

5G 网络下移动云计算节能措施研究

李继蕊 李小勇 高云全 高雅丽

(北京邮电大学可信分布式计算与服务教育部重点实验室 北京 100876)

摘 要 当今,绿色计算早已成为各行业追逐的目标.在移动云计算市场中,随着云计算服务带来的巨大商业利润和移动用户数量的迅速增长,不断成熟的5G移动技术及将来的市场深入应用,都将进一步引起对绿色移动云计算的新关注.降低移动云计算能耗是实现绿色计算的基础性工作.该文首先对5G下移动云计算能耗问题的研究方式进行分析;其次,评述、分析5G多项关键技术在网络设施与通信节能研究中的现状、存在的问题以及典型5G网络服务模式的案例;然后,分析、对比并总结5G在移动设备任务迁移和云服务中心两个方面的节能表现;最后,指出目前研究中存在的问题,并对未来的发展方向进行了展望.研究表明,5G的出现为实现绿色移动云计算带来了机遇和挑战,今后的工作重点是对5G下移动云计算的节能模型和方法进行攻关,为实际应用提供坚实的理论基础.

关键词 5G;移动云计算;绿色计算;能耗;计算卸载;迁移

中图法分类号 TP393 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2017.01491

Energy Saving Research on Mobile Cloud Computing in 5G

LI Ji-Rui LI Xiao-Yong GAO Yun-Quan GAO Ya-Li

(Key Laboratory of Trustworthy Distributed Computing and Service of Ministry of Education,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract Nowadays, green computing has been the goal that various industries pursue. With the development of mobile cloud computing (MCC) and the coming of 5G, the related energy consumption problems give rise to new and hot attention for green MCC. Reducing energy consumption is the basic work to implement green computing. In this paper, we first analyze the research methods of energy consumption of MCC in 5G. MCC architecture consists of three components: mobile devices, network facilities and communication, and cloud server center. Basing on the effect degree of 5G on the three parts, we adopt the order that followed by network facilities and communication, mobile devices, and cloud server center to extend the discussion about this issue. Second, for the energy-saving research of network infrastructure and communication, we review and analyze the current situation and existing problems of all kinds of key technologies in 5G, and the typical samples of 5G-network service mode. Wireless technology includes wireless transmission technology and wireless network technology. In order to enhance the business support ability of mobile Internet, 5G has introduced many technologies to further tap the potential of spectrum efficiency in the field of wireless transmission technology, such as the large-scale MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) technology, full duplex technology and multi carrier

收稿日期:2016-07-05;在线出版日期:2017-03-21. 本课题得到国家自然科学基金(61370069,61672111)、北京市自然科学基金(4162043)、霍英东基金(132032)资助. 李继蕊,女,1979年生,博士研究生,副教授,中国计算机学会(CCF)学生会会员,主要研究方向为移动云计算、分布式计算与可信服务、物联网. E-mail: ljrokyes@163.com. 李小勇,男,1975年生,博士,教授,博士生导师,中国计算机学会(CCF)高级会员,主要研究领域为分布式计算与可信服务、网络安全、物联网. 高云全,男,1981年生,博士研究生,讲师,中国计算机学会(CCF)学生会会员,主要研究方向为可信服务、物联网. 高雅丽,女,1991年生,博士研究生,中国计算机学会(CCF)学生会会员,主要研究方向为分布式计算与可信服务、移动群智感知网络.

technology. In wireless network technology, 5G will employ more intelligent and more flexible network architectures and networking technologies, for example, hyper dense heterogeneous cell deployment, SDWN (Software Defined Wireless Network) architecture that separates the control and the forwarding, and unified self-organizing network etc. The improvement of wireless technology promotes the change of wireless network service mode, and the typical applications comprise the task-delegation service model based on Ad-Hoc mobile cloud and the dynamic cloudlet model. Third, we analyze, contrast and summarize the energy-saving cases of 5G in terms of mobile task migration and cloud data center respectively. Battery life is an important standard to measure whether mobile devices are energy efficient. In this paper, we divide the related research results into two areas: mobile device resource management and mobile task migration. For the latter, we focus on the service mode, strategy and energy-consumption measurement model of mobile offloading. In cloud server center, we investigate four usual energy conservation methods, which are respectively DVFS (Dynamic Voltage and Frequency Scaling), ODP (Online Dynamic Providing Algorithm), task scheduling and VM (Virtual Machine) migration. Although the 5G has the minimum direct impact on the energy efficiency research of cloud server center, there are still some applications of 5G technology which main goal is to reduce the power consumption in cloud data server. Finally, in view of the three layers architecture of MCC, we analyze the research problems in detail and put forward the future development directions. In a word, this study shows that the emergence of 5G brings the opportunities and challenges to implement green MCC. Thus, the key emphasis in future work will be the theoretical research of the model and method of energy saving of MCC in 5G, which provides a solid foundation for the practical applications.

Keywords 5G; mobile cloud computing; green computing; energy consumption; computation offloading; migration

1 引言

绿色计算^[1]如今已经成为各行业追逐的对象. 文献[2]提到一个有关数据年复合增长率的技术汇报,它对 2010~2016 年这个时间段内全部绿色 IT 市场的数据做了预测,并指出到 2016 年其年复合增长率将增加 40.5%,而同期数据总计将会高出 16 亿. 据 IBM 统计^①,到 2015 年已经有 1 万亿左右的云端设备就绪,大多数因特网用户主要通过移动网络设备访问远程服务器上的基于混合云的应用来完成工作. 而我国政府在 2015 年 9 月的联大会议上明确提出:到 2020 年要实现 40%至 50%节能减排的宏伟目标^[3].

作为一种新型信息服务模式,移动云计算顺应这种时代需求而出现. 近些年随着各种终端设备的广泛应用和其未来不可估计的使用数量,以及移动通信系统及技术的发展,未来注入到移动云计算中

的 5G 技术,将使其快速成长,并能为移动服务带来一系列全新的、热门的研究点^[4]. 未来以 5G 主导的移动云计算应用,在节能降耗方面也向我们提供了新的机会和挑战.

2 5G 下移动云计算的能耗问题

目前,已经开展了许多关于研究云计算能耗问题的工作. 如文献[5]从云计算基础设施角度,将云服务中心领域分为硬件和软件两大类,其中硬件包括服务器和网络设备,软件包括云管理系统和各种应用程序. 然后按照这四个部分分别对云计算能耗研究的成果进行讨论、总结和展望;文献[6]分析了 68 篇关于云服务中心能耗的研究成果,按照节能技术和高效节能方法分别从数据中心服务器、网络、服

① <http://readwrite.com/2010/06/07/ibm-a-world-with-1-trillion-co/>

务器与网络的联合和再生能源技术四个方面对云计算节能研究进行分类评述和总结;文献[7]从虚拟化、系统资源、实现目标和采用的节能措施或方法等几个方面对数据中心能耗研究的多项成果进行了分析讨论;文献[8]对云计算环境中当前用来保存计算机硬件及网络基础设施能量的方法和技术进行了系统分析和分类,并指出未来的一些主要研究挑战;文献[9]对数据中心进行能源效率计算研究调查,并提出云的能源效率管理架构原则,考虑 QoS 期望和设备功率使用特性的节能资源分配策略和调度算法以及一些开放研究挑战,解决这些挑战可以为资源消费者和供应者带来实质性好处;为了使数据中心的能效及性能得到进一步的提升,以各种基础设施的协同工作为研究基础,文献[10]全面致力于云计算环境中动态资源分配和配置算法的开发;文献[11]评估并预测了云计算平台的能效问题;文献[12]对云数据中心的能效技术进行调研和分类研究;文献[13]探讨了云数据中心的数据节能复制技术,由上可知,云服务中心是改善云计算能耗的重点研讨对象。

根据文献[14-18]中关于移动云计算概念的描

述,图 1 展示了移动互联网在云计算应用模式下的总体架构。相较于云计算结构,移动云计算在体系架构上进一步突出了移动设备和无线移动网络的重要地位。在移动云计算中,降低能耗是信息和通信两个方面中的一个强制需求^[8]。移动云计算通过提升网络设施及通信、移动设备和云服务中心的资源节约率,共享和虚拟化处理能力,以求进一步合理地控制系统开销。在移动云计算众多能耗研究成果中,除了一些关注数据中心的节能降耗^[19,20]外,许多成果从移动设备和网络通信两个方面的能耗优化对移动云计算进行节能研究,如文献[21]为了实现绿色移动云计算提出的一种基于动态能量感知的微云模式;文献[22]实现了一个节能的移动云计算任务卸载框架;为保护移动设备能效,文献[23]探讨了有关随机无线信道下的移动云计算能量最优化理论框架;文献[24]针对移动云计算中移动设备和服务器的整个能耗做了优化研究,将能量最小化问题模拟成一个拥塞博弈,从而提出一种博弈论方法。显然,参照云计算能耗优化的研究方法,可以根据图 1 从网络设施及通信、移动设备和云服务中心三个方面展开对移动云计算的能耗优化进行的研究。

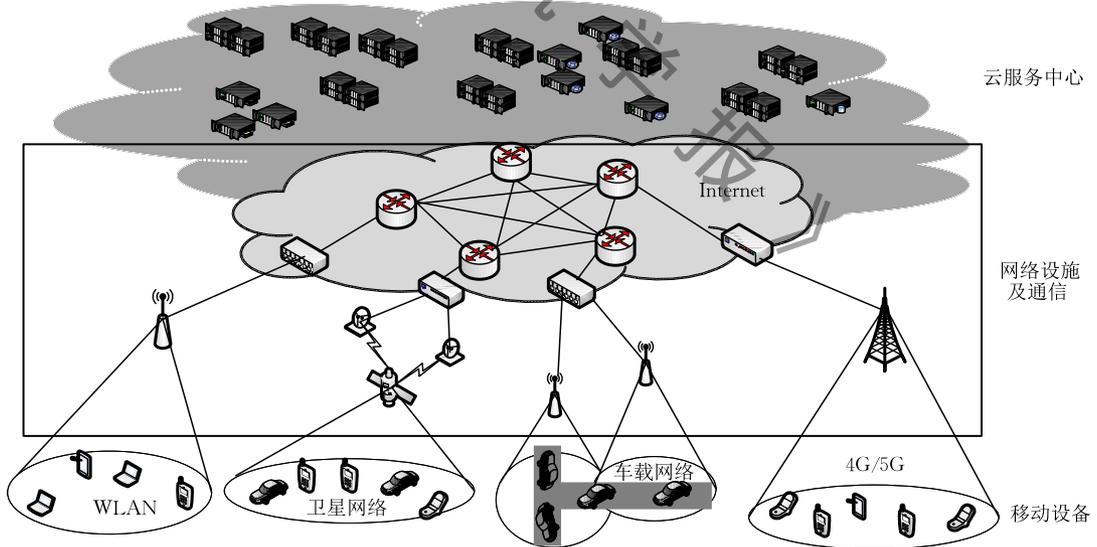


图 1 云计算应用模式下的移动互联网总体架构

以 2014 年的数据流量为基础,思科(Cisco)公司对未来全球移动数据流量进行了预测^①,并在一个有关思科视觉网络指数的白皮书中指出:到 2019 年,全球移动数据业务量将增长到每月 24.3 EB,其中,云应用服务占据整个移动数据业务量的 90%。社会实际需求促使了新一代移动技术——5G 的出现,它具有成本低、能耗低、安全可靠的特点。5G 在带

来巨大便利的同时,随着移动设备的迅速增加和普及,对网络设施、服务以及相关技术都提出了新的需求,未来随着 5G 更进一步的融入到移动云计算模式中,必将对移动云计算的能耗研究也带来了一系列的影响。首先,影响将体现在网络设施及通信的未

① <http://vdisk.weibo.com/s/dGCJpMRG5imI>

来主导系统——5G 自身的技术改进或变革上。5G 是顺应时代需求而出现的。文献[25]曾指出:降低网络能耗是实现 5G 高性能目标至关重要的需求,而 5G 系统高性能的实现主要依靠一些关键技术的实现或改进。网络接入技术(如光载无线技术、高频段通信、云无线接入网、小蜂窝和大规模 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)技术等)、网络技术(如超密集异构网络和软件定义网络等)、机器间(Machine-to-Machine, M2M)通信技术以及先进的波束形成技术等等都是 5G 具有代表性的关键技术,结合超精益的设计,无线电接口上用户数据和系统控制平面的分离,虚拟化的网络功能等特点,促使 5G 相较于 4G 在频谱效率、传输速率、峰值速率、设备连接密度和流量密度等方面得到数十倍以上的提升,使端到端的时延达到 ms 级,保证了用户在速率为 500 km/s 的高速移动时能够正常通信,同时在很大程度上也降低了移动云计算应用中的能量消耗。比如文献[26]对如何构建节能型 5G 移动网络的八种信息中心网络技术:自组织网络技术、超密集异构网络技术、内容分发网络技术以及软件定义网络技术等进行了分析与探讨;为了平衡和优化异构无线网络中的频谱效率、能效和服务质量,文献[27]提出了一个合作型绿色异构网络的系统框架。其次,影响体现在因 5G 高性能技术的实现和应用所引起的移动云计算无线网络服务模式的变化上,即从传统的集中式云服务演化成如今的分散式云服务主导模式,如动态微云模式、雾计算或移动边缘模式和 Ad-Hoc 移动云任务委托服务模式等,这些模式的广泛应用也引起了网络通信能耗的测量因素、计算方法或模型等随之发生改变。第三,影响主要体现在移动设备任务迁移方面。移动设备作为移动通信系统应用的主要参与对象,随着 5G 的出现和应用以及无线异构网络的发展,蜂窝网与局域网的共存得到了进一步的增强,与具有高代价频谱授权的蜂窝技术相比,WiFi 能利用未授权的频谱资源,因此可以为移动设备提供更多蜂窝网业务的机会卸载。同时,5G 无线网络服务模式的改变使 D2D(Device-to-Device)、M2M 的通信得到广泛应用,这将引起移动设备节能措施——移动计算卸载的服务模式及卸载策略等发生变化。如文献[28]根据 5G 中宏蜂窝基站、小小区基站和 D2D 三种计算卸载方式的特点,分析了缓存与计算卸载的关系,提出一个联合移动感知缓存

和小小区基站密度的节能布置方案。文献[29]指出上行蜂窝系统的研究聚焦在最大化上行频谱效率,目的在于降低电池能量受限的移动设备的能耗;下行蜂窝系统及多小区网络主要研究每个用户在服务质量受限下的网络能效的最大化问题。第四,影响主要体现在云服务中心的网络资源供应或获取方式上。云服务中心作为大数据存储基地,为移动云计算应用提供了按需随时存储或获取的根本保证。为了提高移动设备的业务运行效率,作为融合了多种高性能技术的 5G 系统,使云中心的服务承载量下降,即将服务下放到基站、微云或其他移动设备上,从而降低了云服务中心的能耗。如文献[30]对 5G 系统中云辅助移动 Ad-Hoc 网络绿色数据中心的实现进行了研究。结合文献[31-40]等的相关研究内容,5G 系统节能降耗的研究在移动云计算体系结构的三个组成部分中均有体现,特别是网络设施与通信部分,5G 技术性能的提高对其节能研究的影响尤为突出^[25],其次是移动设备任务迁移部分和云服务中心部分。

综上所述,关于 5G 环境下移动云计算节能降耗措施研究的问题,本文按照 5G 对移动云计算体系结构中三个组成部分影响的重要程度,顺次从网络设施及通信、移动设备和云服务中心三个方面进行分析、探讨、对比和总结。

3 网络设施及通信节能研究

网络设施及通信是移动设备之间、云数据中心之间及移动设备与数据中心之间交互的基本保障。网络通信包括有线和无线两种方式。在移动云计算中,有线网络通信指的是云数据中心内部的通信和云数据中心之间的通信;而无线网络通信意指云数据中心与移动用户的通信。关于移动云计算网络设施及通信的节能研究可以按以上标准进行分类,详情如表 1 所示。由于本节重点在于探讨 5G 移动通信系统下网络设施及通信的节能研究,所以此处不再对有线网络能耗问题的研究进行讨论分析。

无线技术包含无线传输技术和无线网络技术。由表 1 可知,无线网络节能降耗的研究主要集中在基础硬件设施节能技术或方案的实现。作为面向 2020 年以后因移动通信需求而发展的新一代移动通信系统,5G 未来侧重于实现与其他移动无线通信技术的无缝连接,并将提供随处可用的基础性业务

表 1 网络设施及通信的节能研究

能耗分类	研究范围	描述	相关文献
有线网络	常规能效	一般的软硬件节能研究, 比如: ECONET 项目 ^① .	[41] [42] [43] [44] [45]
	能耗随负荷的缩放	它最初主要是设计能量感知的网络设备, 即根据业务量负载管理设备功耗. 休眠和速率自调整是两个具有代表性的方法.	[46] [47]
	业务流管理和路由	基于单一设备的能量保护策略, 网络中的能量保存可以通过探索高效节能的业务流管理和路由方法来实现.	[48] [49] [50] [51]
无线网络	常规能效	减少通信网络二氧化碳的释放, 降低移动通信系统能耗, 比如: GreenTouch 项目 ^② 和 EARTH 项目 ^③ .	[52] [53] [54] [55]
	网络框架	从传统的宏蜂窝网络框架进化到 HetNet(超密集异构网络)框架, 它是降低网络能耗的主要方式.	[56] [57] [58]
	能耗随负荷的缩放	无线网络设备可根据负荷情况线性地缩放能耗, 比如: 当组件不用时切换到空闲状态, 它是设备降耗的重要手段.	[59] [60]
	低复杂度处理	使无线通信处理变得更复杂的有限频谱资源容量最大化情况, 比如: 大规模 MIMO 传输、基站协作等.	[61] [62] [63]

以适应快速发展的社会需求和移动互联网应用^[64]. 为了适应移动无线网络的业务需求, 5G 在无线传输技术和无线网络技术方面都有新的突破^[65]. 这两方面技术性能的进一步提高, 使移动云计算应用模式中网络设施及通信效果得到很大改善的同时, 能耗也大大降低, 为移动无线网络节能研究带来了新的机会和挑战. 因此, 分析 5G 在无线传输技术和无线网络技术两个方面的节能研究现状及应用、抽取并总结目前存在的问题、探讨下一步研究的方向是非常有必要的.

3.1 5G 无线传输技术节能研究与分析

在无线传输技术方面, 为了使移动互联网的业务支撑能力有所上升, 5G 引进成效突出的新型多载波技术、大规模 MIMO 技术、新的波形设计技术、编码调制技术及全双工技术等超高效能的无线传输关键技术, 这些技术能够深入挖掘频谱效率以提升自身潜力.

(1) 大规模 MIMO 技术

频谱效率的数倍增长能够促使运营商的利益最大化; 多天线多用户空分技术的出现有助于运营商通过大规模 MIMO 技术实现这一目标. 多天线意味着大规模的天线配置, 多用户指的是基站覆盖范围内的多个移动终端, 后者依靠前者带来的空间自由度, 大规模 MIMO 技术可以大幅度提升频谱效率, 使得后者在同一时频资源上能够与基站同时进行通信; 同时, 它还可以使用大规模天线带来的分集与阵列增益, 提升基站与用户通信的功效. 特别地, 在大规模分布式 MIMO 研究方面, 我国一直走在国际的前列^[66-68].

信道模型、信道评估与信号检测技术、预编码技术、容量和传输技术性能分析等方面是近两年针对大规模 MIMO 技术的主要研究工作^[69-72]. 为了获得

蜂窝网络上行/下行中大规模 MIMO 的天线最佳配置情况, 在非合作多蜂窝 TDD(Time Division Duplexing)系统的上行和下行中, Hoydis 等人^[69]假定每个基站天线数目是 N 个和每个小区有 K 个用户终端是大规模的情况. 结合不相关信道中预编码器/检测器(如本征波束形成限制和匹配滤波器)的优势给系统带来的好处, 并通过对多个实际场景(即 N 相对于 K 不是极其大)的分析得出: 每个用户终端需要多少根天线才能取得具有无限多天线的最终性能极限的 $r\%$, 以及需要最多多少个具有本征波束形成限制和匹配滤波器的天线才能实现最小均方差检测和正规化迫零的性能. 在整个求解目标的过程中, 系统模型将信道评估、导频污染以及每个链接的任意路径损耗和天线相关性等作为主要考虑因素并进行了相关计算. Saif 等人^[70]对多用户 MIMO 广播信道进行研究, 其中有 M 个单天线用户和 N 个发射天线, 且要求每个天线发射恒包络信号: 因为恒包络信号有利于高能射频功率放大器的应用. 此项研究在一定温和的信道增益条件下, 对于固定的 M , 即使存在严格的每个天线恒包络约束, 阵列增益也是可以实现的. 并且这个研究采用寻找接近最优恒包络发射信号的预编码方案, 使得系统运算复杂度降低, 很大程度上节省了系统能量. 文献^[71]探究多小区干扰受限蜂窝网络中的信道评估的情况. 采用多天线系统, 这样的系统通过每个基站上的每小区波束形成方式处理多小区干扰问题. 由于导频污染对信道评估会造成负面影响, 构成了整体性能的主要瓶颈. 作者采用信道评估阶段小区间低速率协作的方式解决以上问题, 该协作方式利用了额外次要的关于用户信道

① <http://www.econet-project.eu/>

② <http://www.greentouch.org/>

③ <https://www.ict-earth.eu/>

的统计信息,它提供了一种鉴别跨干扰用户(甚至有密切相关导频序列)的有效方式.结果显示,在大数目天线系统中,导频污染影响在一定的信道协方差条件下完全消失.文献[72]探讨了一个适用于大规模 MIMO 系统的软启发式检测器.该检测器工作在 bit 级别且包含三个阶段,每个阶段均对 bit 进行检测和处理,检测器的工作过程主要由具有不同性能和复杂度的两个软启发式算法完成.

尽管大规模 MIMO 术在 4G 的基础上有可能将频谱效率和功率效率再提升一个量级,但依然存在一些问题.① 缺乏广泛认可的信道模型.这主要因为对信道模型进行理论建模和实测的研究工作比较少;② FDD(Frequency Division Duplexing)系统和高速移动应用场景使得目前的信道传输方案难以实施.其原因在于常用的 TDD 系统中用户与基站间存在较大差距的天线数量、难以利用的互易型上下行信道、高复杂度的预编码与信号检测运算三个方面;③ 信道容量及传输方案的性能分析结果存在明显局限性.主要因为在分析时大都假设独立同分布信道,从而将大规模 MIMO 的瓶颈问题认为是导频污染.因此,对一系列与信道相关的研究进行深入分析和改进是非常必要的,比如:研究更加符合实际的信道模型,并分析它在实现一定复杂度和适度导频开销下可达到的功效及频谱效率、对信道容量产生的影响、最优的无线信道信息传输和获取方法、各种联合调配无线资源的方法等,均可以作为研究提升大规模 MIMO 技术性能的潜在领域.

(2) 全双工技术

全双工技术是在外围设备与微处理器之间采用接受线和发送线各自独立工作的方式,使数据在两个方向上同时进行传送操作,是同时、同频进行双向通信的技术.在理论上,它可以增加频谱使用的灵活性,因为它具有可将频谱利用率翻倍提升的巨大潜能.同时,随着信号处理技术和器件技术的不断改进,为了充分挖掘无线频谱资源,全双工技术已成为 5G 系统的一个重要研究方向.

尽管全双工系统实际上比半双工系统可以取得更大的速率,但全双工系统并未摒除来自硬件和误操作引起的自干扰信号的负面影响.为此,文献[73]提出一个信号模型,它可以获取并处理一些主要干扰因素,比如:振荡器相位噪声、混频器噪声和模拟-数字转换器的量化噪声等.该文献对速率增益区域也做了详细研究,最后实现全双工无线通信系统中速率增益区域与设计的折衷.实验证明,对于小发射

功率的应用,这种折衷可以取得比半双工系统近似 1.2 至 1.4 倍的速率.针对自干扰问题,文献[74]在应用软件无线电的全双工通信系统中,提出以模拟无线电硬件总量为界的容量比较方式,通过注销重复利用的无线电,使系统自干扰影响降到最低.在全双工传输中双向信道不完美的自干扰消除效果影响下,文献[75]制定了最优的动态功率分配方案,其目的是为了实现无线全双工总速率的最优化.文献[76]在干扰受限的多跳网络中对全双工在延迟和吞吐量方面的影响做了研究.

全双工技术为 5G 性能提升带来巨大好处的同时,也伴随一些挑战性的问题:① 全双工技术性能测试实验存在局限性,比如无法实现在大量终端和大量基站组网情况下的实际测试;② 天线抵消技术^[77,78]效果不理想,不能适用于 MIMO 系统;③ 缺乏在更合理的干扰模型基础上对半双工和全双工技术在 MIMO 条件下进行全面深入的性能分析等.所以,针对大动态多小区覆盖下的全双工技术,需要深入研究的主要内容包括:干扰消除技术、容量分析、资源分配技术、组网技术及大规模组网条件下的实验验证、与 MIMO 技术的结合等.

(3) 滤波器组多载波技术(Filter-bank Based Multicarrier, FBMC)

干扰消除或优化和空口频谱的灵活利用等是 5G 系统的重要问题.采用多个载波信号的多载波通信技术可以解决码间干扰问题,FBMC 作为 5G 系统多载波方案的一个重要选择,吸引了诸多学者的研究兴趣^[79-82].因 FBMC 容易设计,计算效率高,且具有能提升频谱利用率和抗频率选择性衰落的优势,其调制技术也被广泛应用^[83].

随着未来 5G 的普及,FBMC 技术的节能研究重点在于设计符合 5G 需求、以滤波器组为核心的算法.由于调制和原型两种滤波器的设计可以决定 FBMC 技术中多载波的性能,因此,对这两种滤波器的设计要求较为严格.而事实上类似于改变原型滤波器的长度以满足特定频率响应的设计或硬件实现都非常难,并且复杂度也很高;同时,认知无线电^[84]作为解决频谱资源匮乏、非授权频段和授权频段利用率不平衡的关键技术,伴随近几年的理论发展,进一步推动了对 FBMC 技术的研究,使其更加符合 5G 系统的要求,值得深入.

3.2 5G 无线网络技术节能研究与分析

在无线网络技术方面,超密集异构小区部署、统一的自组织网络、软件定义无线网络等将被 5G 作

为更加智能和灵活的组网技术及网络架构所使用。

(1) 超密集异构网络技术

文献[85]指出:在未来无线网络的宏基站笼罩范围内,各种低功率节点(具有各类无线传输技术)的布置密度将是如今的10倍以上,且支持每25000个移动终端可同时共存于1平方公里的范围内^[86],站点及激活终端的数目将来甚至持平,即每一个终端都拥有一个小基站^①。Bhushan 等人^[87]讨论了网络致密化的优点,其中包括空间致密化,小小区的密集部署和频谱聚合是对5G网络在不同频段最大化无线频谱的利用;而且,在这个密集的网络架构中,小小区的密集部署仅限于室内场景,室外用户依旧处在传统的宏蜂窝中,即致密化无线网络是对现有蜂窝网络的补充。

5G网络是多种无线接入技术(现有的各种无线接入技术及其后续演进,如LTE、WiFi、4G和5G等)的共存,既有承担热点覆盖的低功率小基站,也有担任基础覆盖的宏基站。这些基站一般属于不同的运营商或用户,具有不同的网络架构,且多个网络会出现交叉覆盖等特点。结合5G小小区网络中回程业务面临的挑战,文献[88]对集中式和分布式无线回程网络架构进行了对比,结果表明,分布式无线回程网络架构更适合未来采用大规模MIMO天线和毫米波通信技术的5G网络。在5G移动通信系统中,毫米波通信一直被认为是小小区网络中无线回程的解决方案。大多数毫米波回程技术研究专注于天线阵列的设计和收发器的无线电频率元件,如波束形成和调制方案。文献[89]提出一个采用自适应子空间采样和分层波束码本的高效光束对准技术,且在小小区网络中实现。文献[90]评估了无线回程中毫米波频率上的短距离和中距离链路的可行性,并且也分析了收发器架构和技术的需求。文献[89]和[90]的实验结果表明,毫米波技术的引入及改进,很大程度上提高了5G网络的频谱性能。

5G中超密集异构网络带来了巨大利益,但也激发了一连串的问题,比如:①不同干扰类型的共存问题。由于多层次网络覆盖的存在,5G网络中的干扰类型一般分为层间的和同层的,前者指不同覆盖层次之间的干扰(共享频谱)和同一种无线接入技术之间的干扰(同频部署);因此,为避免性能的损伤,实现多层次覆盖和各种无线接入技术的共存,需要寻求降低以上所有干扰的方法^[91];②因存在于邻近节点中的多个干扰源在强度上非常接近,使得5G系统不能

直接使用目前比较成熟的干扰协调算法,比如:面向单个干扰源的算法;③超密集网络部署的存在,导致无线回传网络也变得越来越庞大和复杂,利用和接入链路相同的频谱及技术进行回传,能够灵活地部署节点,并降低部署成本,这是一个解决此问题的重要研究方向;④在超密集型小区部署中,小区间无明显的规则分界,通常会存在同一区域被多个小区覆盖的情况,当智能设备移动时,其频繁在小区间进行复杂的切换操作,致使其服务性能得不到保障。因此,需要开发新的更适合实际应用场景的切换算法;⑤因为不同区域大量节点的随机性关闭和开启,引发干扰图像和网络拓扑无规则的动态性大范围变化,因此,研究一些网络动态部署技术以适应这种时间和空间的动态变化是极其有必要的。

(2) 自组织网络技术

Ad-Hoc网络具有无中心化和节点之间的对等性、自发现、自组织、自动配置和自愈的特点,它原先被特指为自组织网络,但是随着拥有类似特性的网络的出现,比如:P2P(Peer-to-Peer)等,其概念趋向宽泛化。目前,将Ad-Hoc网络、IP网络和P2P网络均归为自组织网络。个人智能系统和自组织智能系统是自组织网络技术的研究目标,为此,它着重研究自组织情况下的一系列网络技术(比如:自组织的计算网、移动网、传感器网和存储网等),人机交互个性化界面技术,先进的信息安全系统,高可信且高弹性的数据网络,以及低成本的实时信息处理技术等。

与现有网络相比较,采用了复杂的无线网络架构和无线传输技术的5G系统使得网络管理更复杂,5G网络性能的保证迫切需要网络的深度智能化,即5G对自组织网络技术提出了更高的要求^[92]。目前,应用5G技术的自组织网络存在的问题和挑战:①5G的网络节点部署方式,导致5G网络在网络拓扑结构、负载分布、干扰情况和移动性等方面与现有无线网络都存在明显的区别,因此,运营商面对的难题是网络节点的自动配置和维护;②因用户移动性和低功率节点的随机开关等引起的干扰源的不稳定和不确定,以及干扰源可能存在多个的问题,使得优化干扰协调技术难度增加;③必须优化网络动态部署技术,比如:优化无线资源调配和小站点的半静态与动态的开关等,目的在于使其适应业务环境(空间和时间)的动态变化;④为了避免频繁切换和优化选择切换目标小区,可以使用双连接等形式保

① <http://www.qualcomm.com/1000x/>

证移动的平滑性;⑤为了实现智能化的无线回传网络,可以借助自组织网络功能解决其规模庞大、结构复杂的问题。

(3) 软件定义网络技术(Software Defined Network, SDN)

SDN 是将网络虚拟化的一种技术,它把一个软件层置于网络管理员和实体网络组件之间,使网络管理员不必手工配置物理的接入网络设备和硬件,而只需通过软件接口调整网络设备.它类似于虚拟化服务器和存储,目的在于简化维护和配置操作,但作为网络解决方案又不如后者完善.虽然 SDN 存在诸多的好处,但它还不是一项成熟的技术,因为主要的技术厂商还没有为所有的网络产品达成互操作的标准.但这也并不意味着 SDN 不值得研究.恰恰相反,目前,资源分片和信道隔离、监控与状态报告、切换等关键技术是 SDN 在无线网络中应用的技术挑战,这些研究刚刚开始,还需要深入进行。

将 SDN 的概念引入无线网络,形成软件定义无线网络(Software Defined Wireless Network, SDWN),是无线网络发展的重要方向^[87,93-95].目前,SDWN 仍处于初步研究阶段,在多个方面吸引了许多研究人员的关注.OpenRoad^[96]是第一个关于 SDWN 的研究.它设想通过从底层物理基础设施上分离网络服务,用户能自由地在任意无线基础设施之间移动.而且,他们提出了一种基于 OpenFlow 的开放和保守兼容的无线网络基础设施,并部署在大学的校园里^[97].另外也有一些关于 SDWN 的研究集中在底层无线网络技术,如 OpenRadio^[98]提出了一种可编程无线数据平面,它在多芯硬件平台上实现,用于连续无线网络演进.OpenRF^[99]提出了软件定义跨层的结构,用于管理当今具有商业 WiFi 卡的网络中的 MIMO 信号处理.OpenRF 采用 SDN 理念,使接入点能控制物理层的 MIMO 信号处理,例如干扰置零,相干波束形成和干扰对齐.软件定义的无线接入网络也是 SDWN 的一个有吸引力的研究方向,因为无线接入网络给移动终端用户提供无处不在的无线连接并且集成了移动和无线的功能.SoftRAN^[100]就是一个无线接入网络的软件定义集中式控制平面,它通过引入虚拟大基站实现.除此之外,还有很多研究关注软件定义 LTE 网络核心网^[95]、设备供应商^①、Ad-Hoc 网络^[87]等方面。

通过以上及相关文献可知,SDWN 在如下几个方面面临一定的考验和挑战:支持异构网络、跨层软件定义、控制策略设计、公开接口、实时移动性、可扩

展性和虚拟机迁移等,同时这些也为我们在 SDWN 方面的研究指明了方向。

3.3 无线网络通信典型应用分析

无线技术的改进,推进了无线网络服务模式的改变,以下两个是目前比较典型的模式应用。

(1) Ad-Hoc 移动云任务委托服务模式

基于 Ad-Hoc 移动云的任务委托服务,Huerta-Canepa^[101]提出了一种使用移动设备作为虚拟云计算提供者(Mobile Device as Virtual Cloud Provider, MDaVCP)的方法,其框架如图 2 所示。

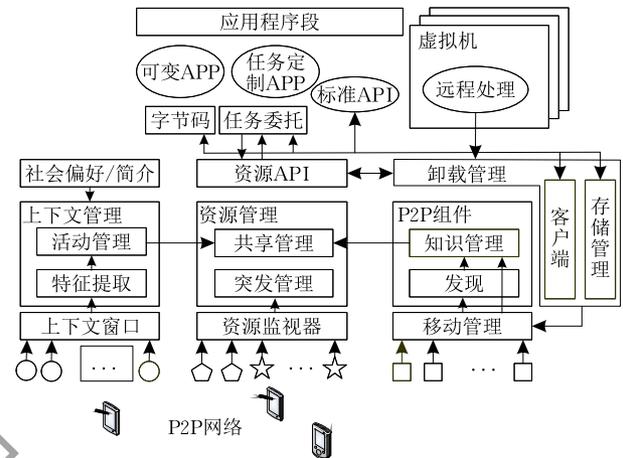


图 2 Ad-Hoc 移动云框架

虚拟云提供者的创建和使用过程是非常简单的.一个处在稳定状态的用户想要执行一个任务,如果该任务需要消耗比设备本身可用资源更多的资源和能耗,那么系统需要对该设备附近的节点进行监听.如果存在可用节点,系统会中断应用程序的装载并修改应用程序,以便可以使用虚拟云来运行.为了满足以上需求,MDaVCP 必须做到:①进行资源监测和管理以至于识别出一个任务何时不能在本地移动设备上执行;②与已经存在的云 APIs 无缝集成;③具有适合于移动设备的分离和卸载模式;④寻找具有相同或相似目标用户的活动检测功能;⑤自发交互的网络支持;⑥保存中间结果的超高速内存缓冲模式.MDaVCP 应用使得 Ad-Hoc 网络成为了一个轻量级的、资源友好的、节能的自组织无线网络框架。

(2) 动态微云模式

动态微云模式(Dynamic Cloudlet(DCL)-based Model)是近些年网络节能研究的一种典型服务应用模式.Gai 等人^[21]提出一个基于微云的动态节能移动

① http://www.huawei.com/ilink/en/solutions/broader-smarter/morematerial-b/HW_204206

云计算模式(Dynamic Energy-aware Cloudlet-based Mobile Cloud Computing, DECM),即利用动态微云模式解决无线通信应用中产生的额外能耗问题.图 3 展示了 DECM 的概念模型.

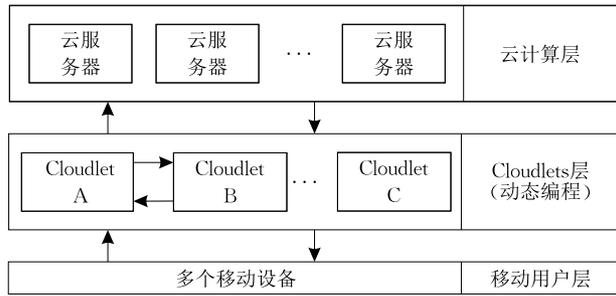


图 3 DECM 概念工作流程模型

在 DECM 中,Cloudlet 作为一个连接移动设备和云服务的中间层,起到一个媒介的作用,主要执行业务逻辑判断.因动态规划功能被嵌入到 Cloudlet,所以 Cloudlet 也称为动态 Cloudlet. DECM 的目标是找到在一定的时间限制内产生最小能耗的访问路线.整个能耗的计算与 Cloudlet 的总数、每个节点的时间代价、节点在某条方法路线上的服务性能水平和请求时传送服务的时间长度有着密切的关系. DECM 就是利用在移动设备和云中心之间加入用于完成业务逻辑功能的动态 Cloudlet,减轻了移动设备的负担,并降低了能量消耗;其不足之处主要在于实验仅采用单个服务请求进行测试,测试效果在客观普适性方面有一定的限制.

综上所述,在无线网络中,容量需求的增加促使异构网络架构向“宏蜂窝控制覆盖区域,小小区提供大部分容量”的框架模式转变.除了提供高容量外,这样的框架还具有降低网络能耗的巨大潜能.无论在学术方面还是工业方面,这种有效的异构网络都是一个非常值得研究的领域.为实现经济高效的小

小区部署,最近的研究主要集中于提供无线回程与能量采集,因为回程和功率是两个显著的成本因素.而空闲模式控制的改进是能提高大量小小区能源效率的另一个重要研究范围.此外,对于宏蜂窝和微蜂窝,提供给负载更有效的功率和提高功放效率也尤为重要.同时,当小小区向更小模式发展的时候,处理复杂度成为能耗的一个限制因素.因此,低复杂度检测与编码算法和低功耗处理器也是进一步减少无线网络能源消耗的一个重要研究领域.而 5G 中高效节能的无线传输技术和无线网络技术可以促使以上这些研究的快速实现.

4 移动设备的节能研究

电池寿命是衡量移动设备是否节能的重要标准.当今,移动设备配备有类似定位服务和社交网络等丰富的移动应用程序,这些应用能够消耗很大的能量,缩短电池寿命.然而,电池技术的发展速度无法匹配移动设备上其余硬件组件的革新效果,它难以满足资源饥渴型移动应用的需求.因此,从移动设备其他方面进行节能研究非常有必要.文献[102]调研了从 1999 年至 2011 年 5 月之间的移动设备节能解决方案.根据各项成果提出的最优化类型将其划分为五个类别:节能操作系统、能量措施和功效模型、用户与应用和计算资源的交互、无线接口和协议的最优化、传感器优化管理和计算卸载.文献[103]指出,在软件架构方面,移动云计算使用基于云的移动扩展方式实现移动设备的节能降耗,基于云的移动扩展的主要方法包括移动计算卸载、多层编程、实时云流媒体和远程数据管理四种.综合上述分类方式,有关移动云计算中移动设备的节能研究,本节将其划分为两个范围:移动设备资源管理和移动任务迁移,详情如表 2 所示.

表 2 移动设备节能研究

研究范围	节能方法	描述	相关文献
本地资源管理	节能移动操作系统	通过移动平台和应用软件的协作统一对资源和能量进行管理.	[104] [105] [106] [107] [108] [109] [110] [111]
	能量措施和功率模型	从硬件组件能量消耗方式的角度建立节能模型或措施.	[112] [113] [114] [115] [116]
	用户与应用程序和计算资源的交互	通过观察用户何时、何地、如何消耗电池电量及何时具有充电的机会,确定电池充电周期和用户资源需求,设计相应节能系统.	[117] [118] [119] [120] [121] [122]
	无线接口与协议优化	通过对协议栈的每一层利用不同的功率状态实现更有效的无线接口(即跨层优化).	[123] [124] [125] [126] [127] [128] [129] [130] [101]
	传感器优化管理	传感器包括 GPS、基于网络的定位系统及具有不同分辨率和功率需求的定位加速度计,主要研究能耗和精确度的折衷.	[131] [132] [133] [134] [135] [136]
移动任务迁移	移动计算卸载	将移动设备上的计算工作迁移到云、微云或其他设备执行的节能研究中.	[137] [138] [139] [140] [141] [142] [143] [144] [145] [146] [28]

移动任务迁移作为移动设备实施节能的一项重要举措,主要依赖于计算卸载实现.移动计算卸载是识别、分离移动应用的资源密集型组件并将其迁移到基于云的资源上的过程^[103],该过程主要包括任务如何分割、何时卸载、卸载到哪里执行三个部分,它是实现延长移动端电池寿命和提高其计算能力的主要措施^[147].移动计算卸载的完成一方面依赖于移动设备上各个本地资源的相互协作和支持,比如:节能移动操作系统 ErdOS^[104](Android OS 的扩展)、Odyssey^[148]或 ECOSystem^[149],无线接口^[125],传感器^[55]等.即移动计算卸载借用本地资源的能耗信息进行建模,比如:TDM(Ternary Decision Maker)模型^[139]和 MDP(Mobile Device Power)模型^[141].另一方面移动计算卸载可否顺利完成基本上主要依赖网络条件.结合 5G 的特征及相关文献可知,5G 下移动设备节能降耗研究主要集中在移动设备计算卸载方面,比如:文献[28,137-146]等.因此,本节先分析和评述一些与 5G 相关的移动计算卸载节能研究成果并在基本信息方面进行了比较,然后总结 5G 在此方面的关注点,给出未来的研究方向.

4.1 5G 下移动设备任务迁移案例分析

在众多的移动云计算研究中,传统移动云框架是基于集中式的云计算,如文献[150]提出了一种基于集中式云计算的辅助药物推荐系统.但是,随着不断增长的移动数据量,集中式云架构具有更高的负荷和更长的回程链路延迟^[143],并且,卸载密集型计算任务到云端和处理结果返回的通信代价也会增加.5G 网络技术为这些问题带来了新的解决办法:如文献[151]考虑了用户终端和小小区基站的计算能力;文献[143,152-154]考虑了卸载计算任务到移动边缘云.通过对比,在 5G 超密集型蜂窝网络中使用小小区基站和用户终端来解决计算卸载的问题,其性能更优越.近两年相关研究成果如下:

(1) 移动卸载服务模式

随着各种各样的网络资源在通信、缓存和计算等方面的普遍应用,急需一些新兴技术以满足 5G 网络中用户体验质量不断增长的需求^[155-161],尤其是物联网^[162,163]和健康医疗系统^[164].异构蜂窝网络^[165]的出现恰好满足以上需求,它由宏蜂窝基站、智能终端和小小区基站组成.考虑到传统集中式移动云架构的高负荷和高回程链路延迟以及终端移动性的特点,文献[28]探讨了缓存与计算卸载之间的区别与联系,并根据宏蜂窝基站、小小区基站和 D2D 三种计算卸载方式的优缺点,提出了一个混合计算卸载设计:联合移动感知缓存和小小区基站密

度布置方案.该方案紧密结合 5G 的要求,根据一定的概率模型,分别计算宏蜂窝基站、小小区基站和 D2D 三种应用场景会提供服务的概率,通过对比概率值大小进行选择,这种方式充分考虑了用户的移动性特点.同时,该方案还重点关注缓存和通信能耗的计算,并给出详细的能耗计算模型,使得最终结果更符合实际情况.为了降低移动任务迁移过程中的能耗,Chen 等人^[137]根据 5G 系统中移动云计算服务模型的特点,对 Ad-Hoc Cloudlet 中计算卸载适用的服务模式:RCS(Remote Cloud Service)和 CCS(Connected Ad-Hoc Cloudlet Service)进行了研究,提出一个全新的计算卸载适用模式:OCS(Opportunity Ad-Hoc Cloudlet Service)模式.该模式主要依据 5G 密集型小区部署的特征而提出,其主要优势在于不限制用户移动的同时,利用机会连接^[166]实现一个计算节点和多个服务节点之间的交互,以达到通过高效计算卸载实现节能的目的.该模式事先设定一个计算任务能被分割成多个子任务,根据特定的应用程序,子任务互不相同或有唯一标识,且每个服务节点仅仅只能运行一个子任务,当计算执行产生相对较长的时延时,在计算节点和服务节点的一个较短连接期间能够完成一个子任务的内容传送,且不考虑包的丢失和网络中传送大量数据引起的通信开销.这些设定会在很大程度上影响 OCS 模式的实际应用效果,并且它也未考虑移动设备空闲时的能耗和详细的通信干扰计算.

(2) 移动卸载策略研究

Chen^[138]提出了一种分散式计算卸载博弈(Decentralized Computation Offloading Game, DCOG)方法实现移动设备的能效保护.DCOG 模型主要利用分散式计算卸载博弈的有限步改善属性方法,使得在一个称为决策时间槽的时间段内只有一个移动设备用户改善他的计算卸载决策.显然,使用分散式计算卸载机制能为多个并行移动设备用户提供相互都满意的卸载决策结果,这是一个多用户合作博弈的过程^[167].DCOG 采用通信和计算的能耗与执行时间的加权和最小化作为卸载决策目标,在能耗计算中详细考虑了因 5G 密集型小区部署引发的干扰计算问题,并使用博弈方式决策计算卸载是否要继续.DCOG 的不足在于:第一,研究的应用场景采用近似静态的情况,即在一个计算卸载期间内,所有参与的移动设备用户保持不变,而两个卸载期间所参与的用户可以不同.第二,能量消耗和执行时间开销的权重取值具有主观人为性,不能很好地反应客观事实.第三,在执行干扰计算时,未考虑 5G 多小区协作中不同情况下干

扰计算模型的不同。

移动边缘计算是由国际标准组织“欧洲电信标准化协会”提出的一种技术,它在 5G 演进架构的基础上,深度融合了互联网业务和基站,具有低延时、更为遍及的地理分布、位置感知、适应移动性的应用以及支持更多的边缘终端的明显特性,且能使得移动业务部署更加方便,满足更广泛的节点接入。针对计算集中式最优化的 NP 难题,文献[143]采用博弈论方法分析、设计和实现了一个分布式计算卸载算法,它可以实现纳什均衡,推导出收敛时间的上限,并在两个重要性能指标方面量化了针对集中式求最优解的有效比率,这是一种适用于移动边缘计算的有效计算卸载模式,重点关注在移动边缘计算中在多通道无线干扰环境下多用户的计算卸载问题。对于干扰计算,作者依然采用文献[138]中用过的模型,但这一点不符合 5G 网络中因密集型小区部署和多小区协作而导致的干扰计算模型分情况计算问题,而干扰计算对网络数据传输速率起决定作用。

(3) 移动卸载能耗测量模型

为了评估应用程序在本地和云端执行时的能耗,Ali 等人^[141]提出一个移动设备功率(Mobile Device Power, MDP)模型,其中能耗评估提供输入来决定应用程序在运行时哪一部分将被卸载。为了支持基于能量的动态卸载,MDP 模型使用 AIOLOS 框架^[168]实现 Android 手机和远程云设施之间的组件卸载^[169]。图 4 展示了基于节能动态卸载方法的能量消耗模型。

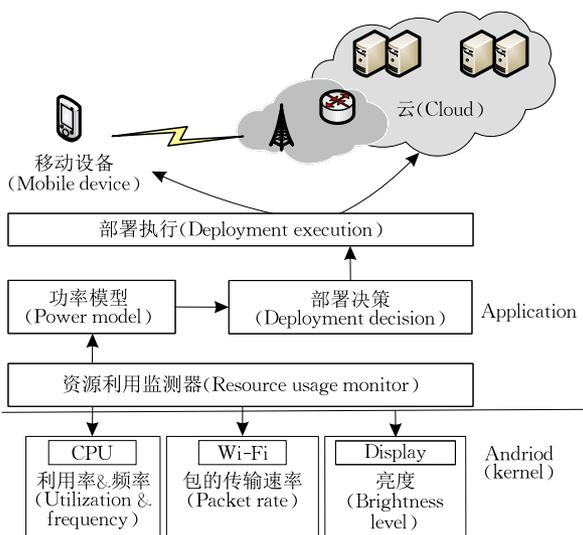


图 4 MDP 节能动态卸载框架

MDP 模型将 CPU、Memory、Display、WiFi 四个方面的实际能耗作为评估是否卸载的基本标准,考虑因素具有全面性和客观性。能耗模型中所用参

数的值都是通过移动设备上的一个功率监测器实际测量得到,具有客观实时动态性。该模型无需事先分割代码,节省开销。其不足在于没有明确给出 CPU、Memory、Display、WiFi 四种能耗之间的关系函数 E 。

Lin 等人^[139]提出了一个在后台运行的移动应用:“三元决策”(Ternary Decision Maker, TDM)省时节能卸载框架。“三元”指 CPU、GPU (Graphics Processing Unit)^[170]和 Cloud,是移动应用程序可能被执行的 3 个位置,图 5 显示了其应用执行的流程。

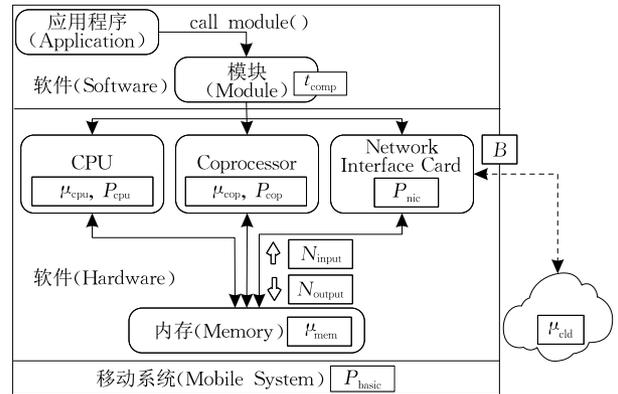


图 5 应用程序执行流程

TDM 框架不用事先对任务进行分割,即不会有分割的开销生成,在移动应用程序执行期间动态决定某模块是否要分割且分割后卸载到哪个目标运行;其总代价函数客观地综合考虑性能和能耗的比重,尽可能将影响决策的主要因素都考虑到。该方法适合于所有 Android 系统的移动设备,且不用再配备额外的硬件设备。其不足之处:第一,未考虑在获取影响因素值时产生的一定能量开销;第二,TDM 的准确性没有在其他不同的移动设备、移动应用及网络环境中取得验证,也没有考虑安全性等问题。

事实上,文献[139]和[141]建立的无线网络能耗模型与 5G 网络没有直接关系,完全是从移动设备本身的硬件能量消耗情况作为研究出发点,但可以考虑作为 5G 网络技术应用成熟后的一种移动计算卸载能耗测量模型使用。

(4) 其他

考虑线程级别的代码卸载,Khoda 等人^[140]提出了一个“ExTrade”(Exact and Tradeoff decision making system)卸载决策系统,其框架如图 6 所示。ExTrade 将 5G 的特征参数充分考虑到卸载决策计算的因素中;时间和能量的节余权重根据电池余量计算,具有更高的自适应性;使用拉格朗日乘子解决多个优化目标间的非线性关系,使结果更具客观性;

由于环境和应用的时刻动态变化性,预估执行时间值使用回归统计方法,这使最终决策结果具有更高的准确度.其不足之处主要在于实验中对 5G 系统的一个移动设备仅使用了一个云服务器,这使得卸载任务时移动设备没有办法选择有更好服务性能的服务器.针对基于小小区的 LTE 网络,文献[142]提出一个无线资源调度和计算卸载联合优化框架.通过利用它们在信道条件和应用程序属性上的认识,能够适应在本地处理、卸载和保持空闲三个状态之

间处理的决定.其中:移动用户使用附近具有一定计算能力的小小区基站(SCeNBs)提供的服务,以达到使用户终端上通过本地或远程方式运行应用程序的平均能耗最小化,且满足应用程序的平均延迟约束的目标.根据离线动态编程方法,为找到最优无线调度——卸载策略,针对目标设计确定和随机两种解决方案.而且,在卸载计算中充分考虑通信模型的干扰问题,并使用确切的本地处理和卸载计算的能耗模型.

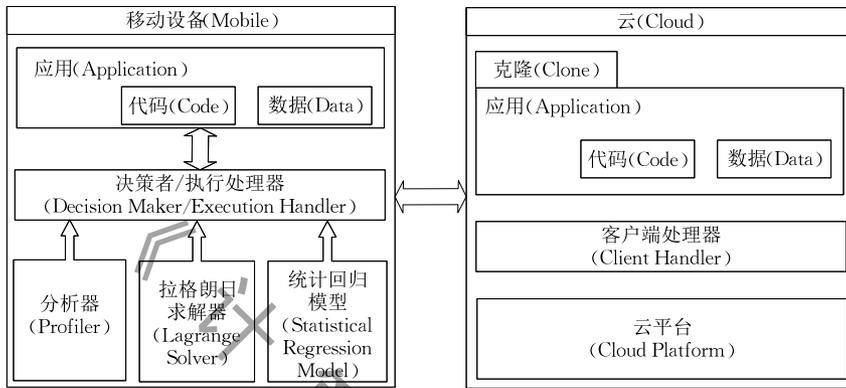


图 6 ExTrade 系统框架

4.2 5G 下移动任务迁移节能研究分析

表 3 是对 4.1 节中列举文献能耗研究模型的分析比较.其中:能耗研究考虑因素是指移动云计算整个应用过程中大部分研究使用的、可能会产生能耗的指标因子,其中 D2C(Device-to-Cloud)指移动设备与云(包括小小区基站和宏基站)的通信;其他设备指其他移动或固定设备;研究对象粒度指研究方法中使用的操作对象粒度级别;而代码是否事先分割和卸载目的地两个指标主要是为使用计

算卸载方式降低移动设备能耗所设置的;各个研究方法在计算能耗或能耗相关因素时,会采用设计新模型、新模式或提高算法等方式,考虑到这些模式或算法本身是否还可以提高、完善,增加了指标“可扩展性”;关于这些模式或算法是否可以适用到任何通信技术的移动云计算环境中,增加了指标“适用性”;为了考察这些模型在研究时是否考虑符合 5G 特征的要求,增加指标“与 5G 相关性”的比较.

表 3 移动任务卸载能耗研究各文献参数分析对比

文献	能耗研究考虑因素								研究 对象 粒度	代码 事先 分割	扩展性	适用性	与 5G 相关性	卸载目的地
	移动设备		云服务器		D2C 通信		其他代理							
	空闲	执行	空闲	执行	上传	下载	执行	通信						
[28]	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Task	Yes	High	High	High	Cloud, Cloudlet, Other Mobile Devices
[137]	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Task	Yes	High	High	High	Cloud, Cloudlet, Other Mobile Devices
[138]	No	Yes	No	Yes	Yes	No	No	No	Task	Yes	Medium	High	High	Cloud, Cloudlet
[143]	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	No	Task	Yes	Medium	High	High	Cloud, Cloudlet
[141]	No	Yes	No	No	Yes	No	No	No	Method	No	Medium	Medium	Low	Cloud
[139]	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	Module	No	Medium	Medium	Low	CPU, GPU, Cloud
[140]	Yes	Yes	No	No	Yes	No	No	No	Thread	Yes	Medium	Medium	High	Cloud
[142]	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	No	Task	Yes	High	High	High	Cloudlet

综上分析与对比可知,在传统的宏蜂窝网络中,能量以一种相对聚焦的方法传递,基站与移动设备之间的距离非常大,卸载计算任务或结果返回时需要相当高的传输功率.针对此问题,5G 网络采用密

集型小区部署方案,利用小小区为用户卸载提供服务.和移动计算卸载相关的小小区基站密集型部署有两个优点:第一,它能降低计算卸载和整个无线访问通道延迟的传输功耗,特别是能降低几个数量级

的路径损耗,直到传输功率不在限制因素的范围;第二,它能增加移动设备在短距离范围内找到接入点的概率.因此,如果一些小小区基站被赋予了额外的云功能,无线通信和计算资源的可扩展性必会有所改善.目前,5G 网络密集型小区部署方案主要引起了移动计算卸载服务模式的改变,比如文献[137]和[28].但是 5G 网络小区的密集性也增加了干扰环境的复杂度,而干扰计算是移动计算卸载中通信能耗模型的一个关键因素,比如文献[138]和[143],5G 提倡用多小区协作方法来解决干扰计算的问题.随着移动应用的多样化和移动数据量的急剧增长,卸载任务变得比较复杂且卸载时间延长,5G 提供大规模 MIMO 举措实施处理分流,以缩短卸载任务到云端的时间.可是在最大化频谱资源有限容量的同时,大规模 MIMO 使无线通信处理变得越来越复杂,并且传统的基于集中式云计算的异构网络环境表现出了超高负荷和超长 ADSL 回程链路延迟,5G 网络应用毫米波链接技术克制了回程链路的限制,缩短计算卸载引发的延迟.毫米波链接方式具有非常高的容量和方向性,为无线接入点转发用户卸载请求到云上提供了一种有效的可缩短延迟的方法,它们常被用在家庭基站网络中.此外,这些高容量的链接在无线通信和计算方面促进了小小区基站间的合作^[171].而认知无线技术在实际应用中不仅具有自我学习的能力,还可能引起能耗模型的改变,它在制定最优跨网络计算资源卸载决策时起着重要的作用.

5 云服务中心节能措施

在移动云计算模式中,云中心由许多分散在世

界各处的数据中心组成,主要以基础设施(Infrastructure)、平台(Platform)和软件(Software)形式向用户提供资源服务.绿色和平组织报告称:数据中心的全球电力需求大约是 31GW/年,相当于将近 18000 个家庭的用度^[172],数据中心的电力需求增长非常快.Koomey^[173]曾经指出:2010 年,通信、功率分布、冷却和服务器的能量利用率占美国整个功耗的 1.7%到 2.2%之间,数据中心在运行时的能耗大约是一小时 432KW,计算服务约占整个数据中心功耗的 70%,交换和通信链路约占 30%.图 7 展示了整个数据中心的能耗分布情况.

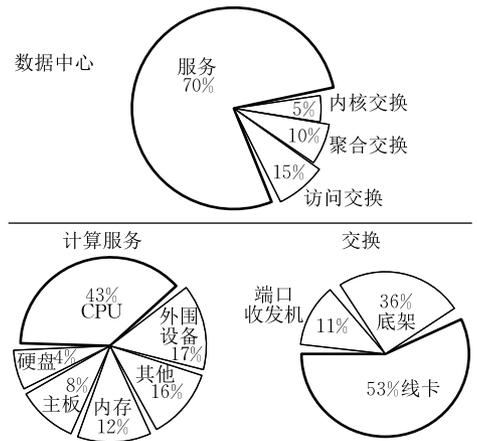


图 7 数据中心能耗分布

根据图 7 及相关文献,可将云数据中心的能耗研究归结为四个方面:服务、网络、服务和网络的混合、再生能源技术(新的研究方向),并且每个方面都有多种不同的解决办法,详情如表 4 所示.

表 4 云数据中心节能研究

研究范围	采用措施	描述	相关文献
服务	虚拟化技术	在一个服务器上生成多个虚拟机,可减少使用中硬件的数量并降低其操作开销,提高资源利用率,是降低服务器能耗的主要技术之一.	[174] [175] [176] [177]
	动态功率管理	通过降低计算服务的功率实现节能,主要采用使非活跃状态的服务器转到睡眠模式实现.	[178] [179] [180] [181] [182] [19]
	动态电压/频率扩展	根据当前负载设置 CPU 的功率.	
网络	自适应链接速率	通过动态设置链路数据速率以减少链路能耗.	
	虚拟网络嵌入	通过最优化方法使用嵌入式算法在较少数量的物理设施上分配虚拟网络资源,同时使空闲网络资源关闭或转到休眠状态.	[183] [184] [185] [186] [187] [188] [189] [30]
	睡眠模式	将空闲网络资源关闭或转到休眠状态.	
	绿色路由	通过向较少数量的网络资源提供路由由服务达到减少能量使用.	
服务与网络的混合	链路状态适配	根据每个链路上流量的信息,功率控制器适应链路状态.	
	服务器负载合并 网络业务量合并	通过消除网络冗余降低能耗.即合并少量链接和交换上的业务量,并关闭空闲的链接和交换. 合并较少链接和交换中的网络业务量,并允许控制器关掉未用资源.	[190] [191] [192] [193] [194]
再生技术	可再生能源	应用实例:苹果的新北卡罗莱纳州数据中心 ^① ,雅虎纽约数据中心,谷歌数据中心和微软数据中心.	[195] [196] [197]

① http://www.apple.com/environment/reports/docs/Apple_Facilities_Report_2013.pdf

5.1 云服务中心典型节能研究分析

(1) 动态电压频率扩展(Dynamic Voltage and Frequency Scaling, DVFS)

DVFS 是降低云数据中心能耗的一种重要方式. 频率越高, 电压也越高, 为了实现能源节约, DVFS 可根据实际运行情况对芯片的电压和运行频率做动态调整. Lin 等人^[19]提出了一个具有 DVFS 的任务调度方法, 该方法在应用完成时间的硬约束下, 最小化移动设备上一个应用的整个能耗. 不同于传统的本地任务调度问题^[198], 在 DVFS 算法调度过程中, 强化了任务优先级的需求; 相对于文献中提到的任务调度算法, DVFS 的整个计算复杂度较小, 但忽略了任务执行结果返回的能耗, 这将会对算法应用的任务类型有所限制.

(2) 动态服务供给(Online Dynamic Providing Algorithm, ODP)

不断变化是用户请求的特性, 因为请求方式未知, 甚至不能提前预测. 此外, 本地服务器和公共 IaaS 云之间的通信代价也不能忽视, 如果租用的虚拟机数量动态调整, 那么这个通信代价也将呈现动态变化的特性. 而且, IaaS 云上的虚拟机租用价格也是变化的且不可预测的. 所有这些变化的因素都会对云服务供给产生很大影响. 动态服务供给是指根据动态的用户需求, 通过租用公共云上不同数量的虚拟机, IaaS 提供者可以按比例扩展或缩减本身服务的计算能力. 目前存在一些研究, 如文献^[199]和^[200], 都要求对用户需求和虚拟机价格有个预先的认识或做一个精确的预测, 而且不考虑用户请求的动态性, 这势必不能明确提高混合云的动态服务供给性能. 针对上述问题, Li 等人^[182]提出了一种应用基于云动态服务供给的系统模型, 其框架如图 8 所示.

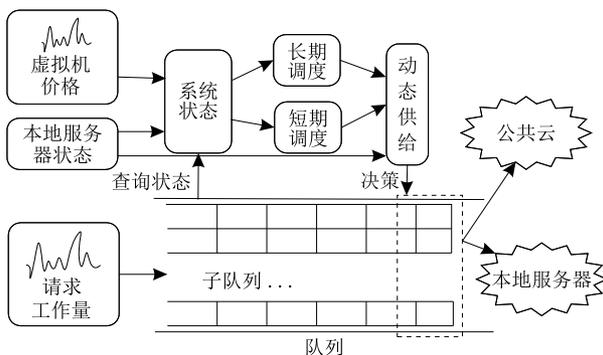


图 8 ODP 系统框架图

相较于以往的模型, ODP 中用户的请求是任意的, 不用对公共云上虚拟机的价格做精确预测, 同

时也会考虑本地服务和 IaaS 云间的通信代价; 对于实际问题数据, 使用 Lyapunov 优化框架进行理论建模, 并根据实际应用情况, 实现资源或服务的在线动态分配, 比传统的理想化离线优化分配方法成本更低, 更节能.

(3) 任务调度

在异构云环境中, 为了实现绿色多目标调度, 李智勇等人^[179]提出一个新的 Memetic 优化方法 (Multi-Objective Memetic Algorithm, MOMA), 即多目标 Memetic 调度算法. MOMA 算法使用基于 Pareto 多目标优化的调度决策流程, 如图 9 所示.

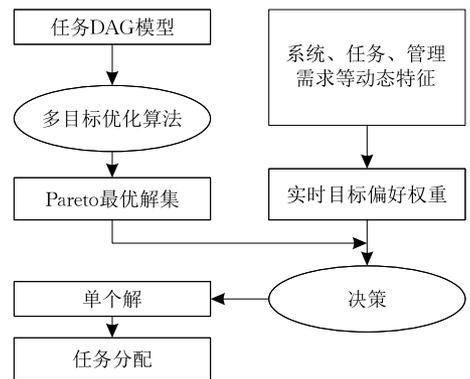


图 9 基于 Pareto 多目标优化的调度决策流程

MOMA 是一个随机搜索算法且用于并行计算系统. 它考虑计算系统性能和能耗的折衷求解, 运行中会反复对解空间进行评估和搜索, 并对当前调度的非关键和关键任务分别进行局部寻优, 它是基于群智能优化的, 能够在调度策略上减少评估计算, 具有很好的平行性, 并且可以缩短算法的收敛时间, 使得算法的计算开销降到最低. 相对于传统多目标算法, MOMA 的不足在于多了 DAG(Directed Acyclic Graph)^[201]任务图分层处理和局部搜索两个操作, 尽管两个操作的计算复杂度远小于种群适应度评估的计算复杂度, 但一定程度上增加了系统的计算开销.

(4) 虚拟机迁移

为了保证车载网络中各种操作过程的顺利执行, 针对不同虚拟机间的通信延迟和调度不同虚拟机时的环境切换延迟, Kumar 等人^[181]提出了一个贝叶斯联合博弈 (Bayesian Coalition Game, BCG)^[202, 203]和基于学习自动机 (Learning Automata, LA)^[204, 205]的智能虚拟机迁移方法. 其中, 博弈论是对展现竞争或搏斗的行为进行研究的理论和方法, 将其应用到虚拟机迁移和调度过程中, 能有效的控制虚拟机负载均衡的问题, 在一定程度上达到节能降耗的效果; 学习自动机是具有可变结构的随机自动机与随机环境相互作用的模型, 将其应用到车载网的移动设备

上,使移动设备根据环境条件和以往自己的动作进行学习判断,选择对自身和大家都有利的决策;在不完全的信息获取情况下,贝叶斯决策首先用主观概率评估部分未知状态;其次,对于发生概率的修正则使用贝叶斯公式;然后,最优结果由修正概率和期望值联合给出.贝叶斯与博弈论的联合应用能减少虚拟机迁移和调度过程中的不必要的复杂操作,降低了能耗.其不足之处主要在于没有考虑整个过程中的通信和存储能耗,也忽视了基于贝叶斯的虚拟机管理器在为请求创建和使用 DAG 过程中的能耗.

5.2 5G 下云数据中心节能研究分析

在不考虑与外围设备交互的情况下,云数据中心节能降耗的研究主要体现在数据中心服务器及通信(数据中心内部及区间的通信)、数据中心云管理系统(虚拟化、监测系统和调度)和应用(运行环境、应用程序和操作系统)^[5] 三个方面.另外,根据表 4 和相关文献的详细评述,5G 作为一种移动无线网络技术,对云数据中心在以上三个方面的节能降耗研究不会起到直接的作用,除非数据中心内部或数据中心之间使用移动无线网络进行通信.

虽然 5G 不能直接影响云服务中心节能的研究,但是 5G 技术的某些应用情况会充分考虑云数据服务器的能耗问题.如为了解决 5G 应用中由于用户移动致使连接丧失,进而因重新路由选择和搜索服务器资源导致的能耗激增和性能的下降, Han 等人^[30] 提出的一种 5G 中云辅助^[206] 的移动 Ad-Hoc 网络(MANET)机制,云辅助的 MANET 是一个 P2P 的网络覆盖,由移动设备(peers)和接入 MANET 的云数据服务器组成,逻辑上连入 MANET 的云数据服务器,即是能和 peers 形成间接或直接通信的云服务器,被称为 super-peer.当 super-peers 进入这个 P2P 网络覆盖区域时,区域内

所有 super-peers 都知道彼此数据信息,当在这个区域内因用户移动发生连接丧失时,super-peers 间互相合作从而有效地进行路由选择和信息搜索.这个机制作用在网络协议的应用层,主要由服务通知、服务更新和服务分发三部分组成.图 10 展示了它的能耗计算模型性能验证效果.

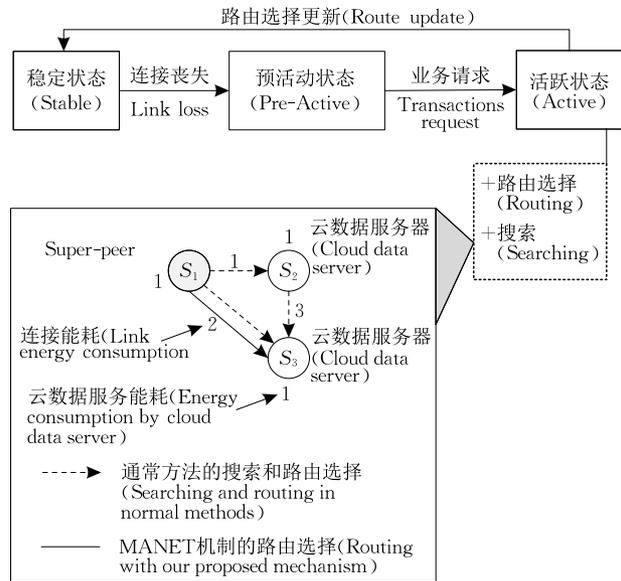


图 10 通常方法与 MANET 机制的搜索和路由选择的能耗对比

云辅助的 MANET 机制的主要优点在于它能减少云数据服务中因搜索和路由选择引起的能耗.其不足在于使用云辅助的 MANET 机制降低能耗的同时没有考虑整个网络的性能,也没有考虑信息交换和生成节点关系结构图产生的能耗.虽然这样的方式存在很大的不足,但今后依然可以考虑通过扩展或提高类似的方法对与 5G 相关的云数据中心进行节能降耗研究.表 5 列出了 5.1 节中 4 个案例和 5.2 节中的 1 个案例在能耗研究中多个参数的对比情况,其参数含义同表 3.

表 5 云服务中心能耗研究各案例参数对比

案例 (按举措命名)	能耗研究考虑因素								研究对象 粒度	扩展性	适用性	与 5G 相关性
	移动设备		云服务器		D2C 通信		其他代理					
	空闲	执行	空闲	执行	上传	下载	执行	通信				
动态电压频率扩展	No	Yes	No	Yes	Yes	No	No	No	Task	Medium	High	Medium
动态服务供给	No	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Request	Medium	High	Medium
任务调度	No	No	Yes	Yes	No	No	No	No	Task	Medium	High	Low
虚拟机迁移	No	No	Yes	Yes	No	No	No	No	Request	Medium	High	Low
路由选择和搜索	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Data	High	High	High

6 存在问题及展望

6.1 存在的问题及解决方案

5G 还未给出明确的标准,但 5G 是未来移动通

信系统发展的必然结果,它的主要目标在于使移动用户时刻处于联网状态.相对于 4G 蜂窝网络的多天线技术(8 端口 Multi User-MIMO),5G 网络在基站安装几百根天线(128 根、256 根或者更多),从而实现几百个天线同时发送数据,可以带来更多的性

能优势. 高频段毫米波通信可以为 5G 应用提供充足的可用带宽和较优的天线增益. 5G 的超密集小区覆盖使得小区边界消失, 获得小区分裂增益, 并结合有效改善网络覆盖的技术, 比如中继等, 在一定程度上大大地提升了系统容量. 针对频谱资源紧缺的无线通信系统问题, 5G 应用中使用了能够提升蜂窝通信系统频谱效率的终端直连 D2D 技术. 全双工技术在理论上可使 5G 空闲频谱效率提升一倍. 为了降低网络的建设成本和维护难度, 未来 5G 采用基于无线电协作、处理集中化和实时云计算架构的绿色无线接入网架构——C-RAN, 该架构能够使网络的复杂度和层级降低, 从而使系统时延减少. 作为未来主导的无线通信系统和技术, 由于多种无线接入方式的协作, 5G 将不再是孤立的. 未来随着大数据与云计算的融合需求, 联网终端不断向多元化、智能化和便携式的发展趋势及其数量呈指数级的增长速度, 在很多方面都对终端提出了至高需求, 比如终端的数据传输和处理能力. 作为服务类型的终端, 融合的接入技术的应用使其进一步泛网化. 若以用户利益为主, 它必须具有综合感知及交互、用户体验良好和应用的多样化等核心特性. 总之, 系统稳定、成本低、功耗低将成为 5G 下移动云计算应用的重要指标.

无疑, 5G 系统自身技术性能的实现和提升, 在本质上能够提高移动云计算的服务质量, 并降低移动云计算的能耗, 但同时也激发了一连串的问题和挑战, 比如: 在未来网络流量成一千倍增长的情况下, 为保证总体网络能耗不增加, 那么端到端的比特能耗效率需要提升一千倍, 这对各方面的协议设计和技术(内容分发、路由交换、网络架构、空口传输等)带来巨大挑战; 随着技术的进步, 可以预见未来的智能终端需要支持 10 多个无线电技术, 如果想要多模终端达到空口速率 1 Gbit/s 且成本低、功耗低, 待机时间是目前的四、五倍, 则终端电池技术、芯片及应用等都面临着一系列的挑战. 除此之外, 复杂的网络拓扑结构, 如何智能化无线回传网络, 如何设计或选择合理的大规模 MIMO 的天线形态、频段, 依赖于场景和应用的合适的 MU(Multi User)配对算法与天线分块或者分布式的天线分配方法又是什么, 如何设计网络节点动态部署方案以适应时间和空间的变化, 信道模型、容量及传输方案如何选择, 如何对干扰环境进行分析及建模, 需要考虑智能终端的实时移动性的特点, 以及支持移动用户频繁切换的技术、物理资源的调度和资源分配、频谱资源、

大规模组网技术、控制策略的设计、可扩展性等等, 为 5G 系统的应用及移动云计算的节能研究也带来了严峻的挑战. 为了灵活应对上述挑战, 结合第 3、4、5 节的分析、评述和探讨, 5G 下移动云计算节能措施研究将从如下方面分别提出相应的解决方案.

(1) 网络设施及通信

① 移动无线技术

为提升 5G 无线技术的性能, 可以从影响或决定其效果的方法、措施着手. 比如干扰模型或计算问题会对全双工技术、超密集异构网络技术、自组织网络技术等的性能产生一定的决定作用. 因此, 可以从详细分析干扰产生的原因并进行分类, 构建合理的干扰模型, 设计高效的干扰协调算法或优化干扰协调技术, 寻求降低干扰带来的性能损伤方法等方面进行研究; 信道的模型、容量及传输方案和天线抵消技术会影响到大规模 MIMO 在频谱效率和功效上的改善. 所以, 深入研究切合实际环境的信道模型, 分析信道模型对信道容量的影响, 分析实际信道模型在适度的导频开销和一定实现复杂度下可达到的频谱效率及功效, 以及研究最优信道信息获取方法、无线传输方法、多用户共享空间无线资源的联合调配方法等, 均可以作为研究提升大规模 MIMO 技术性能的潜在领域. 复杂且庞大的无线回传网络、移动用户的频繁切换和网络节点的部署方案是超密集异构网络技术和自组织网络技术提高性能均需亟待解决的问题. 因此, 可以从分析无线回传网络的环境特点开始, 利用和接入链路相同的频谱及技术进行回传, 设计灵活的且能适应业务等随时间和空间动态变化的节点部署方案, 能使网络节点自动配置和维护, 开发或优化适合超密集型异构网络应用场景的切换算法, 保障移动终端的服务性能等等.

② 网络服务模式

根据实际需求, 设计或选择适合 5G 系统应用的移动云计算网络服务模式. 超密集异构网络部署方式和大规模的 MIMO 天线阵列促使 5G 系统采用“宏基站提供覆盖范围, 小基站或小区提供容量”的服务部署模式. 密集型小区部署使得 D2D 或 M2M 通信在 5G 环境的移动云计算中将普遍存在, 这势必在根本上改变以往移动环境中以移动设备直连云数据中心为主的交互模式. D2D 通信使得 5G 下移动云计算向“微云计算”、“雾计算”或“移动边缘计算”等的服务模式转变. 在这些新的服务模式中, 服务功能基本都是依靠多小区协作的方式共同完成. 因此, 为支持 5G 中新网络服务模式的顺利进

行,在技术上必须使以下问题达到很好的解决效果,比如:网络节点的动态部署、自动配置和维护,良好的信号模型,高性能的干扰消除技术和认知无线电技术,回传网络的智能化,足够的频谱资源,实时移动性,控制策略的设计等.在新的服务模式应用方面,需要设计或选择合理的、贴合实际需要的模型及算法等.

(2) 移动设备

① 移动设备配置

5G 网络会为计算、存储、网络资源、连接提供一体化的分布式平台,延迟可以低到毫秒级,将实现真正的物联网.5G 网络下,移动设备可高效地实现跨 4G LTE、5G、WiFi 的并发连接和聚合^[47],相对于 4G,大屏智能终端是 5G 时代的特征,终端体积的轻便化、主频性能的持续提升以及芯片的多核多模化等均对终端的耗电性能提出了更高的要求.因此,可以开发或改进屏幕显示技术、芯片架构、低复杂度算法及射频功放技术等以改善终端功耗.除此之外,还可以考虑提高支持 5G 通信的移动操作系统性能和优化 5G 下移动设备的无线多接口及协议等.

② 移动任务迁移

移动任务迁移是 5G 系统应用对移动设备节能研究产生影响最大的一项,主要表现在移动卸载模式、卸载决策策略、卸载能耗评估模型及其他方面.5G 密集型小区部署使得移动用户不仅可以将任务卸载到云端或微云,还可以卸载到附近的、具有处理能力的其他移动设备,这个移动设备可能是同小区的,也可能是不同小区的.多种卸载目的地的并存使得移动卸载模式变得复杂,这种复杂的移动卸载模式,也使得移动卸载决策策略随之复杂化.并且,移动性或动态性的突显使计算结果取回的情况更难控制.由表 3 及相关文献分析可知,5G 环境下移动计算卸载考虑的能耗因素还不够全面,尤其是附近终端设备的计算能耗、D2D 间通信的能耗和移动设备空闲的能耗,同时存在为数不多的研究会将 5G 通信中对能耗影响不容忽视的噪声干扰和其他执行无线传输但不包含在移动云计算环境中的干扰因素作为重点考虑指标.而且,对于一个能耗研究方法的性能是否优于其他同类研究方法的评价是一个非常困难的工作,在表 3 列举的能耗研究模型中,有的仅仅以能耗为目标,有的以系统能耗和性能的各种关系(简单和、加权和、非线性关系等)为目标评价函数,并且评价大多采用模拟实验的方法进行功能的评价,很少进行实际性能评测.即使存在以硬件设备实

际能耗建模作为性能评测标准的研究,但由于 5G 技术还未被应用,所以其效果很难评价.

因此,结合与移动任务迁移紧密相关的 5G 特征,如超密集小区覆盖、高频段毫米波通信、终端直连、D2D、终端多种无线接入方式的合作等,对 5G 下的移动卸载场景进行详细分析,确定移动卸载参与对象及角色分配,设计合理的移动卸载模式,选择适合的移动卸载策略,构建正确的移动卸载能耗模型,开发或改进并实现高效低复杂度的移动卸载算法等均可以作为 5G 下移动任务迁移实现能耗优化的解决方案.

(3) 云数据中心

5G 在云数据中心节能研究中不存在直接的表现,但是 5G 超密集型异构网络部署和大规模 MIMO 天线阵列等技术引起的一系列变化,如网络服务模式的变化、用户与数据中心交互模式的变化、网络拓扑结构的变化等等都会对云数据中心节能降耗产生很大的影响,可以考虑作为提升云服务中心能耗优化的措施或方法.

6.2 展 望

结合第 6.1 节中提出的问题及相应的解决方案,可以从以下几个方面对 5G 环境下移动云计算节能降耗的研究做进一步的工作:

(1) 对于 5G 作用下的移动云计算,无论研究哪一个组成部分或过程的能耗,为了使测量结果具有客观真实性,对于重要能耗指标要尽可能考虑完全,比如:使用计算卸载降低移动设备能耗的方式中,移动设备空闲时的能耗、其他代理执行期间的能耗,决定通信能耗的复杂干扰计算模型的选取等都应该考虑到能耗模型的构建中.

(2) 在 5G 下移动云计算的应用场景中,应进一步给出更合理的能耗目标评价标准,比如:用硬件组件的实际能耗作为测量标准或采用最真实场景的数据参数.这里要尽可能的同时考虑系统能耗和性能的折衷问题,也即是服务质量与服务体验折衷的问题.

(3) 尽量结合 5G 移动通信系统的技术指标和重要特征,进一步提高移动云计算中云数据中心的节能降耗效果.比如:可以通过改进无线移动网络服务模式或提高搜索云服务器的路由算法降低云数据中心的能耗等.

(4) 结合如人工智能、机器学习、随机几何理论、数据挖掘等其他学科的知识,探索适合 5G 环境下绿色移动云计算各种应用的新模型、新方法.比

如:由移动无线技术带来的能耗问题.对于全双工总速率最大化问题,它本身不是凸优化问题,但是可以通过制定最严格的下界功能和使用变量变动对数使其转化成凸优化问题;采用随机几何理论可以对异构网络的覆盖概率、中继 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)或 FBMC 的系统容量以及认知无线 Ad Hoc 网络容量等进行分析建模;可以通过改进机器学习中的算法等提高认知无线电技术的性能;也可以应用或改进机器学习中的小波神经网络、广义小神经模型计算机、核学习机和支持向量机等算法解决通信系统中的信道均衡问题.可以用蚁群算法、粒子群算法、博弈论等智能算法或几种算法的结合实现移动计算卸载中最优目标网络资源的选取或任务调度等性能的提高.同时,也可以结合这些知识对无线网络服务模式做进一步优化,比如移动边缘计算模式.

7 结 论

从绿色计算的概念被提出以来,关于移动云计算在绿色计算方面的各种研究就层出不穷,尤其是能耗或能效保护措施及技术的研究,这些研究涉及了移动设备、网络设施及通信和云服务中心的软件和硬件等多个方面.而 5G 移动技术的到来及其在可扩展性、多用途、能量效率、容量、智能性、用户体验等方面的高新要求,进一步对移动云计算能耗模型研究提出了新的挑战,可以说,实现 5G 环境下移动云计算的节能降耗是非常活跃的一个方向.通过本文可以看出,5G 环境下移动云计算的各个物理组成部分的节能研究还处于起始阶段,仍需广大研究工作者们的继续努力.

参 考 文 献

- [1] Guo Bing, Shen Yan, Shao Zi-Li. The redefinition and some discussion of green computing. *Chinese Journal of Computers*, 2009, 32(12): 2311-2319(in Chinese)
(郭兵, 沈艳, 邵子立. 绿色计算的重定义与若干探讨. *计算机学报*, 2009, 32(12): 2311-2319)
- [2] Li Yuan-Song, Liang Jin-Ming. Energy saving in mobile cloud computing. *Fire Control & Command Control*, 2015, 40(8): 150-154(in Chinese)
(黎远松, 梁金明. 基于移动云计算架构下的能效保护研究. *火力与指挥控制*, 2015, 40(8): 150-154)
- [3] Guo Min-Yi. Green computing: Connotation and tendency. *Computer Engineering*, 2010, 36(10): 1-7(in Chinese)

(过敏意. 绿色计算: 内涵及趋势. *计算机工程*, 2010, 36(10): 1-7)

- [4] Wang X, Han G, Du X, et al. Mobile cloud computing in 5G: Emerging trends, issues, and challenges. *IEEE Network*, 2015, 29(2): 4-5
- [5] Mastelic T, Oleksiak A, Claussen H, et al. Cloud computing: Survey on energy efficiency. *ACM Computing Surveys*, 2015, 47(2): 1-36
- [6] Ghani I, Niknejad N, Jeong S R. Energy saving in green cloud computing data centers: A review. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2015, 74(1): 16-30
- [7] Beloglazov A, Buyya R, Lee Y C, et al. A taxonomy and survey of energy-efficient data centers and cloud computing systems. *Advances in Computers*, 2011, 82(2): 47-111
- [8] Berl A, Gelenbe E, Girolamo M D, et al. Energy-efficient cloud computing. *Computer Journal*, 2010, 53(7): 1045-1051
- [9] Beloglazov A, Abawajy J, Buyya R. Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for cloud computing. *Future Generation Computer Systems*, 2012, 28(5): 755-768
- [10] Buyya R, Beloglazov A, Abawajy J. Energy-efficient management of data center resources for cloud computing: A vision, architectural elements, and open challenges. *Eprint Arxiv*, 2010, 12(4): 6-17
- [11] Subirats J, Guitart J. Assessing and forecasting energy efficiency on cloud computing platforms. *Future Generation Computer Systems*, 2015, 45: 70-94
- [12] Kaur T, Chana I. Energy efficiency techniques in cloud computing: A survey and taxonomy. *ACM Computing Surveys*, 2015, 48(2): 1-46
- [13] Boru D, Kliazovich D, Granelli F, et al. Energy-efficient data replication in cloud computing datacenters. *Cluster Computing*, 2015, 18(1): 385-402
- [14] Sanaei Z, Abolfazli S, Gani A, et al. Heterogeneity in mobile cloud computing: Taxonomy and open challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(1): 369-392
- [15] Liu F, Shu P, Jin H, et al. Gearing resource-poor mobile devices with powerful clouds: Architectures, challenges, and applications. *IEEE Wireless Communications*, 2013, 20(3): 14-22
- [16] Bonino D, De Russis L, Corno F, et al. JEERP: Energy-aware enterprise resource planning. *IT Professional*, 2014, 16(4): 50-56
- [17] Sabharwal M, Agrawal A, Metri G. Enabling green it through energy-aware software. *IT Professional*, 2013, 15(1): 19-27
- [18] Chen M, Zhang Y, Li Y, et al. EMC: Emotion-aware mobile cloud computing in 5G. *IEEE Network*, 2015, 29(2): 32-38

- [19] Lin X, Wang Y, Xie Q, et al. Task scheduling with dynamic voltage and frequency scaling for energy minimization in the mobile cloud computing environment. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2015, 8(2): 175-186
- [20] Zhang W, Wen Y, Wu D O. Energy-efficient scheduling policy for collaborative execution in mobile cloud computing// *Proceedings of the 32nd IEEE International Conference on Computer Communications*. Turin, Italy, 2013: 190-194
- [21] Gai K, Qiu M, Zhao H, et al. Dynamic energy-aware cloudlet-based mobile cloud computing model for green computing. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016, 59: 46-54
- [22] Shiraz M, Gani A, Shamim A, et al. Energy efficient computational offloading framework for mobile cloud computing. *Journal of Grid Computing*, 2015, 13(1): 1-18
- [23] Zhang W, Wen Y, Guan K, et al. Energy-optimal mobile cloud computing under stochastic wireless channel. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(9): 4569-4581
- [24] Ge Y, Zhang Y, Qiu Q, et al. A game theoretic resource allocation for overall energy minimization in mobile cloud computing system// *Proceedings of the 2012 ACM/IEEE International Symposium on Low Power Electronics and Design*. Redondo Beach, USA, 2012: 279-284
- [25] Frenger P, Olsson M, Yading Y. 5G energy efficiency: Key concept and potential technology. *Telecommunications Network Technology*, 2015, 5: 48-53
- [26] Zhou Bo. Discussion on the technologies of building energy saving 5G mobile network. *China New Telecommunications*, 2016, 11: 55-55(in Chinese)
(周波. 关于构建节能型 5G 移动网络的技术探讨. *中国新通信*, 2016, 11: 55-55)
- [27] Hu R Q, Qian Y. An energy efficient and spectrum efficient wireless heterogeneous network framework for 5G systems. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(5): 94-101
- [28] Chen M, Hao Y, Qiu M, et al. Mobility-aware caching and computation offloading in 5G ultra-dense cellular networks. *Sensors*, 2016, 16(7): 974
- [29] Wu G, Yang C, Li S, et al. Recent advances in energy-efficient networks and their application in 5G systems. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(2): 145-151
- [30] Han N D, Chung Y, Jo M. Green data centers for cloud-assisted mobile ad hoc networks in 5G. *IEEE Network*, 2015, 29(2): 70-76
- [31] Zhang S, Xu X, Lu L, et al. Sparse code multiple access: An energy efficient uplink approach for 5G wireless systems // *Proceedings of the 2014 IEEE Global Communications Conference*. Austin, USA, 2014: 4782-4787
- [32] Sabella D, De Domenico A, Katranaras E, et al. Energy efficiency benefits of RAN-as-a-Service concept for a cloud-based 5G mobile network infrastructure. *IEEE Access*, 2014, 2: 1586-1597
- [33] Liu Y, Zhang Y, Yu R, et al. Integrated energy and spectrum harvesting for 5G wireless communications. *IEEE Network*, 2015, 29(3): 75-81
- [34] Hong X, Wang J, Wang C X, et al. Cognitive radio in 5G: A perspective on energy-spectral efficiency trade-off. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(7): 46-53
- [35] Mavroumoustakis C X, Bourdena A, Mastorakis G, et al. An energy-aware scheme for efficient spectrum utilization in a 5G mobile cognitive radio network architecture. *Telecommunication Systems*, 2015, 59(1): 63-75
- [36] Bai Q, Nossek J A. Energy efficiency maximization for 5G multi-antenna receivers. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2015, 26(1): 3-14
- [37] Cavalcante R L G, Stanczak S, Schubert M, et al. Toward energy-efficient 5G wireless communications technologies: Tools for decoupling the scaling of networks from the growth of operating power. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(6): 24-34
- [38] Mumtaz S, Huq K M S, Rodriguez J. Direct mobile-to-mobile communication: Paradigm for 5G. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(5): 14-23
- [39] Chih-Lin I, Rowell C, Han S, et al. Toward green and soft: A 5G perspective. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 66-73
- [40] Zappone A, Sanguinetti L, Bacci G, et al. Energy-efficient power control: A look at 5G wireless technologies. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(7): 1668-1683
- [41] Gupta M, Singh S. Greening of the Internet// *Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*. Karlsruhe, Germany, 2003: 19-26
- [42] Bolla R, Bruschi R, Davoli F, et al. Energy efficiency in the future internet: A survey of existing approaches and trends in energy-aware fixed network infrastructures. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011, 13(2): 223-244
- [43] Bianzino A P, Chaudet C, Rossi D, et al. A survey of green networking research. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012, 14(1): 3-20
- [44] Ge J, Yao H B, Wang X, et al. Stretchable conductors based on silver nanowires: Improved performance through a binary network design. *Angewandte Chemie*, 2013, 125(6): 1698-1703
- [45] Bari M F, Boutaba R, Esteves R, et al. Data center network virtualization: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(2): 909-928
- [46] Gupta V K, Singh A K, Al Khayat M, et al. Neutral carriers based polymeric membrane electrodes for selective determination of mercury (II). *Analytica Chimica Acta*, 2007, 590(1): 81-90
- [47] Nedevischi S, Popa L, Iannaccone G, et al. Reducing network energy consumption via sleeping and rate-adaptation// *Proceedings of the 5th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation*. San Francisco, USA, 2008: 323-336

- [48] Zhang Z K, Liu C, Zhang Y C, et al. Solving the cold-start problem in recommender systems with social tags. *EPL (Europhysics Letters)*, 2010, 92(2): 28002
- [49] Vasić N, Kostić D. Energy-aware traffic engineering// *Proceedings of the 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking*. New York, USA, 2010: 169-178
- [50] Vasić N, Bhurat P, Novaković D, et al. Identifying and using energy-critical paths// *Proceedings of the 7th Conference on Emerging Networking EXperiments and Technologies*. Tokyo, Japan, 2011: 1-12
- [51] Cianfrani A, Eramo V, Listanti M, et al. An OSPF-integrated routing strategy for QoS-aware energy saving in IP backbone networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2012, 9(3): 254-267
- [52] Suarez L, Nuaymi L, Bonnin J M. An overview and classification of research approaches in green wireless networks. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012, 2012(1): 142
- [53] Oliveira L, Sadok D H, Gonçalves G, et al. Collaborative algorithm with a green touch. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences Social Informatics & Telecommunications Engineering*, 2012, 73: 51-62
- [54] Auer G, Giannini V, Desset C, et al. How much energy is needed to run a wireless network?. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(5): 40-49
- [55] Correia L M, Zeller D, Blume O, et al. Challenges and enabling technologies for energy aware mobile radio networks. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(11): 66-72
- [56] Claussen J C, Franklin A D, Haque A U, et al. Electrochemical biosensor of nanocube-augmented carbon nanotube networks. *ACS Nano*, 2009, 3(1): 37-44
- [57] Razavi R, Claussen H. Urban small cell deployments: Impact on the network energy consumption// *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops*. Paris, France, 2012: 47-52
- [58] Yang H, Marzetta T L. Performance of conjugate and zero-forcing beamforming in large-scale antenna systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(2): 172-179
- [59] Grebennikov A, Bulja S. High-efficiency Doherty power amplifiers: Historical aspect and modern trends. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(12): 3190-3219
- [60] Claussen H, Ashraf I, Ho L T W. Dynamic idle mode procedures for femtocells. *Bell Labs Technical Journal*, 2010, 15(2): 95-116
- [61] Mesleh R Y, Haas H, Sinanovic S, et al. Spatial modulation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4): 2228-2241
- [62] Hochwald B M, Ten Brink S. Achieving near-capacity on a multiple-antenna channel. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(3): 389-399
- [63] Claussen H, Karimi H R, Mulgrew B. Low complexity detection of high-order modulations in multiple antenna systems. *IEE Proceedings-Communications*, 2005, 152(6): 789-796
- [64] You Xiao-Hu, Pan Zhi-Wen, Gao Xi-Qi, et al. The 5G mobile communication: The development trends and its emerging key techniques. *China Science: Information Science*, 2014, 44(5): 551-563(in Chinese)
(尤肖虎, 潘志文, 高西奇等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44(5): 551-563)
- [65] Wang C X, Haider F, Gao X, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 122-130
- [66] Tao X, Xu X, Cui Q. An overview of cooperative communications. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(6): 65-71
- [67] You X H, Wang D M, Sheng B, et al. Cooperative distributed antenna systems for mobile communications: Coordinated and distributed MIMO. *IEEE Wireless Communications*, 2010, 17(3): 35-43
- [68] You X, Wang D, Zhu P, et al. Cell edge performance of cellular mobile systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(6): 1139-1150
- [69] Hoydis J, Ten Brink S, Debbah M. Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need?. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(2): 160-171
- [70] Mohammed S K, Larsson E G. Per-antenna constant envelope precoding for large multi-user MIMO systems. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(3): 1059-1071
- [71] Yin H, Gesbert D, Filippou M, et al. A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(2): 264-273
- [72] Švač P, Meyer F, Riegler E, et al. Soft-heuristic detectors for large MIMO systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(18): 4573-4586
- [73] Ahmed E, Eltawil A M, Sabharwal A. Rate gain region and design tradeoffs for full-duplex wireless communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(7): 3556-3565
- [74] Aggarwal V, Duarte M, Sabharwal A, et al. Full- or half-duplex? A capacity analysis with bounded radio resources// *Proceedings of the 2012 IEEE Information Theory Workshop*. Lausanne, Switzerland, 2012: 207-211
- [75] Cheng W, Zhang X, Zhang H. Optimal dynamic power control for full-duplex bidirectional-channel based wireless networks// *Proceedings of the 32nd IEEE International Conference on Computer Communications*. Turin, Italy, 2013: 3120-3128

- [76] Ju H, Lim S, Kim D, et al. Full duplexity in beamforming-based multi-hop relay networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(8): 1554-1565
- [77] Jain M, Choi J I, Kim T, et al. Practical, real-time, full duplex wireless//Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Las Vegas, USA, 2011: 301-312
- [78] Choi J I, Jain M, Srinivasan K, et al. Achieving single channel, full duplex wireless communication//Proceedings of the 16th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Chicago, USA, 2010: 1-12
- [79] Wunder G, Kasparick M, ten Brink S, et al. 5GNOW: Challenging the LTE design paradigms of orthogonality and synchronicity//Proceedings of the 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Dresden, Germany, 2013: 1-5
- [80] Estella I, Pascual-Iserte A, Payaró M. OFDM and FBMC performance comparison for multistream MIMO systems//Proceedings of the 2010 IEEE Future Network & Mobile Summit. Florence, Italy, 2010: 4-8
- [81] Sahin A, Guvenc I, Arslan H. A survey on multicarrier communications: Prototype filters, lattice structures, and implementation aspects. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(3): 1312-1338
- [82] Pinchon D, Siohan P. Derivation of analytical expressions for flexible PR low complexity FBMC Systems//Proceedings of the European Signal Processing Conference. Marrakech, Morocco, 2013: 1-5
- [83] Wang G, Chen Q, Ren Z. Modelling of time-varying discrete-time systems. *IET Signal Processing*, 2011, 5(1): 104-112
- [84] Farhang-Boroujeny B, Kempter R. Multicarrier communication techniques for spectrum sensing and communication in cognitive radios. *IEEE Communications Magazine*, 2008, 46(4): 80-85
- [85] Hwang I, Song B, Soliman S S. A holistic view on hyperdense heterogeneous and small cell networks. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(6): 20-27
- [86] Liu S, Wu J, Koh C H, et al. A 25 Gb/s/(km²) urban wireless network beyond IMT-advanced. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(2): 122-129
- [87] Costanzo S, Galluccio L, Morabito G, et al. Software defined wireless networks: Unbridling SDNs//Proceedings of the 2012 IEEE European Workshop on Software Defined Networking. Berlin, German, 2012: 1-6
- [88] Ge X, Cheng H, Guizani M, et al. 5G wireless backhaul networks: challenges and research advances. *IEEE Network*, 2014, 28(6): 6-11
- [89] Hur S, Kim T, Love D J, et al. Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(10): 4391-4403
- [90] Dehos C, González J L, De Domenico A, et al. Millimeter-wave access and backhauling: the solution to the exponential data traffic increase in 5G mobile communications systems?. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(9): 88-95
- [91] Galiotto C, Marchetti N, Doyle L. Flexible spectrum sharing and interference coordination for low power nodes in heterogeneous networks//Proceedings of the 2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall). Québec City, Canada, 2012: 1-5
- [92] Aliu O G, Imran A, Imran M A, et al. A survey of self organisation in future cellular networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(1): 336-361
- [93] Demestichas P, Georgakopoulos A, Karvounas D, et al. 5G on the horizon: Key challenges for the radio-access network. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2013, 8(3): 47-53
- [94] Savarese G, Vaser M, Ruggieri M. A software defined networking-based context-aware framework combining 4G cellular networks with M2M//Proceedings of the 2013 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC). Atlantic City, USA, 2013: 1-6
- [95] Li L E, Mao Z M, Rexford J. Toward software-defined cellular networks//Proceedings of the 2012 IEEE European Workshop on Software Defined Networking. The Hague, Netherlands, 2012: 7-12
- [96] Yang M, Li Y, Jin D, et al. Software-defined and virtualized future mobile and wireless networks: A survey. *Mobile Networks and Applications*, 2015, 20(1): 4-18
- [97] Yap K K, Kobayashi M, Underhill D, et al. The Stanford OpenRoads deployment//Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Experimental Evaluation and Characterization. New York, USA, 2009: 59-66
- [98] Bansal M, Mehlman J, Katti S, et al. OpenRadio: A programmable wireless dataplane//Proceedings of the 1st Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks. Helsinki, Finland, 2012: 109-114
- [99] Kumar S, Cifuentes D, Gollakota S, et al. Bringing cross-layer MIMO to today's wireless LANs. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2013, 43(4): 387-398
- [100] Gudipati A, Perry D, Li L E, et al. SoftRAN: Software defined radio access network//Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking. Hong Kong, China, 2013: 25-30
- [101] Huerta-Canepa G, Lee D. A virtual cloud computing provider for mobile devices//Proceedings of the 1st ACM Workshop on Mobile Cloud Computing & Services: Social Networks and Beyond. San Francisco, USA, 2010: 1-5
- [102] Vallina-Rodriguez N, Crowcroft J. Energy management techniques in modern mobile handsets. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(1): 179-198
- [103] Abolfazli S, Sanaei Z, Sanaei M, et al. Mobile Cloud Computing: The-State-of-the-Art, Challenges, and Future Research. Hoboken, USA: John Wiley & Sons Inc, 2015
- [104] Vallina-Rodriguez N, Crowcroft J. ErdOS: Achieving energy savings in mobile OS//Proceedings of the 6th International Workshop on MobiArch. Bethesda, USA, 2011: 37-42

- [105] Belay A, Prekas G, Klimovic A, et al. IX: A protected dataplane operating system for high throughput and low latency//Proceedings of the Usenix Conference on Operating Systems Design and Implementation. Broomfield, USA, 2014: 49-65
- [106] Lin F X, Wang Z, Zhong L. K2: A mobile operating system for heterogeneous coherence domains. ACM SIGPLAN Notices, 2014, 49(4): 285-300
- [107] Rumble S M, Stutsman R, Levis P, et al. Apprehending joule thieves with cinder. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2010, 40(1): 106-111
- [108] Roy A, Rumble S M, Stutsman R, et al. Energy management in mobile devices with the cinder operating system//Proceedings of the 6th Conference on Computer Systems. Salzburg, Austria, 2011: 139-152
- [109] Chu D, Kansal A, Liu J, et al. Mobile apps: It's time to move up to CondOS//Proceedings of the Usenix Conference on Hot Topics in Operating Systems. Napa, USA, 2011: 1-5
- [110] Flinn J, Satyanarayanan M. Managing battery lifetime with energy-aware adaptation. ACM Transactions on Computer Systems, 2004, 22(2): 137-179
- [111] Snowdon D C, Le Sueur E, Petters S M, et al. Koala: A platform for OS-level power management//Proceedings of the 4th ACM European Conference on Computer Systems. Nuremberg, Germany, 2009: 289-302
- [112] Shye A, Scholbrock B, Memik G. Into the wild: Studying real user activity patterns to guide power optimizations for mobile architectures//Proceedings of the 42nd Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture. New York, USA, 2009: 168-178
- [113] Xiao Y, Bhaumik R, Yang Z, et al. A system-level model for runtime power estimation on mobile devices//Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Green Computing and Communications (GreenCom). Hangzhou, China, 2010: 27-34
- [114] Perrucci G P, Fitzek F H P, Sasso G, et al. On the impact of 2G and 3G network usage for mobile phones' battery life//Proceedings of the 2009 European Wireless Conference. Aalborg, Danmark, 2009: 255-259
- [115] Rice A, Hay S. Decomposing power measurements for mobile devices//Proceedings of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Mannheim, Germany, 2010: 70-78
- [116] Zhang L, Tiwana B, Qian Z, et al. Accurate online power estimation and automatic battery behavior based power model generation for smartphones//Proceedings of the International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis, CODES+ISSS. Scottsdale, USA, 2010: 105-114
- [117] Shepard C, Rahmati A, Tossell C, et al. LiveLab: Measuring wireless networks and smartphone users in the field. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2011, 38(3): 15-20
- [118] Oliver E, Keshav S. Data driven smartphone energy level prediction. University of Waterloo, Waterloo: Technical Report: CS-2010-06, 2010
- [119] Falaki H, Mahajan R, Kandula S, et al. Diversity in smartphone usage//Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. San Francisco, USA, 2010: 179-194
- [120] Vallina-Rodriguez N, Hui P, Crowcroft J, et al. Exhausting battery statistics: Understanding the energy demands on mobile handsets//Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Networking, Systems, and Applications on Mobile Handhelds. New Delhi, India, 2010: 9-14
- [121] Falaki H, Lymberopoulos D, Mahajan R, et al. A first look at traffic on smartphones//Proceedings of the 10th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. Melbourne, Australia, 2010: 281-287
- [122] Trestian I, Ranjan S, Kuzmanovic A, et al. Measuring serendipity: Connecting people, locations and interests in a mobile 3G network//Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement Conference. Chicago, USA, 2009: 267-279
- [123] Krashinsky R, Balakrishnan H. Minimizing energy for wireless web access with bounded slowdown. Wireless Networks, 2005, 11(1-2): 135-148
- [124] Zhou R, Xiong Y, Xing G, et al. Zifi: Wireless LAN discovery via ZigBee interference signatures//Proceedings of the 16th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Chicago, USA, 2010: 49-60
- [125] Peng Q, Chen M, Walid A, et al. Energy efficient multipath TCP for mobile devices//Proceedings of the 15th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. Philadelphia, USA, 2014: 257-266
- [126] Pluntke C, Eggert L, Kiukkonen N. Saving mobile device energy with multipath TCP//Proceedings of the 6th International Workshop on MobiArch. Bethesda, USA, 2011: 1-6
- [127] Lim Y, Chen Y C, Nahum E M, et al. How green is multipath TCP for mobile devices?//Proceedings of the 4th Workshop on All Things Cellular: Operations, Applications, & Challenges. Chicago, USA, 2014: 3-8
- [128] Pathak A, Hu Y C, Zhang M. Where is the energy spent inside my app?: Fine grained energy accounting on smartphones with Eprof//Proceedings of the 7th ACM European Conference on Computer Systems. Bern, Switzerland, 2012: 29-42
- [129] Perrucci G P, Fitzek F H P, Widmer J. Survey on energy consumption entities on the smartphone platform//Proceedings of the IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Budapest, Hungary, 2011: 1-6
- [130] Raiciu C, Niculescu D, Bagnulo M, et al. Opportunistic mobility with multipath TCP//Proceedings of the 6th International Workshop on MobiArch. Bethesda, USA, 2011: 7-12

- [131] Lane N D, Miluzzo E, Lu H, et al. A survey of mobile phone sensing. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(9): 140-150
- [132] Constandache I, Gaonkar S, Sayler M, et al. Enloc: Energy-efficient localization for mobile phones//Proceedings of the 28th IEEE Conference on Computer Communications. Rio De Janeiro, Brazil, 2009; 2716-2720
- [133] Lin K, Kansal A, Lymberopoulos D, et al. Energy-accuracy trade-off for continuous mobile device location//Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. San Francisco, USA, 2010; 285-298
- [134] Paek J, Kim J, Govindan R. Energy-efficient rate-adaptive GPS-based positioning for smartphones//Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. San Francisco, USA, 2010; 299-314
- [135] Zhuang Z, Kim K H, Singh J P. Improving energy efficiency of location sensing on smartphones//Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. San Francisco, USA, 2010; 315-330
- [136] Lu H, Yang J, Liu Z, et al. The Jigsaw continuous sensing engine for mobile phone applications//Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. San Francisco, USA, 2010; 71-84
- [137] Chen M, Hao Y, Li Y, et al. On the computation offloading at ad hoc cloudlet: Architecture and service modes. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(6): 18-24
- [138] Chen X. Decentralized computation offloading game for mobile cloud computing. *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*, 2014, 26(4): 974-983
- [139] Lin Y D, Chu T H, Lai Y C, et al. Time-and-energy-aware computation offloading in handheld devices to coprocessors and clouds. *IEEE Systems Journal*, 2015, 9(2): 393-405
- [140] Khoda M E, Razzaque M A, Almogren A, et al. Efficient computation offloading decision in mobile cloud computing over 5G network. *Mobile Networks and Applications*, 2016, 21(5): 777-792
- [141] Ali F A, Simoens P, Verbelen T, et al. Mobile device power models for energy efficient dynamic offloading at runtime. *Journal of Systems and Software*, 2016, 113: 173-187
- [142] Labidi W, Sarkiss M, Kamoun M. Energy-optimal resource scheduling and computation offloading in small cell networks //Proceedings of the 22nd International Conference on Telecommunications (ICT). Sydney, Australia, 2015; 313-318
- [143] Chen X, Jiao L, Li W, et al. Efficient multi-user computation offloading for mobile-edge cloud computing. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2016, 24(5): 2795-2808
- [144] Flinn J, Park S Y, Satyanarayanan M. Balancing performance, energy, and quality in pervasive computing//Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems. Paris, France, 2002; 217-226
- [145] Cuervo E, Balasubramanian A, Cho D, et al. MAUI: Making smartphones last longer with code offload//Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. San Francisco, USA, 2010; 49-62
- [146] Gurus S, Krintz C, Wolski R. NWSLite: A light-weight prediction utility for mobile devices//Proceedings of the 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. Boston, USA, 2004; 2-11
- [147] Kumar K, Liu J, Lu Y H, et al. A survey of computation offloading for mobile systems. *Mobile Networks and Applications*, 2013, 18(1): 129-140
- [148] Noble B, Price M, Satyanarayanan M. A programming interface for application-aware adaptation in mobile computing. *Computing Systems*, 1995, 8(4): 345-363
- [149] Ellis C S. The case for higher-level power management//Proceedings of the 7th Workshop on Hot Topics in Operating Systems. Rio Rico, USA, 1999; 162-167
- [150] Zhang Y, Zhang D, Hassan M M, et al. CADRE: Cloud-assisted drug recommendation service for online pharmacies. *Mobile Networks and Applications*, 2015, 20(3): 348-355
- [151] Li Y, Wang W. Can mobile cloudlets support mobile applications?//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2014-IEEE Conference on Computer Communications. Toronto, Canada, 2014; 1060-1068
- [152] Tong L, Li Y, Gao W. A hierarchical edge cloud architecture for mobile computing//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM). San Francisco, USA, 2016; 1-9
- [153] Liu Q, Ma Y, Alhussain M, et al. Green data center with IoT sensing and cloud-assisted smart temperature control system. *Computer Networks*, 2016, 101: 104-112
- [154] Ge X, Huang X, Wang Y, et al. Energy-efficiency optimization for MIMO-OFDM mobile multimedia communication systems with QoS constraints. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(5): 2127-2138
- [155] Li J, Qiu M, Ming Z, et al. Online optimization for scheduling preemptable tasks on IaaS cloud systems. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2012, 72(5): 666-677
- [156] Li J, Ming Z, Qiu M, et al. Resource allocation robustness in multi-core embedded systems with inaccurate information. *Journal of Systems Architecture*, 2011, 57(9): 840-849
- [157] Ge X, Tu S, Mao G, et al. 5G ultra-dense cellular networks. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(1): 72-79
- [158] Volk M, Sterle J, Sedlar U, et al. An approach to modeling and control of QoE in next generation networks: Next Generation Telco IT Architectures. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(8): 126-135
- [159] Lin K, Wang W, Wang X, et al. QoE-driven spectrum assignment for 5G wireless networks using SDR. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(6): 48-55

- [160] Hossain M S, Muhammad G, Alhamid M F, et al. Audio-visual emotion recognition using big data towards 5G. *Mobile Networks and Applications*, 2016, 21(5): 753-763
- [161] Zheng K, Zhang X, Zheng Q, et al. Quality-of-experience assessment and its application to video services in LTE networks. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(1): 70-78
- [162] Sterle J, Sedlar U, Rugelj M, et al. Application-driven OAM framework for heterogeneous IoT environments. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016, 2016: 3
- [163] Sedlar U, Rugelj M, Volk M, et al. Deploying and managing a network of autonomous internet measurement probes: Lessons learned. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015, 2015: 1-8
- [164] Zhang Y, Qiu M, Tsai C W, et al. Health-CPS: Healthcare cyber-physical system assisted by cloud and big data. *IEEE Systems Journal*, 2017, 11(1): 88-95
- [165] Qiu M, Sha E H M. Cost minimization while satisfying hard/soft timing constraints for heterogeneous embedded systems. *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems*, 2009, 14(2): 25
- [166] Han B, Hui P, Kumar V S A, et al. Mobile data offloading through opportunistic communications and social participation. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(5): 821-834
- [167] Yang L, Cao J, Yuan Y, et al. A framework for partitioning and execution of data stream applications in mobile cloud computing. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 2013, 40(4): 23-32
- [168] Verbelen T, Simoens P, De Turck F, et al. AIOLOS: Middleware for improving mobile application performance through cyber foraging. *Journal of Systems and Software*, 2012, 85(11): 2629-2639
- [169] Huang J, Qian F, Gerber A, et al. A close examination of performance and power characteristics of 4G LTE networks //Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. Low Wood Bay, UK, 2012: 225-238
- [170] Wang Y C, Donyanavard B, Cheng K T. Energy-aware real-time face recognition system on mobile CPU-GPU platform //Kutulakos K N eds. *Trends and Topics in Computer Vision*. Berlin Heidelberg, Germany: Springer Verlag, 2012
- [171] Rappaport T S, Sun S, Mayzus R, et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!. *IEEE Access*, 2013, 1(1): 335-349
- [172] Cook G. *How Clean Is Your Cloud?*. Haryana, India: Cyber Media India Ltd, 2012
- [173] Koomey J. *Growth in Data Center Electricity Use 2005 to 2010*. The New York Times. Oakland, USA: Analytical Press, 2011
- [174] Hsu C H, Slagter K D, Chen S C, et al. Optimizing energy consumption with task consolidation in clouds. *Information Sciences*, 2014, 258: 452-462
- [175] Wang L, Khan S U, Chen D, et al. Energy-aware parallel task scheduling in a cluster. *Future Generation Computer Systems*, 2013, 29(7): 1661-1670
- [176] Ghribi C, Hadji M, Zeghlache D. Energy efficient VM scheduling for cloud data centers: exact allocation and migration algorithms//Proceedings of the 13th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid). Delft, Netherlands, 2013: 671-678
- [177] Aroca R V, Gonçalves L M G. Towards green data centers: A comparison of x86 and ARM architectures power efficiency. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2012, 72(12): 1770-1780
- [178] Lee Y C, Zomaya A Y. Energy efficient utilization of resources in cloud computing systems. *The Journal of Supercomputing*, 2012, 60(2): 268-280
- [179] Li Zhi-Yong, Chen Shao-Miao, Yang Bo, et al. Multi-objective Memetic algorithm for task scheduling on heterogeneous cloud. *Chinese Journal of Computers*, 2016, 39(2): 377-390(in Chinese)
(李智勇, 陈少淼, 杨波等. 异构云环境多目标 Memetic 优化任务调度方法. *计算机学报*, 2016, 39(2): 377-390)
- [180] Dabbagh M, Hamdaoui B, Guizani M, et al. Toward energy-efficient cloud computing: Prediction, consolidation, and overcommitment. *IEEE Network*, 2015, 29(2): 56-61
- [181] Kumar N, Zeadally S, Chilamkurti N, et al. Performance analysis of Bayesian coalition game-based energy-aware virtual machine migration in vehicular mobile cloud. *IEEE Network*, 2015, 29(2): 62-69
- [182] Li S, Zhou Y, Jiao L, et al. Towards operational cost minimization in hybrid clouds for dynamic resource provisioning with delay-aware optimization. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2015, 8(3): 398-409
- [183] Botero J F, Hesselbach X, Duelli M, et al. Energy efficient virtual network embedding. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(5): 756-759
- [184] Fischer A, Botero J F, Beck M T, et al. Virtual network embedding: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(4): 1888-1906
- [185] Heller B, Seetharaman S, Mahadevan P, et al. Elastic-Tree: Saving energy in data center networks//Proceedings of the Usenix Symposium on Networked Systems Design and Implementation, NSDI 2010. San Jose, USA, 2010: 249-264
- [186] Si W, Taheri J, Zomaya A. A distributed energy saving approach for Ethernet switches in data centers//Proceedings of the 2012 IEEE 37th Conference on Local Computer Networks(LCN). Clearwater, USA, 2012: 505-512
- [187] Shang Y, Li D, Xu M. Energy-aware routing in data center network//Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Green Networking. New Delhi, India, 2010: 1-8

- [188] Xu M, Shang Y, Li D, et al. Greening data center networks with throughput-guaranteed power-aware routing. *Computer Networks*, 2013, 57(15): 2880-2899
- [189] Chiaraviglio L, Matta I. Greencoop: Cooperative green routing with energy-efficient servers//Proceedings of the 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking. Passau, Germany, 2010: 191-194
- [190] Kliazovich D, Bouvry P, Khan S U. GreenCloud: A packet-level simulator of energy-aware cloud computing data centers. *The Journal of Supercomputing*, 2012, 62(3): 1263-1283
- [191] Fang W, Liang X, Li S, et al. VMPlanner: Optimizing virtual machine placement and traffic flow routing to reduce network power costs in cloud data centers. *Computer Networks*, 2013, 57(1): 179-196
- [192] Shirayanagi H, Yamada H, Kenji K. Honeyguide: A VM migration-aware network topology for saving energy consumption in data center networks. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2013, 96(9): 2055-2064
- [193] Gill B S, Gill S K, Jain P. Analysis of energy aware data center using green cloud simulator in cloud computing. *International Journal Computer Trends & Technology*, 2013, 5(3): 154-159
- [194] Koseoglu M, Karasan E. Joint resource and network scheduling with adaptive offset determination for optical burst switched grids. *Future Generation Computer Systems*, 2010, 26(4): 576-589
- [195] Liu Z, Chen Y, Bash C, et al. Renewable and cooling aware workload management for sustainable data centers. *ACM Sigmetrics Performance Evaluation Review*, 2012, 40(1): 175-186
- [196] Chiriac V A, Chiriac F. Novel energy recovery systems for the efficient cooling of data centers using absorption chillers and renewable energy resources//Proceedings of the 13th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). San Diego, USA, 2012: 814-820
- [197] Dumitru I, Fagarasan I, Iliescu S, et al. Increasing energy efficiency in data centers using energy management//Proceedings of the 2011 IEEE/ACM International Conference on Green Computing and Communications (GreenCom). Chengdu, China, 2011: 159-165
- [198] Topcuoglu H, Hariri S, Wu M Y. Performance-effective and low-complexity task scheduling for heterogeneous computing. *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*, 2002, 13(3): 260-274
- [199] Ardagna D, Panicucci B, Passacantando M. A game theoretic formulation of the service provisioning problem in cloud systems//Proceedings of the 20th International Conference on World Wide Web. Hyderabad, India, 2011: 177-186
- [200] Guo T, Sharma U, Wood T, et al. Seagull: Intelligent cloud bursting for enterprise applications//Proceedings of the 2012 USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC 12). Boston, USA, 2012: 361-366
- [201] Xu Y, Li K, He L, et al. A DAG scheduling scheme on heterogeneous computing systems using double molecular structure-based chemical reaction optimization. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2013, 73(9): 1306-1322
- [202] Kumar N, Lee J H, Rodrigues J J P C. Intelligent mobile video surveillance system as a Bayesian coalition game in vehicular sensor networks: Learning automata approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(3): 1148-1161
- [203] Song L, Niyato D, Han Z, et al. Game-theoretic resource allocation methods for device-to-device communication. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(3): 136-144
- [204] Kumar N, Kim J. ELACCA: Efficient learning automata based cell clustering algorithm for wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications*, 2013, 73(4): 1495-1512
- [205] Kumar N, Chilamkurti N, Rodrigues J J P C. Learning automata-based opportunistic data aggregation and forwarding scheme for alert generation in vehicular ad hoc networks. *Computer Communications*, 2014, 39: 22-32
- [206] Wang X, Kwon T T, Choi Y, et al. Cloud-assisted adaptive video streaming and social-aware video prefetching for mobile users. *IEEE Wireless Communications*, 2013, 20(3): 72-79



LI Ji-Rui, born in 1979, Ph. D. candidate, associate professor. Her research interests include mobile cloud computing, distributed computing and trusted services, and Internet of Things.

LI Xiao-Yong, born in 1975, Ph. D. professor, Ph. D. supervisor. His research interests include distributed

computing and trusted services, network secure and Internet of Things.

GAO Yun-Quan, born in 1981, Ph. D. candidate, lecturer. His research interests include trusted services and Internet of Things.

GAO Ya-Li, born in 1991, Ph. D. candidate. Her research interests include distributed computing and trusted services, and mobile crowd sensing network.

Background

In recent years, resources limitation (include computation, storage and energy) becomes increasingly distinct, and green computing has been the main goal that various industries pursue. In mobile cloud computing (MCC), the gigantic business profits brought by cloud server, the rapid growth in the number of mobile intelligent terminal, and the gradual maturity of 5G technologies, will all attract further attention to green MCC. Reducing energy consumption of MCC is the basic work to reality green computing. For the past several years, most of energy consumption researches about MCC focused on the environment of 4G and below or the hardware facilities in 5G, but the different between 5G and 4G is apparent in terms of the characters, thus, the basis of the energy conservation study for MCC is likely to change. What's more, to solve the limited spectrum resource and the like, 5G has introduced many efficient technologies such as the large-scale MIMO (Multi-Input Multi-Output) technology, multi carrier technology, full duplex technology, hyper dense heterogeneous cell deployment, SDWN (Software Defined Wireless Network), and unified self-organizing network. These technologies can promote the change of wireless network service mode and bring new attention for the energy conservation study of MCC in 5G. In this paper, our research

works on reviewing the energy saving measure for MCC in 5G, firstly, describing the newest and typical research methods of energy consumption for MCC in 5G; secondly comparing the evaluation factors of these researches; finally, analyzing the current problems and looking forward to the future development directions. This work is partly supported by the National Nature Science Foundation of China (Nos. 61370069, 61672111), the Beijing Natural Science Foundation (No. 4162043), the Fok Ying Tung Education Foundation (No. 132032). Our group has been working on the energy consumption optimization for cloud computing and IoT (Internet of Things). Many papers have been published in international conferences and journals, such as CollaborateCom, ICC, International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, IEEE Transactions on Services Computing, and Journal on Communications. This paper tries to analyze and contrast all kinds of reference materials, which focus on the energy conservation study of MCC in 5G. Its main goal is to conclude the current existing problems, and it also points out the key research directions for the future. This work will provide a solid theoretical foundation for the practical applications.