



## 未来移动通信系统中的通信与计算融合

周一青<sup>1,2,3</sup>, 李国杰<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院大学, 北京 100190; 2. 中国科学院计算技术研究所, 北京 100190;  
3. 移动计算与新型终端北京市重点实验室, 北京 100190)

**摘要:** 旨在从不同层面梳理、总结通信与计算融合, 明确其未来发展的重点。首先介绍了早期的通信与计算融合。作为信息科学的核心技术, 通信与计算是天然融合的。在目前的移动通信系统中, 从单个设备和单个技术层面而言, 通信与计算已有较好的融合, 但要突破传统移动通信系统的瓶颈, 更需要从系统的角度开展通信与计算融合的研究与应用。已有研究初步表明, 从系统层面融合通信与计算, 有望降低对移动通信容量的需求, 提升系统支撑业务的能力。面向未来移动通信系统, 可从定义系统服务能力(基础理论), 构建可扩展、可重塑、透明化、模块化的系统架构以及研究业务感知的跨层信息交流机制等多方面, 深入探讨通信与计算融合, 推动移动通信系统的可持续发展。

**关键词:** 移动通信; 通信与计算融合; 系统思维; 信息交流; 服务能力

**中图分类号:** TN911

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2018120

## Convergence of communication and computing in future mobile communication systems

ZHOU Yiqing<sup>1,2,3</sup>, LI Guojie<sup>1,2,3</sup>

1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3. Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190, China

**Abstract:** An overview and summary was provided on the convergence of communication and computing and the future research directions were clarified. As two key technologies of information science, communication and computing were born to be converged. In current mobile communication systems, from a single device or technique point of view, communication and computing had been well converged. However, to break the bottleneck of traditional mobile communication systems, it was necessary to converge communication and computing in a system level. Existing research demonstrates that a systematic convergence of communication and computing will reduce the channel capacity requirement on the mobile system and thus enhancing the system capability to support more services. Facing future mobile communication system, communication and computing convergence should be further studied in-depth from defining system service capabilities (basic theory), building a scalable, remodelable, transparent, modular system architecture and investigating service-aware cross-layer information exchange mechanisms, thus the sustainable development of mobile communication system could be promoted.

**Key words:** mobile communication, convergence of communication and computing, systematic view, information exchanging, serving capability

收稿日期: 2018-02-08; 修回日期: 2018-03-02

基金项目: 北京市自然科学基金—海淀原始创新联合基金重点项目 (No.L1792049)

Foundation: Beijing Natural Science Foundation (No.L1792049)



## 1 引言

移动通信与计算是信息领域的两大核心技术,移动通信产业与计算相关产业的发展一直密切相关、互相促进。移动通信系统基本遵循“十年一代”的发展规律,经过 2G 至 4G 高速发展的 30 年,增速明显趋缓。目前系统构建成本日益高涨,性能逐渐向理论极限趋近,而收益则趋于平坦化,移动通信系统的可持续发展面临巨大的挑战<sup>[1]</sup>。另一方面,在计算领域,云计算、大数据、智能计算等新概念、新技术层出不穷,展现出极强的生命力。移动通信业界和学术界正积极地从计算领域借鉴先进的理念和技术,期望借助计算的力量,通过通信与计算的融合,突破传统移动通信系统的限制,促进整个系统的可持续发展。

通信与计算的融合一直在发展。笔者认为,作为信息科学的核心技术,通信关注信息传输,计算关注信息处理,两者都是为信息交流服务。因此,本质上两者就是融合的。经过多年的发展,在通信系统的单个设备(如数字程控交换机)以及单个技术(如信道编解码)层面,通信与计算已呈现很好的融合与协同。但在系统层面,移动通信与计算机两个系统的设计思维、架构、研究特征等不尽相同,通信与计算融合存在很大的空间。已有研究表明,如果能够融合、协同移动通信系统中的计算存储与通信能力,就可以降低对系统传输容量的需求,提升业务支撑能力。因此,为了突破传统移动通信发展瓶颈,系统层面的通信与计算融合是一个有潜力的发展方向。面向未来移动通信系统中的通信与计算融合,首先在基础理论方面,系统发展的核心应从传统通信的信息传输转为信息交流(融合通信、计算与存储能力),衡量系统能力的指标也应从传输容量(通信能力)转为服务能力(融合通信、计算与存储能力);其次,在系统架构方面,移动通信系统应融合计算机系统设计理念,不断提升系统的可扩展

性、可塑性、透明性和模块性;另外,未来移动通信系统的发展应以结构化设计为指导思想;最后,在信息交流机制方面,应融合通信、计算与存储能力,研究业务感知的跨层信息交流机制,提高移动通信系统总体的信息交流能力。

## 2 早期的通信与计算融合<sup>[2]</sup>

20 世纪 40—50 年代,在信息科学发展的初级阶段,图灵、维纳、香农等大师在计算、控制和通信领域分别提出了奠基性的理论,通信、计算和控制是天然融合的。计算机可以被看作“另一种形式的通信设备”,而自动机器就像人一样,是一个控制和通信融合的系统。其后,随着计算机和通信技术的发展完善,各自成为独立的学科,分离发展,但通信与计算融合的努力一直在进行。20 世纪 90 年代中期,由国家智能计算机研究院开发中心研制成功的曙光 1000 大规模并行计算机系统就融合了重要的通信技术。曙光 1000 由 36 个节点机构成,各节点机之间需要进行高速的数据通信来实现并行计算,因此采用了二维 mesh 通信网络架构,并创新地采用了基于蛀洞(wormhole)机制的异步路由器(国际上当时只实现了同步蛀洞路由),实现了高速、可靠的数据通信。再如,由解放军信息工程大学研制成功的 HJD04 数字程控交换机(存储程序控制交换机)也是计算与通信融合的典范。HJD04 是面向以电路交换提供语音电话业务的通信系统中的交换设备,它将电话的控制、接续等写成程序,通过计算机程序控制电话通信过程,自动完成电话交换,具备大容量交换的能力。如果说曙光 1000 和 HJD04 体现的是单个设备层面上通信与计算的融合,互联网的发展则为通信与计算融合提供了广阔的平台。互联网本身即通信与计算融合的产物,其网络节点具备丰富的计算、存储能力,节点之间的互联则依赖通信技术。将多个节点互联起来可以形成具有超大计算、存储能力的云,而要应用云计算、

云存储能力又离不开依赖通信技术实现的网络。因此云和网之间已经没有明显的界线，云网融合的根本也正是计算与通信的融合。

### 3 移动通信网络中的通信与计算融合

前述通信与计算的融合中，涉及的主要是有线通信系统。近年来迅猛发展的移动通信网络可以分为以有线通信为主的核心网和以无线通信为主的接入网。

#### 3.1 核心网中的通信与计算融合

目前移动通信网络的核心网面临的主要挑战是网络部署、维护、升级等成本的日益高涨。与提供尽力而为服务的互联网不同，通信网从一开始就是一个以商业经营为目的的网络，必须确保通信服务质量和网络安全，对网络的部署、维护升级、电信设备的性能等都有严格的要求。通信网最初提供的核心服务就是语音通信，为了满足语音通信的实时性等要求，必须使用基于专用集成电路的专用设备。通信专用设备能够保证服务质量，但成本高昂。经过近几十年有线、移动通信的迅猛发展，各种通信服务需求层出不穷，按照传统通信网专用硬件对应专用服务的思路，通信网络已经从一个简单、低负荷、易运维的网络演变成为一个多网共存、高负荷、高能耗、高运维成本的复杂网络，运营商的收益率逐年下降，迫切地需要改变传统思路，降低通信网络的建设成本、运维成本和能耗成本。

近年来运营商积极研发和应用计算机领域的虚拟化技术<sup>[3]</sup>。该技术是将计算机的实体资源包括计算资源、存储资源等，通过抽象和转换后呈现出来，能够透明化底层实体资源，打破实体资源不可切割的障碍，不受实体资源地域等限制，最大化实体资源的利用率，降低网络部署成本。目前通信与计算机领域都在热切研讨及应用的虚拟化技术包括软件定义网络（software-defined networking, SDN）和网络功能虚拟化（network

function virtualization, NFV）<sup>[4]</sup>。SDN 是对网络本身的虚拟化，关注的是网络节点之间的连接。传统互联网中的专用设备如路由器，其数据和控制在混合在一起处理的，由于任一路由器只能获取周围局部的网络信息，造成了网络控制的局部性，降低了数据传输的效率。SDN 将数据面和控制面分离开来，并将控制面从专用设备上提取出来，集中放置，使得网络的控制对网络的数据有一个全面的了解，提高数据传输效率。NFV 则关注各种网络节点功能的虚拟化，基于通用的服务器，通过软件定义的方式，虚拟化地实现网络实体的功能，部署成本低，并能快速适应网络需求变化。将 SDN 和 NFV 联合起来，就可以将原本昂贵的专用通信设备用低成本的通用设备加软件实现。由于数据的控制面集中起来就可以实现标准化，未来网络应用的变革只要改变控制面，无需大量设备的硬件升级，大幅降低了网络运行维护以及升级的成本。

#### 3.2 无线接入网中的通信与计算融合

无论是无线通信还是无线移动通信，点点的传输容量  $C$  都是有限的，可用香农公式表示如下：

$$C = B \cdot \lg(1 + \text{SNR}) \quad (1)$$

其中， $B$  代表信道带宽，SNR 代表信噪比。有线通信的信道条件好，信噪比高，对通信速率的限制少，系统设计的重点在于通信协议。相比有线通信，无线移动通信可实现在任何时间、任何地点与任何人、事、物的通信，能够更加灵活、方便、快速地实现信息交流，但是移动信道的条件较差，信噪比低；此外由于无线频谱资源天然的有限性，信道带宽  $B$  也极其有限。这些都对移动通信的速率提出了较大的限制。因此除了通信协议，移动通信系统设计的重点是如何提升频谱利用率、传输速率。

移动通信无线传输的研究一直致力于提升频谱利用率，逼近香农容量理论极限。例如，信道



编码是提升无线信道可靠性的重要技术。它通过编码计算,将冗余度有逻辑地引入有效数字信息中,形成一个码字。码字在无线信道中传输,很可能被信道畸变,造成误码。在接收端通过解码计算,利用编码引入的有逻辑的冗余,可从带有误码的码字中正确地恢复有效数字信息。香农指出,如果采用足够长的随机编码,就能逼近香农信道容量。传统的信道编码都有规则的代数结构,跟“随机”相距甚远;同时,出于译码复杂度的考虑,码长也不可能太长。所以传统的信道编码性能与信道容量之间都有较大的差距。1993年法国科学家 Claude Berrou<sup>[5]</sup>提出的 Turbo 码是一个长码,它采用多次迭代伪随机译码达到优越的纠错性能,是第一个能够逼近香农容量的信道编码,但其代价是译码算法的计算复杂度非常高。由于信道编解码所需的存储和计算复杂度与编码长度成正比,可见香农容量公式隐含的一个意义是:这是点对点通信,在计算与存储资源不受限制时,所能达到的最大传输速率,此时该最大速率仅由通信资源,即带宽和发送功率(SNR)所决定。如果实际编解码对计算与存储资源有较大的限制,如传统的分组码,那么编码性能与信道容量之间必然有较大的差距。因此,从信道编码这个单一的传输技术看,计算与存储能力的提高能够带来通信能力的增强。但目前这个方向的努力已经接近极限,Turbo 码、LDPC 码以及 Polar 码都可以逼近香农容量,能够继续改进的空间非常小。

正如信道编码一样,任何一个具体的移动通信无线传输技术,都离不开计算,而且计算的作用越来越重要。从这个角度看,通信与计算在无线传输中已有很好的协同与融合。但通信与计算的融合不应限于单个技术层面的融合,更要从系统的高度,合理地优化计算与通信,满足用户日益增长和变化的需求。系统思维是计算机领域研究的一个主要特征,指的是对计算机系统不同层次的抽象和归纳,对整机系统的性能分析和优化

等<sup>[2]</sup>。而移动通信由于整个系统庞大复杂,包括移动终端、无线传输、基站、核心网等,很难对整个移动通信系统的性能进行分析和优化。已有研究大部分局限于某个技术点,比如信道编码、多天线、干扰管控等。随着移动通信发展瓶颈的显现,对未来移动通信的研究应突破传统的局部思维,借鉴计算机领域的系统思维,在研究设计未来通信机制的时候,更多地考虑系统级的因素。如果能够利用、融合整个通信系统中的计算与存储能力,有可能提升整个系统的通信能力。这是因为,计算存储和数据通信都能起到信息交流的作用<sup>[2]</sup>,比如,内容分发网络(content delivery network)在网络各处放置大容量服务器存储内容,可以将用户请求导向离用户最近的服务点,从而降低对远程通信的要求。

目前移动通信领域已经在这个方向上做了初步的探索。参考文献[6]研究了引入移动终端的存储能力以及针对存储内容特别设计的编解码计算能力后,移动通信系统的传输容量增益极限。考虑有  $K$  个终端通过移动通信系统连接到一个基站,该基站存放了  $N$  ( $N \geq K$ ) 个大小相同的文件可供终端下载。在传统的移动通信系统中,终端与基站的信息交流仅依赖移动通信,通信容量是衡量系统服务能力的唯一指标。现考虑每个终端有存储  $M$  ( $M < N$ ) 个文件的能力。那么终端与基站的信息交流将分为两步进行:第一步是内容放置,即在非繁忙时段,将终端有可能需要的内容从基站推送给终端。第一步信息交流的限制因素不在移动通信能力,而是终端的存储能力。第二步是信息分发,终端向基站提出内容请求,基站传输相关内容给终端。这一步的限制因素才是移动通信能力。假定  $K$  个终端各自向基站发出下载一个文件的需求。在传统的移动通信系统中,基站需要同时传送  $K$  个文件给  $K$  个终端,对通信传输容量的需求是  $K$ 。当每个终端有存储  $M$  个文件的能力后,在内容放置阶段基站可将每个文件的  $M/N$  部分推

送给终端,共 $N$ 个文件,占满终端的存储空间,这样在信息分发阶段,无论终端需要哪个文件,基站只要向每个终端传输 $(1-M/N)$ 个文件,对通信容量的要求是 $K(1-M/N)$ 。可见,存储能力给移动通信传输容量带来的增益(即对传输容量需求的下降比例)为 $(1-M/N)$ 。该增益只与单个终端的存储能力相关,故称为局部增益。当终端的存储能力与基站的存储内容可比拟时,局部增益是相当可观的。

但一般而言,基站端的内容量会远远大于终端存储能力,此时的局部增益就非常小。因此,参考文献[6]进一步提出了编码多播的概念,其主要思想是,在第一步内容放置阶段精细地设计放在每个终端的内容,为第二步信息分发阶段构造多播的机会。这样第二步信息分发时,基站可采用编码多播的机制进一步降低传输数据量,带来的传输容量的增益可达 $1/(1+KM/N)$ 。该增益与所有终端的存储能力 $KM$ 相关,因此称为全局增益。如图1所示,基站端有 $N=2$ 个文件,有 $K=2$ 个终端,每个终端的存储能力 $M=1$ 。将基站端的两个文件二等分,标记为 $\{A_1, A_2\}$ 以及 $\{B_1, B_2\}$ 。在第一步内容放置阶段,基站将 $A_1$ 和 $B_1$ 推送给终端1,将 $A_2$ 和 $B_2$ 推送给终端2。在第二步信息分发阶段,终端1和2分别请求文件A和B。此时基站可将 $B_1 \oplus A_2$ ,即 $B_1$ 和 $A_2$ 按比特异或的结果广播给终端,终端1和终端2分别根据已存的内容 $B_1$ 和 $A_2$ ,恢复出 $A_2$ 和 $B_1$ 。如果不采用编码多播,第二阶段需要传输 $K(1-M/N)=1$ 个文件,采用编码多播后,第二阶段需要传输 $K(1-M/N)/(1+KM/N)=0.5$ 个文件,进一步降低了对传输容量的需求。

参考文献[7]探讨了通信计算存储融合的移动通信网络的一些基础理论问题,试图给出计算和存储资源在理论上的度量方式以及在考虑通信计算存储三维资源时给出移动通信网络的容量。研究认为,通信维度的操作例如编码和调制,只是保护了信息流,并未改变信息流,其度量单位为

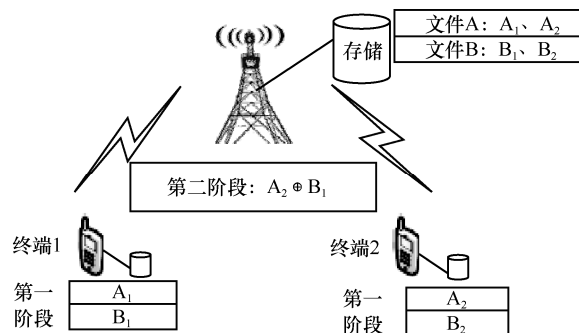


图1 编码多播示例

bit/(s·Hz); 存储维度的操作则是引入了非因果性,即时域的可逆性,能够增强系统在更长的时间范围内传输信息的能力,其度量单位为 byte; 而与计算领域以 flops 来定义计算性能不同,该研究将移动通信网络中融合的计算认为是信息流之间的代数或者逻辑操作,它会改变信息流,因此在接收端也需要额外的代数或者逻辑操作恢复出原信息流。这种融合计算的度量单位被定义为参与计算的移动通信网络节点数(例如协作多点传输<sup>[8]</sup>中的节点数)或者信息流数(例如网络编码<sup>[9]</sup>中涉及的信息流数)。从上述定义可见,通信的度量是一个实数,而存储与计算的度量都是整数,这样的定义能够将存储和计算与通信资源分离开。以编码多播<sup>[6]</sup>为例,该研究给出了在上述定义下,存储和计算能够给移动通信网络容量带来的增益,该增益随存储和计算资源线性增长。

总结而言,面向移动通信系统不同的业务需求,如果能够从系统层面融合通信、存储与计算,利用计算存储的信息交流能力,有可能突破传统通信系统的容量限制,将移动通信系统的核心功能从传统的信息传输能力转变为信息交流能力,提升系统的业务支撑能力。

#### 4 未来的通信与计算融合

面向未来的移动通信系统,可从多个方面进一步深入探讨通信与计算融合。

基础理论:未来移动通信系统服务能力的度量(metric)。如前所述,传统移动通信系统主要



关注通信能力，其核心功能是信息传输。在融合了计算存储以后，未来移动通信系统应利用计算存储的信息交流能力，协同原有的无线传输能力，将系统的核心功能转为信息交流。与此同时，应提出新的系统能力的定义与度量方法。在早期的移动通信网络如 GSM 中，网络只提供单一的实时语音通信业务，此时通信即网络的核心功能也是核心业务，通信的能力（或容量）等同于网络的服务能力；随着移动通信网络的发展，网络提供的业务越来越多样化，通信只能作为网络的核心功能之一，不再等同于核心业务<sup>[7]</sup>，通信的能力也不再等同于网络的服务能力。移动通信网络提供的业务对通信、计算和存储能力的需求不尽相同。例如实时语音服务主要依赖通信能力，而非实时视频流下载主要依赖存储能力，未来 5G 的杀手级应用——移动 AR/VR 则对网络的边缘计算<sup>[10]</sup>能力提出很高的要求。可见，面向不同的业务需求，融合通信、计算和存储资源，未来移动通信系统的服务能力远大于通信能力。如何定义服务能力，构建一套新的基础理论体系，是亟须解决的根本与核心的问题。

系统架构：融合计算机系统设计的思维，加强系统可扩展性（scalable）、可重塑性（elastic）、透明性和模块化<sup>[2]</sup>。可扩展性指的是扩大系统规模时，性能应接近线性提高。但受限于通信开销太大，往往难以实现。目前移动通信系统已采用将内容或服务尽量拉近终端侧，降低通信开销的方法，来提升系统的可扩展性<sup>[11]</sup>。比如移动边缘计算<sup>[10]</sup>，只有在确实需要的时候移动用户才会接入远端强大的云计算资源帮助其计算，一般情况都可以将其计算卸载在近端的移动边缘计算节点。另外欧洲的 TROPIC 项目<sup>[12]</sup>计划在小基站上增加云的功能（云增强小基站），这样移动用户可以在近端通过无线接入云服务。由于无线通信和计算资源都被拉到用户近端，降低了通信开销，云增强小基站可同时提升无线通信和计算的可扩

展性。可重塑性指的是能够快速重组现有资源，构建新的架构适应新的负载需求；透明性指的是屏蔽系统底层架构的变化，用户只需关注上层的业务逻辑；模块性指的是像堆积木一样构建系统，与可重塑性相辅相成。移动通信领域目前也已经在这几个方面努力推进。正如前文提到的在移动通信核心网应用的 SDN 和 NFV 技术，增加了系统的透明性和可重塑性；此外，软件无线电（software radio）技术与 NFV 的思想类似，希望构建一个具有开放性、标准化、模块化的通用硬件平台，通过加载不同的软件来实现不同的移动通信功能，如设置工作频段、通信协议等；网络切片技术则是根据时延、带宽、可靠性、安全性等不同的服务需求，将电信运营商的物理网络划分为多个虚拟网络，每个虚拟网络应对不同的应用场景，满足不同的需求。总体而言，未来移动通信系统的可扩展性、可重塑性、透明性和模块化越强，其服务能力越强。

结构化：未来移动通信系统发展的方向。20 世纪 70 年代 Dijkstra E W 等计算机科学家深入研究了“结构化程序设计”，为后来的软件工程奠定了基础，成为软件技术发展的一个里程碑。目前的移动通信系统与当年的软件情况类似，需要以结构化设计为指导思想。未来通信网络的出路在“结构化”，应深入研究分布式系统的“结构”。移动通信网络像自然界一样，也在不断地进步演化，因此所谓“结构化”不像简单的机械装备一样，先有固定的蓝图，需要在动态演变中逐步提高“结构化”程度。

信息交流机制：融合通信、计算和存储的业务感知信息交流机制。传统移动通信系统的设计目标是作为一个信息传输的管道，不管传送什么信息，力求更快更可靠，信息交流等同于物理层信息传输。随着移动通信系统承载的业务越来越多样化，移动数据流量指数级增长，但物理层信息传输能力受限于有限的频谱资源和信道容量，

将无法支撑上述的业务发展。因此必须突破传统思维,打通物理层信息传输管道和上层业务应用之间的联系,感知业务内容的需求与特性,一方面融合计算存储,增强信息交流能力,另一方面,与物理层信息传输能力相适配,提高移动通信系统整体的信息交流能力。

## 5 结束语

移动通信系统经过近几十年的迅猛发展,通信容量趋于饱和,可持续发展能力堪忧。突破传统移动通信发展瓶颈的一种思路是融合计算机领域的思想和技术。事实上,通信与计算融合的努力可追溯到信息科学发展的早期,而目前移动通信系统在核心网和无线接入网方向都开展了通信与计算融合的研究,初步表明通信与计算融合能有效降低网络部署与维护成本,降低对系统的容量需求,从而提升系统支撑业务的能力。未来可在基础理论、系统架构、结构化设计、信息交流机制等多方面进一步深入探讨。期望通过通信与计算的融合,推动移动通信系统可持续发展。

## 参考文献:

- [1] China Mobile Research Institute. C-RAN: the road towards green RAN[R]. 2014.
- [2] 李国杰. 对通信与计算机技术融合的初浅认识[R]. 2014.  
LI G J. Initial understanding of the integration of communication and computer technology[R]. 2014.
- [3] 翟振辉, 邱巍, 吴丽华, 等. NFV 基本架构及部署方式[J]. 电信科学, 2017, 33(6): 179-185.  
ZHAI Z H, QIU W, WU L H, et al. Basic architecture and ways of deployment of NFV[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(6): 179-185.
- [4] 什么是 NFV? 它与 SDN 有什么关系?[EB/OL]. (2015-05-04) [2018-02-08]. <https://www.sdnlab.com/11368.html>.  
What is NFV? What is the relationship between SDN and SDN?[EB/OL]. (2015-05-04)[2018-02-08]. <https://www.sdnlab.com/11368.html>.
- [5] BERROU C, GLAVIEUX A. Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes[J]. IEEE Transactions on

Communications, 1996, 44(10): 1261-1271.

- [6] MADDALAH-ALI M, NIESEN U. Fundamental limits of caching[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2014, 60(5): 2856-2867.
- [7] LIU H, CHEN Z, QIAN L. The three primary colors of mobile systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(9): 15-21.
- [8] GARCIA V, ZHOU Y, SHI J L. Coordinated multipoint transmission in dense cellular networks with user-centric adaptive clustering[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(8): 4297-4308.
- [9] AHLSWEDER, CAI N, LI S Y R, et al. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [10] ETSI. Mobile edge computing: a key technology towards 5G[S]. 2015.
- [11] BARBAROSSA S, SARDELLITI S, LORENZO P D. Communication while computing: distributed mobile cloud computing over 5G heterogeneous networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(6): 45-55.
- [12] Distributed computing, storage and radioresource allocation over cooperative femtocells(TROPIC)[EB/OL]. (2017-04-28) [2018-02-08]. <http://www.ict-tropic.eu/>.

## [作者简介]



周一青(1975-),女,中国科学院大学教授,中国科学院计算技术研究所“百人计划”研究员、博士生导师,无线通信技术研究室副主任,移动计算与新型终端北京市重点实验室研究员,主要研究方向为移动通信、通信与计算融合等。已在相关领域发表论文 100 多篇,曾获得 ISCIT2016、IEEE PIMRC2015、CCS2014、WCNC013 最佳论文奖及 IEEE Transactions on Vehicular Technology 期刊 2014 最佳编辑奖。



李国杰(1943-),男,中国科学院大学计算机与控制学院院长,中国科学院计算技术研究所首席科学家,移动计算与新型终端北京市重点实验室学术委员会主席,中国工程院院士,第三世界科学院院士,主要研究方向为并行处理、计算机体系结构、人工智能、组合优化等。曾先后获得国家科学技术进步奖一等奖、二等奖,首届何梁何利基金科学与技术进步奖等奖项。