



面向移动云计算接入网络的高能效无线资源管理 *

赵国刚¹, 赵力强¹, 杨 鲲²

(1. 西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室 西安 710071;

(2. 埃塞克斯大学计算机科学与电子工程学院 科尔切斯特 CO4 3SQ)

摘 要: 双层宏蜂窝/小蜂窝异构网络不但能解决室内用户的覆盖问题, 还可以大幅度降低网络能量消耗。但是, 网络中的跨层和层间干扰会降低网络性能, 高能效的无线资源分配和优化方法无疑将成为解决此问题的有效途径。首先, 给出了一个移动云计算管理框架。然后, 针对无线单链路定义了空间传输效率, 比较和分析了多种单链路效率度量的含义和数学性质, 并针对基于 LTE-A(long term evolution-advanced)的移动云计算接入网络, 提出了一种高能效的无线资源管理算法。为了快速地达到最优解, 设计了一个快速收敛的迭代算法。仿真分析说明此资源管理算法实现了移动云计算系统能量效率和吞吐量的高效折中。

关键词: 移动云计算; 双层宏蜂窝/小蜂窝网络; 绿色无线通信; 无线资源分配方法; LTE-A

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.07.09

Energy Efficient Radio Resource Allocation in Two-Tier Macro-Femto Cellular for Mobile Cloud Computing

Zhao Guogang¹, Zhao Liqiang¹, Yang Kun²

(1.State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Department of Computing and Electronic Systems, University of Essex, Colchester CO4 3SQ, United Kingdom)

Abstract: Two-tier macro-femto-cellular networks have initially been proposed as a solution to the poor indoor coverage problem, but they are also capable of substantially reducing the overall energy consumption. However, the cross-tier and co-tier interference have to be carefully controlled with the aid of specific radio resource allocation and optimization techniques. A mobile cloud computing management architecture was proposed firstly. Then novel concept of spatial transmission efficiency for PTP radio link was first introduced with several existing efficiency metrics compared. An analytical model was conceived and a radio resource management algorithm based on LTE-A mobile cloud computing was designed. In order to achieve the optimal solution quickly, a rapid convergence of the iterative algorithm was designed. Simulation result shows the proposed algorithm achieves the maximum of system energy efficiency with a superior tradeoff with system throughput.

Key words: mobile cloud computing, two-tier macro-femto-cellular network, green wireless communication, radio resource allocation, LTE-A

* 欧盟第七框架计划(No.IRSES-GA-2011-295222), 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2012AA120604), 高等学校学科创新引智计划(“111”计划)基金资助项目(No.B08038), 国家自然科学基金资助项目(No.61372070), 东南大学移动通信国家重点实验室开放基金资助项目(No.2012D01)



1 引言

在刚过去的几年中,传统的桌面计算以飞快的速度向云端转移。此外,由于无线通信与移动智能终端技术的快速发展,下一代无线接入网络和云服务的一体化融合将成为可能,随之产生的“移动云计算”概念也应运而生,相关的研究将成为一项迫切的任务。针对移动云计算的研究主要针对以下两个方面。首先,解决如何调整当前的无线接入网络体系架构使之能够适应移动云应用及其支持平台的具体特点。例如,在移动终端应用程序的云端卸载过程中,无线接入网络必须以更多的带宽在尽可能低的时延下,来满足云用户的服务体验质量(quality of experience, QoE)。更重要的是通过进一步优化无线接入网络的协议和算法来满足日益增长的移动云用户服务需求。此外,以上云端卸载过程还可能涉及云应用的识别问题,云应用和网络算法之间的通信问题。因此,如何提高无线网络的信息承载能力来高效地支持云应用实现是一大挑战。同样,事物的作用都是相互的。另一方面,无线接入网络如何利用云计算技术的优势来提升自身性能?这种策略的实质是:在一个基于云计算的无线接入网络管理体系结构中,把一些无线接入网络中的控制功能转移到远程云端来实现,此部分不在本文讨论范围内。移动云计算的宏观体系架构如图1所示。

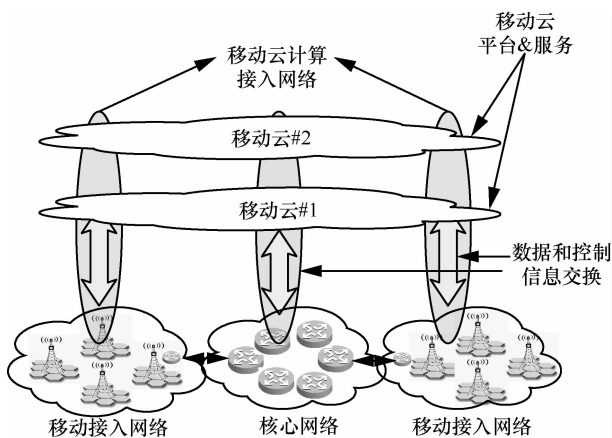


图1 移动云计算体系架构

为了实现云计算和宽带无线接入技术的融合,无疑将面临许多新的挑战。在移动云计算系统中,资源约束的移动终端必须通过无线网络接入远方的云端资源。然而,无线传输中变化的信道质量和数据速率会大大降低用户的体验质量。同时,由于系统频谱资源和终端功率资源的严

重受限,仅仅利用当前的同构无线接入网络来保证移动云计算用户的体验质量几乎是不可能的。很显然,需要给出新的移动云计算接入网络体系结构,提供令人满意的移动云服务。换言之,此网络架构应该能够为云用户提供更高更稳定的传输速率和无缝的室内覆盖,同时改善终端能量受限的问题。需要强调的是,信息科技和工业的能源消耗在全球范围的能源消耗中所占的比例不断增加,很长时间以来一直是一个棘手的问题。然而,高吞吐量的云计算无线接入网络必将产生更多的能源消耗,这在经济上也是不可持续的。综上可知,下一代移动云计算接入网络必须是高效的。

无线通信的高能效评估标准作为“绿色无线通信技术”的基础理论问题,已被广泛关注,虽然是一个公开的学术问题,但是现在研究人员已经有了一个普遍的共识,即它应该是低功耗系统的代名词。同时,被广泛接受的描述无线通信效率的准则也是一个开放的问题。因此,本文涉及了多种当前的效率指标,如频谱效率($\text{bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$)、能量效率($\text{bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz} \cdot \text{W})$)、功率效率(bit/TENU)^[1]和提出的空间传输效率($(\text{bit} \cdot \text{m})/(\text{s} \cdot \text{Hz} \cdot \text{W})$)。

双层宏蜂窝/小蜂窝网络原本是用来解决室内信号覆盖问题的。值得注意的是,此网络结构通过缩短用户和基站之间的距离大幅降低了能源消耗,同时大大增加了频谱资源利用率,从而形成了下一代高效无线接入网络的基础体系结构^[2]。众所周知,宏基站覆盖范围大,可以支持高移动性的宏蜂窝用户设备(MUE),同时不得不以更高的辐射功率为室内用户设备(UE)提供服务。但是无线信号在穿透现代办公建筑的金属涂层障碍物时,可能经受高达30 dB的损耗,这可能会使宏基站(eNB)的能量消耗增加高达1 000倍!相反,小蜂窝基站不仅实现了室内无线覆盖,而且由于成倍地增加了频谱的复用度,因此可以大大提高系统吞吐量和用户的长期平均速率。同时,由于其覆盖范围小,小蜂窝基站能够大幅度降低用户设备(FUE)的发送功率。

遗憾的是,双层宏蜂窝/小蜂窝网络无疑将对现有的宏蜂窝网络产生负面影响,即跨层干扰。同时相邻的宏基站和小蜂窝基站之间也会产生同层和跨层干扰,因此双层宏蜂窝/小蜂窝网络在没有使用针对干扰的管理机制的情况下将无法高效工作^[3]。针对移动云计算系统,本文首先给出了一个面向移动云计算系统的管理框架,为实现移动终端与云资源的高效信息交换提供了保证。进一步,为了提高

移动云计算系统的能量效率, 确保移动云用户的体验质量, 扩大系统的最大可容用户量, 增强网络覆盖能力和实现网络无缝覆盖, 本文针对移动云计算系统中的宏蜂窝/小蜂窝网络, 设计了高效的无线资源管理算法, 并且给出了快速收敛算法达到了能量效率最优解。仿真分析阐明了此资源管理算法实现了移动云计算接入网络的能量效率和吞吐量的高效折中。

2 移动云计算管理体系结构

对于资源受限的移动终端来说, 业务的远程云端接入毋庸置疑是提高数据处理能力最有效的方式。一般而言, 云端资源主要用于提供极其强大的存储服务和数据处理服务。而移动云计算卸载技术是实现移动业务远程云端处理的基本方法, 可以将移动终端的云业务通过无线接入网络转移到远方的云端, 实现了移动云应用和云资源的结合, 从而可以增强移动终端的数据处理能力, 同时大大降低了移动终端的能量消耗。遗憾的是, 在未来的实际移动云计算系统中, 时变的无线信道和动态的网络负载在很大程度上会影响和阻碍移动云计算卸载技术的高效实现。因此, 必须提出基于 LTE-A 的宏蜂窝/小蜂窝网络的移动云计算管理体系架构, 高效地实现移动云计算系统对移动终端的服务。详细地说, 此管理架构应该根据当前的网络状态, 同时进一步与移动终端进行协商, 最终决定是否支持特定的云业务并且给出资源调度策略。在以上协商过程中, 移动云计算系统必须要兼顾移动用户的约束和无线接入网络开销这两方面因素。一方面, 移动终端的能量消耗约束和业务延迟要求是云端卸载最基本的约束条件。前者是指移动设备在卸载过程中所消耗的全部能量, 比如上下行信号传输能耗; 后者是指整个卸载过程的延迟, 其中包括无线接入网络上下行传输延迟、移动终端接收计算延迟和信息云端驻留时间。基于上述的业务服务质量约束参数, 移动云计算管理架构根据网络剩余无线资源和当前的网络负载状态通知用户的服务基站来实现卸载任务或者拒绝。另一方面, 以上协商过程会涉及多样的系统优化目标, 即系统效用, 如系统吞吐量、系统能量效率或者系统能量消耗等。移动云计算管理体系架构工作原理和流程如图 2 所示。

一旦无线接入网络和移动云终端之间的卸载协议达成, 那么无线资源分配算法将尽全力保证移动云用户的服务质量。高效的无线资源分配算法将决定剩余无线时频资

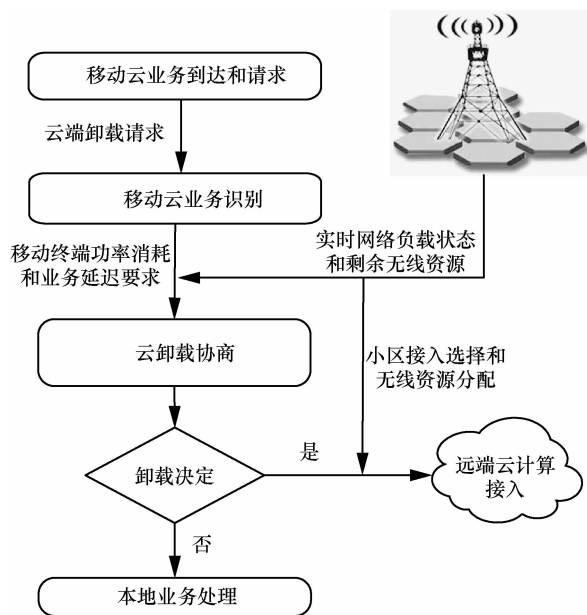


图2 移动云计算管理体系架构

源块和云业务终端之间的匹配, 同时决定在每个被调度资源块上的功率分配。在 LTE-A 系统中, 信号的空间传输是通过一个个时隙的操作实现的。在每个时隙中, 无线资源分配算法会充分利用时变的无线信道状态和业务延迟状态信息来获得最高的性能增益。需要说明的是, 一个云业务卸载过程的延迟对应业务在无线接入网络的驻留时间和上下行传输时间; 而一个云端卸载过程的终端功率消耗对应了所有上下行信息传输的功率消耗。同时, 系统的能量消耗和无线传输延迟在很大程度上是受到无线资源分配限制的。

3 无线通信效率评估准则

根据定义, 效率是效用和所消耗资源的比率。显然, 效率的概念与效用以及资源的具体定义密切相关。在无线通信中, 用户的目标是在给定可用资源约束下以及特定服务质量(QoS)要求下, 成功将其数据分组发送到一定距离的接收端。因此, 无线效用指标应包括成功发送的数据分组量、QoS(如吞吐量(bit/s)、时延、时延抖动以及分组丢失率和传输距离)。资源指标应该包括所有消耗的无线资源, 包括时域、频域、空域、码域、功率域等。

针对无线通信效率的定义, 当今的研究者已经做了很多工作, 大部分都认为频谱效率和能量效率是主要的效率评估指标^[1]。频谱效率区别于面积频谱效率(bit/(s·MHz·km²)), 后者考虑了蜂窝网的频率复用因子。单链路频谱效率定义



为单位带宽的比特传输速率,其对应单输入单输出(SISO)系统中的 $\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ 。相比之下,对多输入多输出(MIMO)系统而言,其应该对应每天线 $\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$,即每根天线能够提供的频谱效率。面积频谱效率(ASE)是指单位面积上蜂窝网络能够提供的频谱效率。另一方面,许多针对扩频通信的方法是通过牺牲频谱效率($\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$)以获取更高的能量效率($\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz}\cdot\text{W})$)。此外,参考文献[1]中的功率效率是单位热噪声信号能量提供的比特数(bit/TNEU),它可以被看作是一个增强型的能量效率度量。

国际无线通信标准化组织 3GPP(3rd generation partnership project)指出,在蜂窝网络中,不同的通信负载环境需要利用合理的系统性能准则来评估系统的能量效率。在用户分布密集市区,运营商面临的主要任务是在一定的系统能量资源约束下接入更多的用户,从而最大化全局用户的吞吐量性能,这时的评估准则是 joule/bit 。但是,针对用户分布稀疏的市区边缘,运营商面临的主要问题转变为在降低基站造价和系统能量的条件下尽可能扩充网络的覆盖面积,因此评估准则是 W/m^2 。综上可知,无线通信的目标同时包括网络承载的信息量和信息传输的距离或者覆盖面积,并且在不同的网络负载条件下主要的通信目标会随之改变。本文首先定义了无线单链路空间传输效率($(\text{bit}\cdot\text{m})/(\text{s}\cdot\text{Hz}\cdot\text{W})$)^[4],即单位功率、带宽和时间成功传输的比特数乘以传输距离。更进一步,无线单链路空间传输效率将会被扩展成为能够反映用户长期速率的度量准则。这一点将成为未来研究工作的重点。同时,未来大量小蜂窝基站的部署势必会使基站造价这一因素显露出来,并且成为移动运营商部署网络的重要考虑因素,因此如何将空间传输效率的概念扩展到小蜂窝网络中,并且作为能够衡量网络承载信息能力的度量准则也是值得研究的。

需要指出的是,任何一种无线通信效率度量决不能被归类为低效率的,因为在合适的情况下,所有的效率度量都能提高整个网络性能的一方面。然而,在一定的无线通信环境下,选择不同的效率度量来优化整个网络会对系统性能产生深远的影响。因此,网络优化应选择动态和适宜的度量准则。此外,这些效率准则有不同的数学特性,并且这些特性在很大程度上决定了网络基站部署策略和无线资源分配优化方法中效用函数的设计方法。

- 频谱效率 η_s 定义为单位带宽的吞吐量,单位为 $\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ 。根据香农信息理论,一个无线单链路的频谱效率为 $\eta_s = \log_2(1+\gamma)$,其中 γ_s 是接收端的平均

信噪比。

- 能量效率 η_e ,即频谱效率在总功耗中的比例,单位为 $\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz}\cdot\text{W})$ 。在实际的基站系统中,总功耗包括功率放大器的功耗、信号处理以及基站散热扇的功耗等。
- 空间传输效率 $\eta_g = \eta_s \cdot d$,单位为 $(\text{bit}\cdot\text{m})/(\text{s}\cdot\text{Hz}\cdot\text{W})$,其中 d 为发送端与接收端之间的距离。
- 功率效率 $\eta_{\text{TENU}} = \eta/\gamma_s$,单位为 bit/TNEU 。

由于信噪比是发送功率 P_t 以及传输距离的函数,所有的上述 4 个效率都依赖于发送功率 P_t 和传输距离 d 。发射功率越高或者传输距离越短,接收机的信噪比越高,从而频谱效率越高。能量效率是关于传输距离的单调减函数,同时是关于传输功率的凸函数,因此存在一个关于传输功率的极值点。功率效率是一个单调函数,同时传输功率越小传输距离越大,对应的功率效率越高。值得注意的是,空间传输效率是一个关于传输距离和发射功率的二维凸函数,并且存在唯一的全局极值点。然而,参考文献[1]和参考文献[4]对上述数学性质并没有提供一个严格的证明。另一方面,在实际的通信方案中,各种度量性能的限制因素包括信道衰落、干扰以及等待时间和运算复杂性。实际可达到的带宽、能量、功率以及空间传输效率远远低于预测理论值。但是,自适应调制编码(AMC)对点对点无线链路接近理论效率是一个很有价值的解决方案^[4]。然而,参考文献[4]的作者没有考虑如何逼近蜂窝网络中的最优效率。

4 网络干扰

在广泛采用双层宏蜂窝/小蜂窝网络之前,有几个重要的问题必须得到有效的解决,如接入方法、时间同步、物理小区标识、相邻小区列表创建、移动性管理等^[3]。此外,随着小蜂窝网络的部署,无疑会对宏蜂窝网络的性能造成损害。因此,减小干扰是最紧迫的挑战之一。

在典型的双层宏蜂窝/小蜂窝网络中,假设小蜂窝基站与宏基站的时钟是同步的,则干扰的分类如下。

- 跨层干扰:小蜂窝基站与特定的宏基站用户之间的干扰,属于跨层干扰,两者发生在不同的网络层。在下行链路中,每个宏基站用户受到附近的小蜂窝基站的强烈干扰,这是宏基站用户性能提升的主要限制因素。然而,即使在宏小区基站覆盖范围内存在大量的家庭基站,宏基站用户也应该具有更高的优先权,而不是家庭基站用户。

- 同层干扰: 如小蜂窝基站干扰的相邻家庭基站用户, 二者属于相同的网络层。当小蜂窝用户随机地安装许多小蜂窝基站时, 这些基站将处在一个高密度环境中, 同时许多家庭基站处在同一个较小的区域内, 很多小基站的接入点重叠。结果使密集环境中的家庭基站相互造成很强的层内干扰, 这是其性能提升的主要限制因素。

为了克服干扰的影响, 提出了干扰消除技术, 其分类如下。

- 波束成形技术: 半波长间隔的天线能够定向发射和接收波束, 并且可以通过增加多用户检测的复杂度来减少干扰。
- 无线资源管理^[5]: 功率控制技术和先进的资源调度策略是蜂窝网络系统中减少干扰的常用手段。

5 LTE-A 系统可用资源分析

到现在为止, 全球许多地方正在推行可提供高 QoE 保证的 LTE / LTE-A 系统。然而, 由于缺乏双层宏蜂窝/家庭网网络环境相关信息, 没有很好地解决干扰问题。

根据 LTE/LTE-A 标准, 在下行链路中, 双层宏蜂窝/家庭网网络采用正交频分多址接入 (OFDMA) 技术, 上行链路 (UL) 中采用单载波频分多址 (SC-FDMA) 技术。无线资源调度器是每个宏基站的功能性实体, 负责为上行链路共享信道 (UL-SCH) 和下行链路共享信道 (DL-SCH) 分配无线资源, 以最大化频谱效率、能量效率和用户之间的公平性, 同时确保不同通信服务的 QoS。需要指出的是, 每个基站的无线资源包括资源块 (RB)、特定的调制编码方案 (MCS)、功率分配方案以及天线选择方案, 这分别对应资源类别中的时域、频域、码域、空域资源。一个 RB 在频域由 12 个连续的子载波组成, 频带宽度 180 kHz, 在时域上是一个时隙, 持续时间为 0.5 ms。一个资源块是最小的时频资源分配单元。在下行链路中, 一个时隙承载 6 或 7 个正交频分复用 (OFDM) 符号; 在上行链路中的一个时隙承载 6 或 7 个 SC-FDMA 符号。这使得笔者能够采用类似矩阵的数学结构描述 RB 的分配过程。

此外, 该网络中还存在一个额外的无线资源, 它是双层宏蜂窝/小蜂窝网络中宏基站和小基站同时协作形成的。首先, 相邻宏基站和小基站有能力相互合作, 并且交流中继信息, 创建一个虚拟 MIMO 系统, 最终基于多点协作实现空间分集。其基本概念也常常被称为 MIMO 网络、广

义分布式天线或协调多点传输/接收 (CoMP) 方案。其次, 能够通过适当安排宏基站和小基站之间的 OFDMA 的子信道以减少跨层干扰。有如下几个方法。

- 正交信道分配: 通过为宏基站和小基站分配正交信道完全消除跨层干扰。然而, 这可能会导致两层的带宽减少, 因而降低整个系统的传输容量。
- 共道信道分配: 宏基站和小基站在同一频带中工作, 即两层网络都可以接入到全部频谱。但是, 这样会产生非常严重的跨层干扰, 尤其是在密集分布情况下。因此, 双层宏蜂窝/小蜂窝网络中所有可用的资源应该有效地协同分配, 从而以较少的干扰来增强系统整体性能。
- 部分频率复用分配: 适用于小区边缘用户以避免载波间干扰。动态部分频率复用能够根据特定位置上的瞬时业务量调整其分配的带宽。因此, 在一些区域中, 会保留宏蜂窝网络并未使用的特定频带, 以便其覆盖范围内的小基站有机会使用其空置频谱来避免干扰。

因此, 宏基站和小基站的协作是一个很有效的解决干扰和提升性能的方案。综上所述, 在此网络情境下共存在 5 种无线资源, 包括时频资源块、调制编码方案、功率资源、天线和协作的基站。

6 资源分配数学模型

LTE/LTE-A 标准并没有明确地给定无线资源分配方案, 这一点与其他的标准一致。这是因为不同的网络服务提供商有不同的解决方案。此外, 公开的标准体系为设计各种算法提供了可能性。表 1 给出了一部分成熟的算法, 比如最大载干比 (max C/I) 分配算法、轮询 (RR) 算法, 最大最小 (max-min) 值算法和比例公平 (PF) 算法。这些算法能够最大化系统吞吐量或者公平性。为了最大化系统的效用, 大部分有效的无线资源分配算法都可以建模为凸优化问题, 但是必须满足以下两个约束条件。

- 约束条件 1 (满足用户的最小 QoE 要求): 每个用户获得的数据速率应该大于用户要求的最小数据速率, 同时延迟、延迟抖动 (延迟变化) 或者分组丢失率都应该低于系统的最大可容忍值。
- 约束条件 2 (满足可用资源的约束条件): 每个用户被分配的资源 (时隙、子载波、天线或者传输功率) 之和应当小于全部的系统资源总量。



表 1 资源分配算法比较

无线资源分配算法	特点
最大载干比分配算法	目标是最大化系统吞吐量
最大最小值分配算法和轮询算法	两者都可以在不顾及用户信道状态的前提下提高用户之间的公平性。最大最小值分配算法通过最大化用户的最小数据速率保证所有用户拥有相同的速率
比例公平算法	比例公平算法会给优先级高的用户分配更多的子信道,其中用户的优先级会随着增加的平均吞吐量而降低
能量消耗比例(energy consumption ratio, ECR)	为了最大化系统的能量效率,效用函数被定义为单位有效系统吞吐量所消耗的能量 ^[7]
基于议价的高效功率控制(efficient power control via pricing)	用户的效用是能量效率和单位带宽议价结果的函数。此效用被证实是协作传输博弈的纳什均衡解 ^[7]

假设不考虑约束条件,最佳的系统效用可以通过数学方法得到。但是此最佳结果在实际通信系统中是不适用的。比如通过数学求导方法获得了最佳的系统效用和最佳的传输功率^[8]。可是此最佳功率值可能会成为负值或者大于最大系统约束值。因此,所有的资源分配算法都应该遵守以上约束。

以上分析模型面临两个问题。

(1) 效用函数设计

效用函数当且仅当是一个凸函数时,最佳解才会存在。因此系统效用函数的设计问题长期以来一直是一个挑战性问题。幸运的是,博弈论能够为以上问题提供很多可能的解决方案。

(2) 快速收敛算法

以上的最优化问题已经证实是 NP 问题,即不能在多项式时间内找到全局理论最优解。因此,很多研究人员针对实际通信环境陆续提出了高效的达到次优解的算法。

7 高能效的效用函数

一个理想的目标函数应该考虑到系统的吞吐量、能量效率、用户间公平性或者以上 3 种度量权衡的目标组合。

比如,以上问题可以建模为 $\max \sum_k U_k = \max \sum_k (r_k - r_{k,\min}) / (P_k - P_{k,\min})$ ^[8],其中 U_k 是给定用户 k 的效用; r_k 和 $r_{k,\min}$ 用户的可达吞吐量和最小吞吐量; P_k 和 $P_{k,\min}$ 是用户消耗的发射功率和最小要求的发射功率。根据以上的方法,首先所有的可用资源根据用户的最小资源要求进行分配。然后,剩下的资源会以最大化系统能量效率为目标进行分配。通过以上方法,可以得到系统能量效率和吞吐量的折中。

根据博弈论,如果能量效率函数是一个凸函数或者是一个准凸函数,那么它就可以直接被作为效用函数来进行

资源分配最优化。否则必须设计一个以能量效率为变量的效用函数来替代。

8 多维联合资源分配算法

此外,参考文献[9]提出了多样的集中式和分布式资源分配算法来达到最佳的系统效用。参考文献[10]提出了基于 TD-LTE 网络的低中空平台针对高功率效率的无线资源分配方案,该方案只是从资源块以及功率这两方面资源进行分配。参考文献[11]基于 TD-LTE 网络的低中空平台,针对免受灾难这一目标,提出了无线资源分配方案,该方案也是从两方面进行资源分配,使其容量达到最高。参考文献[12]在双层蜂窝网络中针对绿色无线电提出了高能效的频谱分配方案。参考文献[13]从绿色无线通信的角度提出了一种高效的自适应调制编码方案。但是,根据笔者的调研,针对宏蜂窝/小蜂窝网络的联合时—频—功—协作域无线资源分配算法还没有被涉及,虽然形式很复杂,但是很可能拥有更好的性能。本方案假设在一个宏蜂窝/小蜂窝网络中,所有的宏基站用户相对于小蜂窝用户有更高的 LTE 资源块接入优先权。这样,所有的宏蜂窝用户服务质量可以优先得到保证,而小蜂窝网络仅仅能够使用没有被宏蜂窝使用的资源块,层间干扰可以被完全消除,但是严重的小蜂窝间干扰依然存在。一般情况下,大部分网络负载出现在室内,也就是说此系统模型具有可实现性。在系统模型中,不仅所有的在同一个宏基站下的宏蜂窝用户之间竞争 LTE 时频资源块,而且所有的小蜂窝用户在每个小基站下也会相互竞争 LTE 资源块。结合联合时—频—功率域无线资源分配方法,协作无线资源调度可以进一步根据当前的网络负载特点实时地获得最佳的宏蜂窝/小蜂窝 LTE 资源块划分结果,最终实现整体网络的能量效率最大化。相比于笔者之前的研究成果^[8],本方法针对宏蜂窝/小蜂窝网络拟引入自适应协作资源调度的概念,实现宏蜂

窝/小蜂窝网络的能量效率最优。考虑到本文的类型,下面给出主要的数学模型,详细的数学建模和分析没有给出,请参见参考文献[10~13]。

高效的问题可以数学化为以下最优问题:

$$\max_{X,P} \sum_{n=1}^N U_n(\gamma_n) = \max_{X,P} \sum_{n=1}^N \frac{r_n(\gamma_n)}{P_n}, P_{n,k,t} \geq 0, \forall n,k,t \quad (1)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{n,k,t} = 1, x_{n,k,t} \in \{0,1\} \quad \forall k,t$$

$$\sum_n \sum_k \sum_t P_{n,k,t} \leq P_{\max, \text{all NB}} \quad (2)$$

其中 X 和 P 表示资源块和功率分配矩阵; N 代表单小区中用户的数量; r_n 代表第 n 个用户的信干噪比。在资源分配矩阵中,如果第 n 行 k 列资源块被分配给用户 n ,那么有 $x_{n,k,t}=1$,同时分配到的功率是 $P_{n,k,t}$;否则有 $x_{n,k,t}=0$ 。

很明显知道 $\sum_{n=1}^N x_{n,k,t}=1$ 。同时,所有资源块上的分配功率之和必须小于基站的总发射功率 $P_{\max, \text{all NB}}$ 。

图 3 给出了基于 LTE-A 的宏蜂窝/小蜂窝网络联合时-频-功-协作域无线资源联合优化流程。首先假设在一个传输时间间隔内无线信道状态和每层网络负载分布状态不改变。一旦以上因素在下一个传输时间间隔改变,那么联合优化算法会根据当前的信道和负

载分布状态,在保证宏基站用户优先级的前提下最优化全局的能量效率。具体地,在给定的网络环境下,宏蜂窝用户首先接入 LTE 时频资源块。然后,各小蜂窝基站会在剩下的资源块中进行功率分配,最终实现整个宏蜂窝/小蜂窝网络的能量效率最大化。需要强调的是,一旦无线信道状态或者网络负载改变,以上迭代算法会继续迭代循环,最终在每个传输时间间隔中总可以在保证宏蜂窝用户服务质量的前提下得到全网络能量效率的最优解。综上,相比于传统的静态频谱划分方案,协作资源调度使多维资源分配算法具有很强的自适应性。同时,由于迭代过程会在每个传输时间间隔中进行,因此完全避免了由负载变化导致的无线资源浪费,最终大大提高了系统性能。

虽然本文提出了一种高效的宏基站和小基站之间的协作机制,同时结合无线资源分配算法,但是针对宏蜂窝/小蜂窝网络的协作域资源概念依然有待深入研究。基站之间的协作涉及的范围很广,不单单包括基站之间的频谱划分,如多基站干扰协调机制和网络虚拟 MIMO 技术等。如何将协作机制与 LTE 宏蜂窝/小蜂窝网络的无线资源分配结合和实现同步优化,是一个有价值的研究方法,相比于相对孤立的技术,联合协作域的优化方法很可能获得更高的系统性能增益。

9 性能评估

仿真采用 LTE-Release 8 中扩展典型城市信道模型 (extended typical urban model), 详见 3GPP 协议 104、141 附录。仿真参数见表 2。传统的最大载干比 (max C/I) 分配算法总将资源块分配给拥有最佳信道质量的用户,实现了系统吞吐量的最大化。相比于其他的资源分配算法,它可以形成系统吞吐量的上界值,如图 4 所示。遗憾的是,此算法拥有很低的用户公平性和系统能量效率,如图 5 和图 6 所示。

表 2 仿真参数

参数	值
载波频率	2.0 GHz
宏蜂窝/小蜂窝覆盖半径	500 m, 50 m
宏基站最大发射功率	46 dBm
小基站最大发射功率	20 dBm
宏蜂窝覆盖下小蜂窝数量,宏蜂窝数量	50 个, 7 个
系统带宽	20 MHz

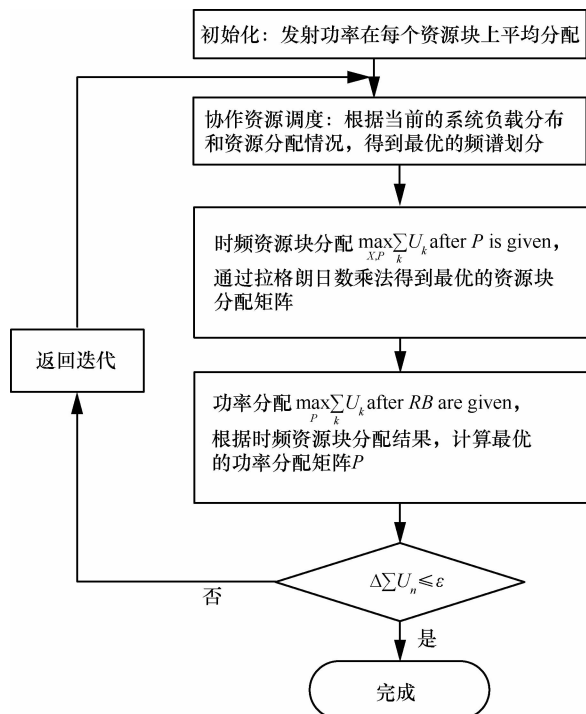


图 3 多维联合资源分配流程

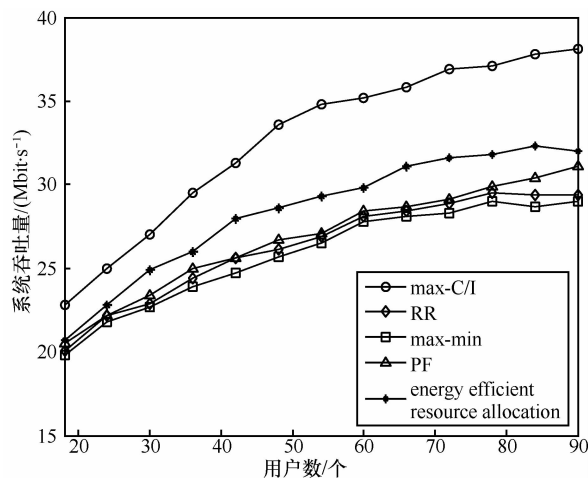


图4 系统吞吐量

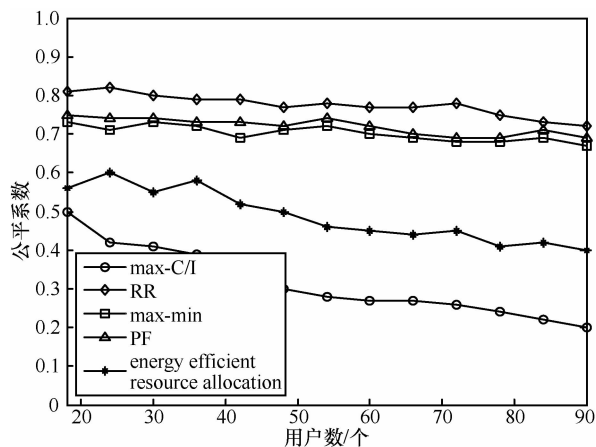


图5 用户公平性

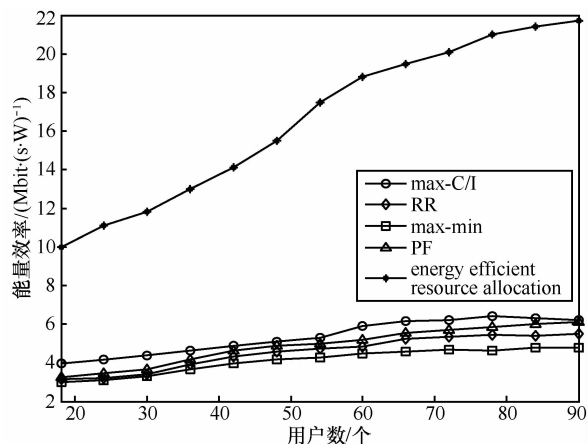


图6 系统能量效率

用户间公平性被衡量为公平系数 (fairness index), 在 0~1 变化。所以, 用户的公平系数越高, 获得的性能越高。轮询 (RR) 分配算法循环地将资源块分配给每个用户, 因此形成了所有算法的公平性上界。最大最小 (max-min) 值分配算法为信道质量差的用户分配更多的

无线资源, 因而保证了用户间的公平性, 但是系统性能会很低。比例公平算法实现了系统吞吐量和公平性之间的有效折中。高效能的联合时-频-功-协作域资源分配算法 (energy efficient resource allocation) 在大大提高吞吐量的同时, 兼顾较高的系统吞吐量性能, 如图 4~图 6 所示。

10 结束语

本文首先给出了一个移动云计算管理框架, 为实现移动终端与云资源的高效信息交换提供了前提和保证。然后, 在深入分析无线通信目标和能量消耗之间关系的基础上, 本文定义了无线单链路空间传输效率, 比较和分析了多种单链路效率度量的含义和数学性质。在分析双层蜂窝网络中的干扰产生源和可用无线资源的基础上, 本文给出了基于 LTE-A (long term evolution-advanced) 系统的无线资源分配分析模型, 同时提出了一种高效能的无线资源管理算法。最后, 设计了一个快速收敛的迭代算法获得了系统能量效率的最优解。仿真分析说明了此资源管理算法可以实现移动云计算系统能量效率和吞吐量的高效折中。本文在总结当前研究现状的同时指出了未来有价值的研究方向, 其中包括能量效率评估准则的多样性和高效的无线资源分配方法的设计问题。

参考文献

- 1 Akhtman J, Hanzo L. Power versus bandwidth efficiency in wireless communications: the economic perspective. Proceedings of IEEE VTC Fall, Alaska, USA, 2009
- 2 Zhang J, Roche de la G. Femtocells: Technologies and Deployment. Chichester: John Wiley & Sons, 2010
- 3 Lopez-Perez D, Valcarce A, Roche de la G, et al. OFDMA femtocells: a roadmap on interference avoidance. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(9):41~48
- 4 Zhao L, Cai J, Zhang H. Radio-efficient adaptive modulation and coding: green communication perspective. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, Budapest, Hungary, May 2011
- 5 Kulkarni P, Chin W H, Farnham T. Radio resource management considerations for LTE femtocells. ACM SIGCOMM Computer Commun Rev, 2010, 40(1): 26~30
- 6 Han C, Harrold T, Armour S, et al. Green radio: radio techniques to enable energy efficient wireless networks. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6): 46~52

- 7 Saraydar C U, Mandayam N B, Goodman D J. Efficient power control via pricing in wireless data networks. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(2): 291~303
- 8 Zhao L, Wang Y, Yang K, *et al.* Nash bargaining solution based joint time-frequency-code-power resource management algorithm for TD-LTE systems. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/dac.2433/full>, 2012
- 9 Chandrasekhar V, Andrews J G, Muharemovic T, *et al.* Power control in two-tier femtocell networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(8): 4316~4328
- 10 Zhao L Q, Zhang C, Hanzo L, *et al.* Power-efficient radio resource allocation for low-medium-altitude aerial platform based TD-LTE networks. *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Quebec City, Canada, Sep 2012
- 11 Zhao L Q, Yi J T, Fumiyuki Adachi, *et al.* Radio resource allocation for low-medium-altitude aerial platform based TD-LTE networks against disaster. *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Yokohama, Japan, May 2012
- 12 Cheng W C, Zhang H L, Zhao L Q. Energy efficient spectrum allocation for green radio in two-tier cellular networks. *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GlobeCom)*, Miami, Florida, USA, Dec 2010: 1~5
- 13 Zhao L Q, Cai J, Zhang H L. Radio-efficient adaptive modulation and coding: green communication perspective. *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Budapest, Hungary, May 2011

[作者简介]



赵国刚,男,西安电子科技大学通信工程学院博士生,主要研究方向为蜂窝网络的高能效基础理论。

赵力强,男,博士,西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室博士生导师,主要研究方向为宽带无线接入、绿色无线通信、临近空间通信与异构网络融合等。在国内外学术期刊、国际学术会议上发表相关论文 70 余篇,其中,SCI 检索的论文 20 余篇、EI 检索的论文 50 余篇,申请国家发明专利 5 项,主持/参与了国家自然科学基金、国家高技术研究发展计划(“863”计划)、国家科技重大专项等纵向科研课题,欧盟 FP6、FP7 等国际合作交流项目,华为基金等横向科研项目。

杨鲲,男,博士,英国 Essex 大学计算机科学和电子工程学院教授,IEEE 高级会员,主要研究方向为多种无线网络技术以及这些无线网络和固定网络之间的融合、普适服务工程、网络虚拟化与 IP 网络管理。已发表超过 50 篇的国际期刊论文和多部专业书籍以及 40 多篇国际会议论文,主持了由英国多个科学研究机构(如 SPSRC、TSB)、工业界(如英国电信)以及欧盟 FP7(如 GEYSERS 项目)等资助的科研项目。

(收稿日期:2014-06-20)

(上接第 31 页)



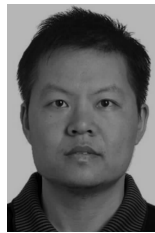
张建辉,男,博士,国家数字交换系统工程技术研究中心副教授,主要研究方向为网络路由技术。



马海龙,男,博士,国家数字交换系统工程技术研究中心讲师,主要研究方向为网络路由安全技术。



王艳红,女,大连环宇移动科技有限公司工程师,主要研究方向为网络高可用性技术。



卜佑军,男,博士,国家数字交换系统工程技术研究中心讲师,主要研究方向为网络数据高速处理技术。

(收稿日期:2014-06-22)