无法综合考虑整个网络的情况,导致资源利用率低;混合式架构将集中式和分布式架构进行了结合,是两者的折中。

虽然以上提出了多种异构网络无线资源管理架构,但无论在哪种架构下,无线资源管理都可以分为3个过程:信息获取、决策制定与决策执行^[8]。信息获取的对象是影响决策制定的因素,可以分为3类:一是用户侧信息,如QoS需求、移动速率等;二是网络侧信息,如系统容量、网络覆盖率等;三是经营者信息,如费用等。信息获取的方法依赖于无线资源管理架构设计。决策制定即按照预定的决策机制做出相应的资源管理策略的一个过程,例如通过效用函数法^[9]、模糊化方法^[10]、博弈论^[11]等方法,做出资源调度策略。决策执行是将制定的资源管理策略付诸实施的过程。在当前的网络架构下,需要驱动不同接入网的资源管理组件来执行决策。

异构网络下的接入网选择机制也是近年来的研究热点,大概可以分为以下5类方法:

- 将网络选择建模为ABC(always best connection)问题^[12];
- 从参数研究方法学的角度开展网络选择研究^[13],如引入层次分析法等;
- 侧重从单个优化目标的角度设计网络选择算法^[14],如能耗、用户满意度等;
- 将网络选择过程模型化为博弈论的过程,经过用户与网络或网络与网络之间的博弈竞争进行网络的最终行为选择^[15];
- 从具体接入网络中研究网络选择的过程,如UMTS与WiMAX之间的选择^[16]。

在移动性管理方面,异构网络间的垂直切换技术是研究重点,垂直切换实现的好坏直接决定了异构网络间的融合度。IEEE 802.21 协议^[17]定义了完整的垂直切换机制,建立了媒介无关切换服务的概念。垂直切换算法大致可以分为 3 类^[18],分别是传统切换算法、基于人工智能的切换算法和基于成本函数的切换算法。

从当前异构网络资源管理的研究现状可以看出,大部分研究是为解决异构网络之间的互联互通问题,如垂直切换、接入网选择等;虽然不同网络间的资源调度方法可以让终端同时使用多个网络的频谱资源,但异构网络之间无法进行频谱、硬件等资源共享,从而无法实现真正的融合。虽然也有多制式基站共享资源的方法研究^[19],但受限于现有网络架构,只能在多模基站上实现。

2.2 集中式接入网架构

集中式接入网架构的核心思想是将原来分布式的基站资源进行集中部署和管理,从而提高资源利用率,降低运营商的网络建设、维护、升级成本。虽然不同单位提出的架构各有特点,但其主要组成均包括 3 部分:由远端射频单元(RRU)和天线组成的分布式无线网络,基于基础设施共享和实时虚拟化技术的集中式基带池以及连接 RRU 和集中式基带池的光传输网络,如图 1 所示。其中,集中式接入网架构根据其基带池运行平台的不同,可以分为基于通用处理器平台及基于 DSP 平台两类。IBM 提出的无线网络云^[20]属于前者,中科院计算所提出的超级基站属于后者。表 1 给出两类架构的主要特点对比。通用处理器平台可以应用基于 IT 设施的虚拟化技术,在通用性上具有较大的优势,但却损失了部分实时性。本质上,无论何种架构,其通用性和实时性都是一对矛盾的指标,相信未来两种架构都将寻找到一个适当的平衡点。

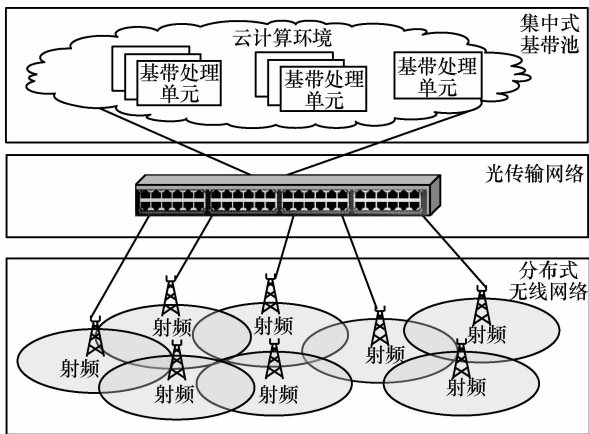


图 1 集中式接入网架构

表 1 无线网络云与超级基站两类架构的对比

比较项目	架构代表	
	无线网络云	超级基站
基带池平台	通用处理器平台	可重定义 DSP 平台
虚拟化技术	基于 IT 设施的虚拟化技术	通过资源管控实现虚拟化
性能功耗比	低	高
实时性	低	高
通用性	高	低

集中式接入网架构可以有效降低能耗和运营成本,使得资源聚合和大范围协作无线传输技术成为可能。利用实时虚拟技术使得物理资源全局最优化利用不再是奢望。同时,开放的平台和通用处理器也使得软件无线电技术能支撑多个无线网络标准或在原有标准上快速升级,支持异构网络在同一平台上的共存和实现,为异构网络资源共享奠定了基础。

3 基于集中式接入网架构的异构网络融合平台

在集中式接入网架构下,可以对物理集中的基站处理资源进行封装抽象,提炼模拟出多个逻辑功能完整的虚拟基站系统,虚拟基站间的资源可以动态共享,虚拟基站能够按需生成和取消,虚拟基站系统对外提供服务的方式与真实的硬件基站系统一致。同时,虚拟基站可以是不同制式的基站,包括 GSM、TD-SCDMA、TD-LTE 等;也可以是不同类型的基站,例如宏基站、家庭基站等。基于虚拟基站的实现思路,本文给出的异构网络融合平台架构如图 2 所示,该平台主要包括 3 方面核心功能。

(1) 资源池构建

为实现动态的资源共享和协同,需要构建集中式基站资源池,在逻辑上应对分布式的基站功能载体,使得逻辑

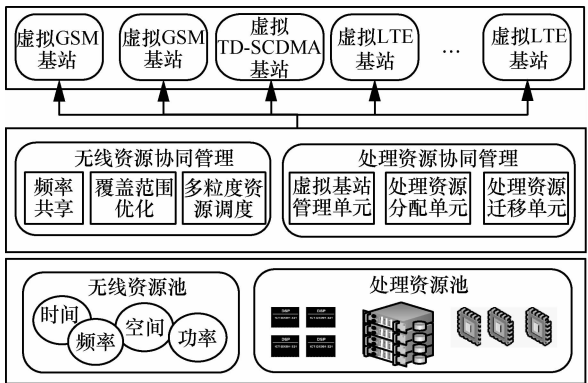


图 2 异构网络融合平台架构



上的分布式基站拥有物理上集中的无线资源和处理资源,从而实现资源与基站功能的解耦,满足动态资源分配和管控的需要,并为资源协同管理提供水平化的基础架构。集中化的资源池是资源管控的对象,资源池的规模具有可伸缩性,可以动态增加或减少资源池中的各种资源,以适应各个逻辑基站在制式、负载规模等方面的变化。

(2) 处理资源的虚拟与管控

基于集中式资源池,实现处理资源的虚拟与管控,通过对池中处理资源的分配、组合、调度及迁移,完成虚拟基站的生成;资源管控实体可以进行虚拟基站的实时管理,根据各个虚拟基站的当前运行情况和负载处理要求,按需调整用于特定虚拟基站的处理资源,改变虚拟基站处理资源的组成结构,以实现处理资源的在线无损动态迁移,在提高基站处理资源利用率的同时,满足各个基站的实时处理需求。

(3) 无线资源协同管理

根据异构网络的负载情况,结合小区和广域级别的无线资源协同管理技术,实现广域分布式协同多点传输,支持异构网络以及大规模小区间的无线资源按需共享,使有限的频谱资源发挥出最大的效用。由于集中式接入网架构打破了异构网络之间信息交互和协作的物理壁垒,因而无线资源管理算法能够以整个异构网络系统为解空间进行优化计算和分配,从而为逼近系统的整体性能极限奠定了基础。

4 基于集中式接入网架构的异构网络资源管理关键技术

4.1 基站资源虚拟化技术

在集中式接入网架构下,要实现异构网络资源的融合,首先需要构建资源池,并通过资源虚拟化技术进行统一管理。可以统一管理的资源包括处理器、存储等处理资源,频谱、天线等无线传输资源,电源功率等各种实际存在的物理资源。在计算机科学中,虚拟化是一种表现逻辑群组或计算资源的子集的过程,用户可以用比原来的组织更好的方式来使用资源。这些资源的新虚拟部分不受现有资源的架设方式、地域和物理形态所限制(来自“维基百科”)。本质上,虚拟化是一种资源管控技术,即对相应的软件/硬件资源做管理控制,为上层提供应用需要的逻辑形态,以更高效、更灵活的方式使用资源。

虚拟化技术在计算机领域已经得到广泛的应用,例如

虚拟计算机、虚拟化操作系统、虚拟网络设备等,这些应用中的共同特点是底层硬件的无关性。在资源集中化的接入网架构中,集中化资源的虚拟化同样具有该特征,资源管理实体可将物理存在的处理资源进行各种方式的抽象,如虚拟出多个具有一定处理能力、不同网络制式的基带处理单元和相应的协议处理单元;基站只需要将其无线资源需求以及处理资源需求等告知集中化资源管理实体,集中化资源管理实体就可以形成满足需求的资源集合,供基站使用。物理存在的各种资源对于基站来说并不可见,满足一个基站处理的集中化资源总和可称为一个虚拟基站,类似于虚拟机的概念。

资源的虚拟化可以层次化方式体现,最底层的物理资源可进行一定程度的组织,形成无线资源块,处理资源块节点等第一级虚拟化资源,这些资源块可进一步组合搭配形成更高级的虚拟化资源,如对应不同通信制式的虚拟化基站模板。构造虚拟基站时,可先从虚拟化基站模板中选择是否有合适的资源,若没有,再从底层虚拟化资源中选择相应的无线资源块和处理资源块来构造完整的虚拟基站,而无需每次都从最底层的物理资源开始进行基站虚拟化。

此外,由于移动通信系统对实时性的要求很高,因此需要研究基于虚拟化资源池的实时性保障技术,实现硬实时中断和实时任务调度,满足通信信号实时处理和物理帧硬实时传输的需求。要实现该目标,实时操作系统需要基于虚拟化资源池结构进行增强和优化设计。首先,需要支持底层大量硬件物理资源的虚拟化抽象,实现资源的定量化管理,设置硬件的中断抽象层,使得虚拟化的硬件资源能够实时反映硬件的中断触发;其次,需要实现基于多核DSP或CPU的多任务实时调度和资源负载均衡,以满足信号处理过程中的实时性要求;最后,需要通过对系统负载的实时监控,优化管理整个系统性能。

4.2 处理资源按需分配技术

基于本文提出的异构网络融合平台,不同制式基站的处理资源可以进行统一管理和按需分配。异构网络融合平台中的处理资源协同管理部件可以根据基站的接入用户数、发起业务数、业务类型等对基站负载有影响的参数,预先分配并适时调整各个基站所需的处理资源。

已有研究^[20-23]给出了根据基站的负载或者平均负载,将集中式处理资源池中的处理资源分配给不同基站的方法。这类方法可以根据不同基站的负载差异,分配不同

量的处理资源,一定程度上实现按需分配,但不能解决在各个基站负载随时间变化(如潮汐效应^[4])的情况下处理资源高效分配的问题。此外,若采取动态分配处理资源的方式,根据基站所对应的通信标准,将某个时隙(如某个子帧)的各个基站负载,按照轮询的方式,分配到处理资源池的各个处理器核心上执行,可以高效地利用处理资源,缺点是某个基站的负载处理会分散在多个处理器甚至服务器上,通信开销大,实时性难以保证。

针对已有的处理资源分配方法的问题,本文将处理资源静态分配和动态调整相结合,提高处理资源利用率并减少系统开销。

(1) 处理资源静态分配

静态分配方法将首先对各个基站的负载进行统计并对其之后的负载进行预测,根据负载的预测值为基站分配处理资源。除了各个基站的平均负载预测值之外,可额外考虑各个基站在一段时间内,如一天之内的负载变化,根据潮汐效应的特征,将每一时间阶段的负载进行统计和预测。根据不同时间段内各个基站的负载情况,通过动态规划等方法进行处理资源分配,将基站映射到处理资源池中合适的处理器或服务服务器上,尽可能提高处理资源的利用率。

(2) 处理资源动态调整

当基站实际运行时,各个基站所对应的处理资源需要根据负载变化进行动态调整和迁移,以满足不同网络负载变化时的处理资源需求。处理资源动态调整的基本策略为当某个基站负载增加以致现有的处理资源不能满足要求时,调整该基站所对应的处理资源,并且优先调整内部资源。例如,将某基站的处理迁移到同一服务器中其他空余资源较多的处理器上执行,仍然无法满足要求时才考虑向其他服务器迁移。资源调整的依据除了该处理器单元中空闲资源足够以外,尽量选择当前负载变化程度较小的处理器或服务服务器作为调整迁移对象,防止出现频繁的资源调整,造成额外开销。

以下将本文提出的方法与根据基站平均负载或最大负载进行分配的方式做比较,仿真结果如图3所示。在多个基站参与处理资源分配时,本文提出的分配方法在处理资源利用率方面要明显高于其他两种方法,并且在基站数量较多,整体网络规模较大时,优势更为明显。

4.3 动态频谱共享技术

为了避免干扰不同制式的网络使用的频谱是固定分配的,如TD-SCDMA采用1 880~1 920 MHz/2 010~2 025 MHz,

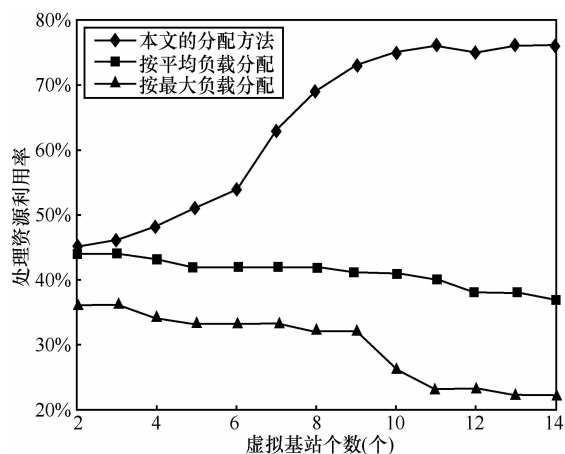


图3 处理资源分配方法仿真结果

GSM采用885~915 MHz/930~960 MHz或1 710~1 755 MHz/1 805~1 850 MHz。然而,不同网络的用户在时间、空间、业务需求上呈现一定的差异,若采用固定分配的方式,将导致某个网络即使在一段时间内具有空闲频谱,其他频谱资源紧张的网络也不能使用,从而造成了频谱资源的浪费。已有学者针对该问题开展了研究^[24-26],基本思想是基于认知无线电技术,在A网络的授权频段空闲时,B网络的终端可以感知到并使用,但必须保证不影响A网络的正常通信。

在本文提出的异构网络融合平台上,可以采用已有的基于认知无线电的方法进行异构网络间的频谱共享,如根据不同异构网络中用户业务量需求的分析及预测,将更多的载波分配给业务量需求高的网络^[26]。此外,还可以基于对异构网络业务量变化的长期统计,设计出异构网络间半静态的频谱共享方案。如某区域在某一段时间内话务量高而宽带业务流量低,则可以将TD-SCDMA的部分频谱划分给GSM使用,由两个网络分别通知其接入终端,而不需要终端一定具备认知无线电的功能。

基于异构网络间的动态频谱共享,可以采用二级动态频谱资源分配架构。首先,设计异构网络间动态频谱分配方法,使得资源在异构网络间进行优化,然后设计邻区载波借用机制,进行同制式水平小区优化。最后,设计基于频谱效率、能耗效率等指标优化的多模用户接入方法,进一步提高系统频谱资源利用率。

4.4 异构网络覆盖优化技术

同一制式网络中,不同覆盖范围和不同形态的基站共存将是未来网络部署的特点,也是异构网络一种重要形式。例如,LTE-Advanced网络中的小蜂窝(如微蜂窝、微微



蜂窝等)就与宏蜂窝组成了 HetNet^[3],可以解决宏蜂窝网络室内覆盖的难题,提高系统吞吐量、改善用户体验、降低运营成本和维护费用。小蜂窝网络不需要像传统网络部署那样进行网络规划,只需要进行随机性部署,亦无须进行反复路测,“即插即用”便可工作,由小蜂窝中的 SON(自组织网络)模块完成相应初始化工作。然而,小蜂窝这种“即插即用”的部署方式,同时也给小蜂窝网络的覆盖优化带来了挑战。

网络覆盖优化一直是运营商工作的重点之一,也是无线网络研究的热点。传统的无线网络覆盖优化通常在网络规划过程中,通过模拟用户分布部署基站设备,选取最佳网络参数。在网络规划的环境中,用户分布采取自定义预知的方式,优化算法多采取离线的算法,不适用于小蜂窝网络这种随机部署运行中的优化过程。

本文提出的异构网络融合平台基于云计算环境,可以提供足够的计算能力,支持在线的覆盖优化方法。同时,集中式架构可以为优化方法提供较为全面的异构网络覆盖状况、用户需求等信息,保证方法做出准确的决策。因此,基于该平台的覆盖优化方法可以根据网络覆盖状况检测覆盖问题(如覆盖漏洞、强覆盖重叠、小区过载等)计算覆盖率,并在功率、容量等限制条件下最大化网络覆盖率。这类方法建模后一般是具有 NP 难的多维优化问题,可采用粒子群等算法寻求最优解。

4.5 技术性能分析与验证方法

如何建立集中式接入网架构下的异构网络资源管理性能分析模型,设计有效的性能分析方法,在小规模的情况下,预测真实移动通信系统的性能及行为,验证异构网络融合理论及创新方法的准确性、有效性,是一个极大的挑战。目前,虽然中兴通讯、华为技术、大唐电信、阿尔卡特—朗讯、北邮、清华、中科院计算所等单位均已开展研究,研制出多模基站、集中式基带池等验证系统,中国移动也在珠海等多地开展了网络实验,但对于某项异构网络融合技术的研究来说,搭建实际系统及网络的方法成本太高。

一种可行的实验方案是基于通用处理器的软件无线电平台搭建异构网络融合平台,进行技术实验。目前,微软公司提出的 Sora 软件无线电(software defined radio,SDR)方案^[27]是一种性能优良的 SDR 平台,可以基于该平台,通过软件编程的方法实现如 LTE、WLAN 等空中接口链路,搭建出异构网络融合技术实验平台。然而,如何设计类似计算机领域的基准测试程序,为异构网络融合相关研究提供统一、

可信的性能分析与评测方法仍然是亟需解决的难题。

5 结束语

现有异构网络融合方案主要致力于解决不同制式网络的互联互通问题,并未从根本上解决异构网络资源共享的难题。集中式接入网架构为真正实现异构网络融合奠定了系统基础。本文基于集中式接入网架构设计了异构网络融合平台,并研究了异构网络资源管理的关键技术,从资源虚拟化、处理资源管控、无线资源协同等方面分析了技术难点与挑战,给出了初步的解决方案,为异构无线网络资源管理技术研究提供了一种新的思路。

参考文献

- 1 Zhou Y, Liu H, Pan Z, *et al.* Two-stage cooperative multicast transmission with optimized power consumption and guaranteed coverage. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013(99):1~11
- 2 Huang L, Zhou Y, Han X, *et al.* Distributed coverage optimization for small cell clusters using game theory. *Proceedings of IEEE WCNC 2013*, Shanghai, China, Apr 2013
- 3 3GPP TS 36.814 V9.0.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects, 2010
- 4 中国移动通信研究院. C-RAN 无线接入网绿色演进白皮书, 2010
- 5 Perez-Romero J, Sallent O, Agustí R, *et al.* Common radio resource management: functional models and implementation requirements. *Proceedings of IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Berlin, Germany, 2005
- 6 Pillekeit A, Derakhshan F, Müller-Clostermann B. Modeling of common radio resource management scenarios. *Proceedings of the 2007 Spring Simulation Multiconference-Volume 1: Society for Computer Simulation International*, Norfolk, Virginia, USA, 2007: 205~210
- 7 邓洁, 雒江涛. 基于第四代移动通信的无线资源管理. *信息技术*, 2007(12)
- 8 Piamrat K, Viho C, Ksentini A, *et al.* Resource management in mobile heterogeneous networks: state of the art and challenges. *Institut De Recherche En Informatique Et Systèmes Aléatoires Technical Report 6459*, Feb 2008
- 9 Yonghoon C, Hoon K, Sang-wook Han, *et al.* Joint resource allocation for parallel multi-radio access in heterogeneous wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010,9(11): 3324~3329

- 10 Hoekstra G J, Sterb O, Schwendener R, *et al.* Quality of service solution for open wireless access networks. Proceedings of European Signal Processing Conference(EUSIPCO 2005), Antalya, Turkey, Sep 2005
- 11 Niyato D, Hossain E. WLC04-5: Bandwidth allocation in 4G heterogeneous wireless access networks: a noncooperative game theoretical approach. Proceedings of Global Telecommunications Conference, San Francisco, CA, USA, 2006: 1~5
- 12 Ong E H, Khan J Y. Dynamic access network selection with QoS parameters estimation: a step closer to ABC. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring 2008), Marina Bay, Singapore, 2008: 2671~2676
- 13 Mohamed L, Leghris C, Adib A. A hybrid approach for network selection inheterogeneous multi-access environments. Proceedings of 2011 4th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS), Paris, France, 2011: 1~5
- 14 Inwhae J, Won-Tae K, Seokjoon H. A network selection algorithm considering power consumption in hybrid wireless networks. Proceedings of 16th International Conference on Computer Communications and Networks, Honolulu, HI, 2007:1240~1243
- 15 Pervaiz H, Bigham J. Game theoretical formulation of network selection in competing wireless networks: an analytic hierarchy process model. Proceedings of the Third International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies Conference (NGMAST'09), Cardiff, Wales, UK, 2009:292~297
- 16 Jiang W W, Cui H Y, Yan Q J, *et al.* A novel application-oriented dynamic network selection in an integrated UMTS and WiMAX environment. Proceedings of the Third International Conference on Communications and Networking in China, Hangzhou, China, 2008: 158~161
- 17 Taniuchi K, Ohba Y, Fajardo V, *et al.* IEEE 802.21: media independent handover: features, applicability, and realization. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(1): 112~120
- 18 Zahran A H, Liang B, Saleh A. Signal threshold adaptation for vertical handoff in heterogeneous wireless networks. Mobile Networks and Applications, 2006, 11(4):625~640
- 19 华为技术有限公司. 多制式基站及其信息处理方法和无线通信系统. 中国:200610149171, 2006
- 20 Lin Y H, Shao L, Zhu Z B, *et al.* Wireless network cloud: Architecture and system requirements. IBM Journal of Research and Development, 2010, 54(1)
- 21 Zhu Z B, Gupta P, Wang Q, *et al.* Virtual base station pool: towards a wireless network cloud for radio access networks. Proceedings of the 8th ACM International Conference on Computing Frontiers, Italy, 2011
- 22 Bhaumik S, Chandrabose S P, Jataprolu M K, *et al.* CloudIQ: a framework for processing base stations in a data center. Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Istanbul, Turkey, 2012: 125~136
- 23 中国移动通信集团公司. 一种负载均衡设备以及分布式基站系统及其通信方法. 中国:200910079460.7,2009
- 24 Zhao Q, Tong L, Swami A, *et al.* Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in Ad Hoc networks: a POMDP framework. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(3):589~599
- 25 Mitola J. Cognitive radio architecture evolution. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(4): 626~641
- 26 赵亮,金梁,黄开枝等. 异构无线网络中的共享载波垂直网络转换算法. 通信学报,2012,33(1):79~88
- 27 Microsoft. Sora project homepage. <http://research.microsoft.com/en-us/projects/sora/>

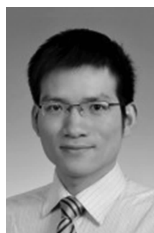
[作者简介]



田霖,女,中国科学院计算技术研究所助理研究员,主要研究方向为无线资源管理。



翟国伟,男,中国科学院大学博士研究生,主要研究方向为集中式基站架构下的处理资源分配。



黄亮,男,中国科学院大学博士研究生,主要研究方向为集中式基站架构下的资源虚拟化。

周一青,女,中国科学院计算技术研究所研究员、博士生导师,主要研究方向为无线传输技术。

石晶林,男,中国科学院计算技术研究所研究员、博士生导师,主要研究方向为无线通信系统与新型网络架构。

(收稿日期:2013-05-15)