



专题:4G&5G

云无线接入网的系统架构和技术演进^{*}

闫 实,王文博

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

摘 要:云无线接入网(cloud radio access network, C-RAN)被认为是有望解决第五代移动通信(5G)技术服务需求问题的核心技术方案之一,已有研究表明 C-RAN 具有显著的技术优势,能有效提升网络的谱效率和能效率。总结了 C-RAN 的研究现状,给出了其系统架构和核心关键技术挑战,并讨论了 C-RAN 架构相比传统方案具有的优势和性能提升。

关键词:云无线接入网;5G;系统架构;技术演进

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.03.010

System Architecture and Technology Evolutions in Cloud Radio Access Networks

Yan Shi, Wang Wenbo

(Key Laboratory of Universal Wireless Communication, Ministry of Education,
Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Cloud radio access network (C-RAN) has been proposed as one of the most promising solutions to meet the service requirements of the fifth generation (5G) wireless communication systems. The published achievements indicate that C-RAN has many advantages, which can improve the spectrum efficiency and energy efficiency simultaneously. The state-of-the-art research achievements, system architecture and key technology challenges in C-RAN were studied. Furthermore, the performance gains over the traditional systems were introduced as well.

Key words: cloud radio access network, 5G, system architecture, technology evolution

1 引言

随着第四代移动通信(4G)技术在全球的加速部署和商业运作,人们对于数据业务的需求越来越高。然而,在网络系统容量越来越高、用户体验越来越好的背后,移动网络运营商用于建设、运营、升级无线网络的支出不断增加,而收入却增加缓慢。为了应对即将在 2020 年到来的移动互联网数据爆炸,同时保持移动运营商的持续盈利和长期

增长,全球范围内的通信技术人员都在寻找新一代能够以低成本为用户提供无线业务的方法。其中,无线接入网(RAN)的绿色、低成本、灵活部署成为革新的重要方面。数据业务流量增长曲线如图 1 所示。

无线接入网是移动通信系统的重要组成部分,提供某个设备(如移动电话、一台计算机或任何远程控制机)与核心网(CN)的接入,可以向用户提供不间断高质量的数据服务。传统的无线接入网在运维过程中存在着如下五大挑战^[1]:

^{*} 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2013CB336600),北京市自然科学基金资助项目(No.4131003),“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项基金资助项目(No. 2013ZX03001001, No.2012ZX03001031),教育部博士点学科专项科研基金资助项目(No.20120005140002)

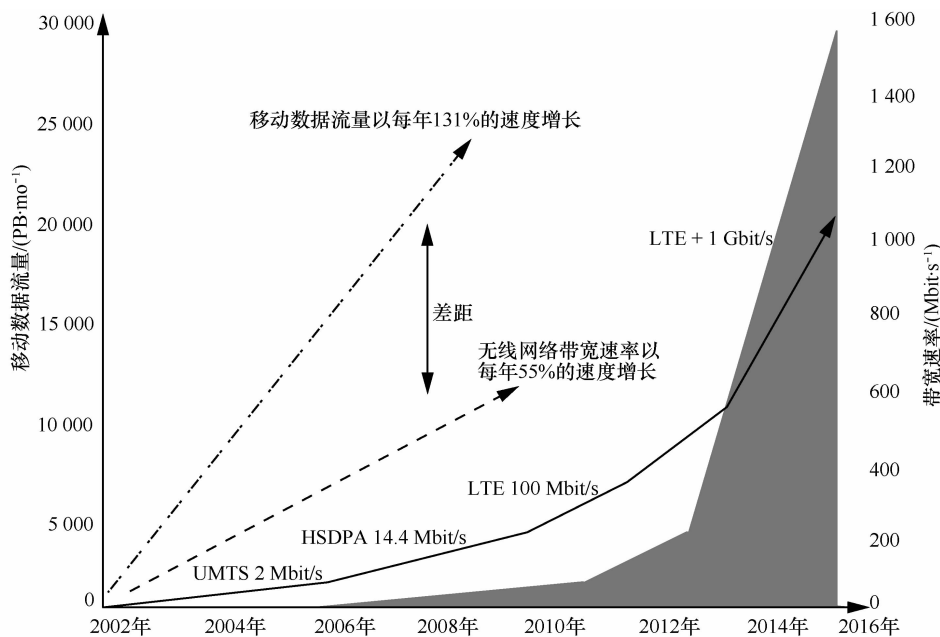


图1 数据业务流量增长示意

- 大量基站导致高额能耗;
- 网络的 CAPEX/OPEX (capital expenditure/operating expense, 资本支出/运营成本) 逐年增高;
- 大容量、低成本的需求;
- 导致基站利用率低下的潮汐效应;
- 互联网业务爆炸性增长对核心网的巨大压力。

这些挑战使得移动运营商的运营维护成本逐年增加, 利润却不能同步增长。无线接入网必须重新考虑新的网络框架, 以适应新的环境, 并找到可以适用于移动互联网性能、成本低的无线接入网络的绿色建筑的方法。新一代无线接入网应具备以下特征:

- 降低能源消耗, 减少资本开支和运营开支;
- 提高频谱效率, 增加用户带宽;
- 开放平台, 支持多标准和平滑升级;
- 对终端用户提供更友好的互联网服务。

在此背景下, 2010 年, 中国移动通信有限公司研究院提出了全新的面向绿色演进的无线网络架构——C-RAN, 即通过基带资源集中处理、协作式无线电 (cooperative radio) 和实时云计算 (real-time cloud computing) 无线网络架构, 实现更加清洁的无线移动网络。在 2011 年 10 月于瑞士日内瓦举行的 ITU 国际电信通信展上, 中国移动展出了可同时支持 C-RAN 的 GSM/TD-SCDMA/TD-LTE 标准的多模 C-RAN 原型机。受此驱动, 国内外对 C-RAN 的原理和关键技术进行了深入研究, C-RAN 因其融合了计算和通信技

术, 在提高效率和谱效率方面具有显著的技术优势, 被视为下一代移动通信系统 (即 5G) 的核心关键解决方案之一, 无论是在工业界还是在学术界, 都展开了深入的研究和讨论。

2 C-RAN 的网络架构

C-RAN 融合了集中化处理、协作式无线电以及实时云计算构架^[2,3], 根据 BBU (building base band unit, 室内基带处理单元) 和 RRU (remote radio unit, 远端射频单元) 间不同的功能分解, 存在两种 C-RAN 方案: 一种是“完全集中式处理”, 其基带 (如第一层)、第二层和第三层的 BS (base station) 功能都集中在 BBU 中; 另一种是“部分集中式处理”, 其 RRU 不仅具备无线电收发功能, 而且具备基带功能, 其他高层的功能仍然集中在 BBU 中。不同的功能分割方式如图 2 所示。

基于以上两种不同的功能区分方法, 存在两种 C-RAN 架构, 两者都包括 3 个组成部分: 由 RRU 和天线组成的分布式无线网络; 连接远端无线射频单元的低时延、高带宽的光传输网; 由实时虚拟技术和高性能处理器组成的集中式基带处理池。

完全集中式 C-RAN 架构如图 3(a) 所示, 有易于升级和网络扩容的优点, 还具有更好的支持多操作标准的容量, 能实现最大资源共享, 更便于支持多单元协作信号处理; 主要缺点是获取基带 I/Q 信号, BBU 间的带宽需求很

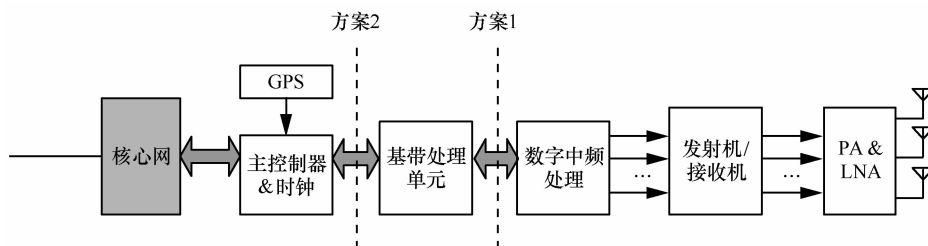


图 2 C-RAN 的两种网络架构分割方式

高。在极端情况下,一个 20 MHz 带宽的 TD-LTE 8 天线需要 10 Gbit/s 的数据传输速率。部分集中式 C-RAN 架构如图 3(b)所示,将基带处理功能从 BBU 中分出并融入 RRU 中,使其需要的 BBU 与 RRU 间的传输带宽缩小。与完全集中式架构相比,BBU-RRU 的连接只需要携带解调数据,其只占原始基带 I/Q 示例数据的 1/20~1/50。然而,它也有自己的缺点:由于基带处理功能融入 RRU 中,其升级的灵活性降低,并且不利于多单元协作信号处理。

在两种不同的架构下,移动运营商可以根据不同的负载、不同的业务类型,快速灵活地进行部署并能够及时方便地升级。当网络需要扩充容量或者扩大覆盖范围时,操作人员只需要增加新的远程射频单元,并用光纤将其连接到集中的 BBU 即可;当网络的负载增加时,操作人员也仅需要在中心机房添加一个新的通用 BBU 就可以增强系统的处理能力。结合开放式平台和处理器的“全集成方案”将使软件无线电技术更易于实现。

C-RAN 与传统分布式网络的不同之处在于,远端射频单元不再和单一固定的基带处理单元直接连接,每个 RRU

都独立于任何一个固定的基带处理单元实体,RRU 发送或接收到的信号通过资源调度和共享在虚拟基站进行处理,而虚拟基站的处理能力则由一个实时虚拟基带池分配。实时虚拟技术的应用使得 C-RAN 系统各接口的兼容性和匹配灵活性达到最大。

3 C-RAN 架构的优势与性能提升

第 2 节所述的完全集中式处理和部分集中式处理方案所对应的关键技术还在发展和演进中,能够根据网络实际情况而适时地部署在不同的应用场景中。相对于传统网络架构,C-RAN 架构的优势主要体现为以下几点。

3.1 升级简便,部署快速

传统网络建设宏基站往往选择在写字楼楼顶、住宅高层等地,这种方式受到越来越多客观因素的影响;C-RAN 架构下,BBU 集中放置于某地的骨干机房,每个远端无线射频单元通过光纤拉远至覆盖点。操作人员只需安装远端设备、天线及配置电源,无需新建任何固定站点和租赁新的机房,可以最大限度地利用已有的公共市政资源,是一

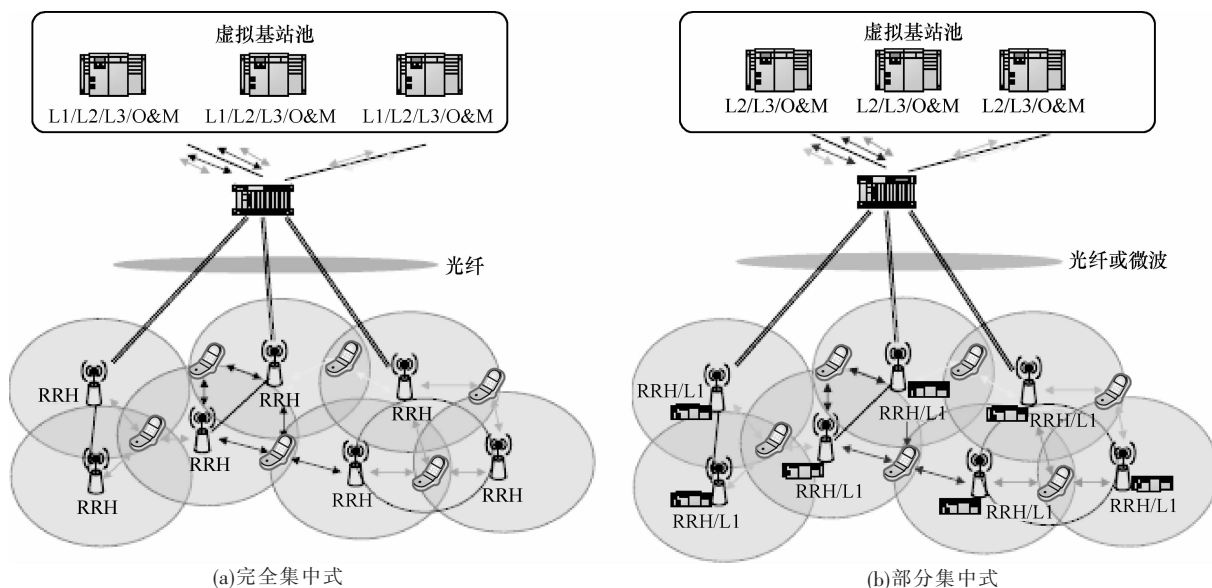


图 3 两种不同的 C-RAN 架构示意



种部署灵活、升级快速的非常经济有效的方法,大大降低了运营商对无线接入网的建设和维护成本。采用虚拟基站技术后,网络仅需数月就可实现升级换代,而传统基站网络每次升级可能需要花费数年的时间。

3.2 节约成本,提高网络效率

C-RAN 的基本原理是将集中式 BBU 以及一些辅助配套设施,同时集中放在骨干的中心机房进行管理,简化了运营管理,相对于传统接入网络的大多数基站站址,节省了大量运营成本。C-RAN 中远端射频单元在功能上大幅简化,与之相对应的功耗、维护费用也相应降低。不同 RRU 的基带信号,可以在基带池中动态调度以实现集中处理,使得基带处理资源得到最佳利用,且集中式处理的方法可以极大地减少配套设备尤其是机房空调所带来的功耗。

在非高峰期,用户数不多的情况下,可以降低甚至关闭非忙碌工作节点,或者将少量用户切换到附近节点从而关闭某节点,在不影响系统覆盖和服务质量的前提下,减少潮汐效应带来的损害,同时能够节省能源,这也符合绿色通信的要求。中国移动与其供应商及合作伙伴利用现有的商用设备,于 2010 年在广东省珠海市的实地网络中进行了 C-RAN TD-SCDMA 集中化部署试验,部署验证结果显示,在与 GSM 不共站址的情况下,C-RAN 集中化部署方式可显著降低新建网络的建设和运营成本,其中 OPEX 可降低 53%,CAPEX 可降低 30%,采用 C-RAN 集中式基带池部署网络,单基站节省空调用电功耗达到 75.3%^[4]。

两层 C-RAN 异构网络与传统宏基站小区的能效对比如图 4 所示,4 条曲线由下至上分别用曲线 1~曲线 4 表示。曲线 1 代表仅有宏基站场景的能耗,所有资源都由宏基站分配,其余 3 条线代表两层 C-RAN 异构网络场景的

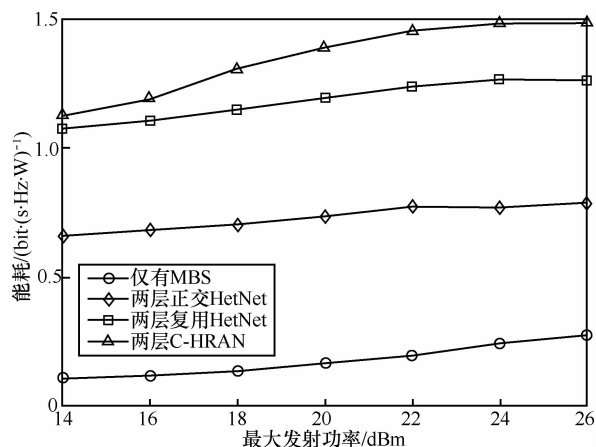


图 4 C-RAN 与传统宏基站小区能效对比

能耗。其中,曲线 2 表示 RRU 和宏基站的频率资源正交,曲线 3 表示 RRU 和宏基站频率复用,曲线 4 代表 RRU 和宏基站的部分资源正交,部分资源复用。可以看出,4 个场景的能效依次增加,C-RAN 场景下部分资源正交、部分资源复用的方案最优。

3.3 自适应资源分配以提高网络容量

所有用户在整个通信过程中接收和发送的信息、无线数据业务信息和信道质量参数等信息都在基带池中得到共享并进行调配,这样网络就可以根据不同区域或不同时段灵活调配处理资源,减少不均衡负载所带来的一系列问题。与此同时,大量的互联网业务被分化或移出核心网络。多点协作(coordinated multiple point, CoMP)技术在 C-RAN 架构下也更易实现,多个 RRU 可以形成一个天线阵列为单一用户服务,把原来的干扰转化成有用信号,从而可以显著提高系统容量,同时也可以为用户带来更好的服务体验。C-RAN 上行联合多个 RRU 共同解码的容量与传统单一基站处理的容量性能对比如图 5 所示。

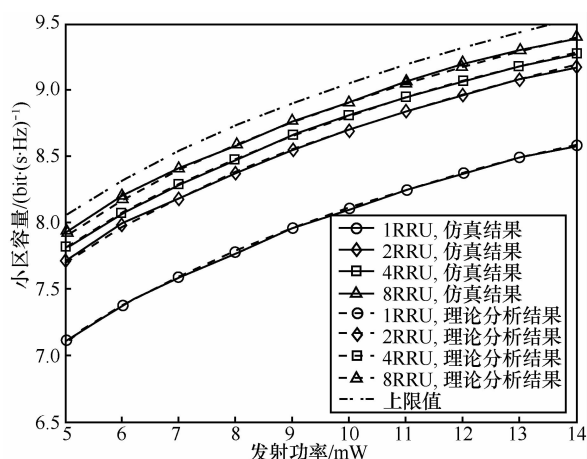


图 5 C-RAN 多 RRU 联合处理与传统单宏基站小区容量对比

4 C-RAN 演进路线及挑战

作为下一代无线接入网演进的核心关键方案之一,C-RAN 越来越受到运营商、设备厂商和国内外科学术界的重视,大家对于 C-RAN 需求和技术演进的看法日趋明朗。下面将对 C-RAN 渐进式的技术演进和可能遇到的问题进行简单介绍。

4.1 大规模分布式 RRU 网络

C-RAN 架构下的大规模分布式 RRU 网络类似于传统分布式网络,可以通过大量只包含射频模块的新节点拉近用户和天线间的距离,获得更高的频率复用。不同点在于,

传统分布式网络的所有基带处理仍集中于基站,天线站相当于基站的不同扇区;而在 C-RAN 架构下,RRU 通过光纤可以拉远至任意位置择优部署,不再受单一 BBU 束缚。所有从远端无线射频单元发来的数字基带信号可以被路由分配至指定资源池中的基带单元进行处理,这样任何独立的基带处理单元的错误都不会影响系统的功能,实现在单元错误情况下的高可靠性。

在具体实现上,首先,要考虑到基带池中不同基带处理单元之间必须有高带宽、拓扑灵活的交换网络互联互通;其次,要考虑到各个 RRU 到集中式处理中心的同步误差问题;此外,还要考虑如何控制各 RRU 间进行协同控制时的额外信令开销以及回程线路受限问题。

4.2 软件无线电

软件无线电 (software defined radio, SDR) 是一种新型的网络技术,基于软件定义的协议而非通过硬连线实现。在 C-RAN 架构中,作为整个网络处理和分析核心的基带处理功能,就可用软件无线电实现。从分布式的 RRU 处收集上行、下行信道信息和用户数据的过程以及携带这些信息的虚拟基站间接口协议和功能实现等,也可通过下载软件和更新进行升级,而无需升级硬件。在 C-RAN 架构下运用软件无线电技术还可以实现如 CoMP 处理、多接入网虚拟化以及动态小区重置等功能。

软件无线电作为实现 C-RAN 最重要的技术之一,在实现上必须有可重新编程和可重构的能力,使设备可以适用于各个标准,增强各个设备商不同设备间的互联互通,以提高系统兼容性。

4.3 云基带池的协作式处理

云基带池和基于云基站池的全局协作处理是 C-RAN 架构的两个特征,云基带池是由大量基带处理单元通过互联框架连接形成的巨大计算池。远端射频单元将接收到的无线信号通过高速光纤和负载转换器发送到软件无线电虚拟基站后,需要进行实时协作处理,在极短时间内快速、高效地交换多个基站间的调度信息、信道信息和用户数据,并最终由云基带池实时动态分配的计算资源完成无线基带信号的处理。

在实际部署中,高速光纤的铺设和负载均衡器的设置都是工程施工和成本的重大挑战,协作处理时的调度开销和反馈量提升也是需要深入研究的重点。

4.4 信令与控制分离机制

现存的无线网络最初的设计目的是满足用户及传统

业务应用(如语音及视频业务)的需求,但随着越来越多的新型业务类型的出现,移动数据业务呈指数型增长,这些业务,特别是短时突发业务(如即时通信(instant message, IM)类业务,包括文字、图片、周期性回传信息等),对移动网络提出全新的挑战。这些移动应用带来的最大问题是造成网络通信和空闲状态频繁切换,不仅损害设备电池,更给移动网络带来大量额外的信令开销。现在的网络对所有类型的业务只设计了一种面向连接的信令/控制机制,这就导致在突发数据流出现时会产生大量额外开销。

在 C-RAN 架构下,传统的信令/控制机制会被一种联合面向连接和无连接的全新机制所取代,这种机制可以根据不同业务类型以及网络负载进行动态调整。将来用户体验等指标也将被考虑到对信令的优化中,如持续性通信业务相对于即时通信业务在时延和可靠性方面更加宽松,针对这两种不同业务进行特殊的信令设计就可以最大限度地节省开销。

4.5 全双工基站技术

传统的蜂窝网络都是单一的频分双工或时分双工,为了提高频谱效率以及系统能效,全双工基站技术越来越受到运营商的注意,基站采用全双工技术可以实现同时同频的传输或接收不同终端的数据。由于在发射和接收过程中不可避免地出现发送信息对接收信息造成的自干扰,干扰消除技术是全双工系统成功的关键。

为了缓解这一问题,首先需要获知用户间干扰信道的状态信息,进一步利用功率控制等手段调度上行和下行用户对,从而减小自干扰。现有的一些抗干扰技术,如天线配置技术、正交极化技术、干扰对齐技术以及数字消除技术等都可以部分减少自干扰,但更全面高效的干扰消除技术还有待进一步的研究。

5 结束语

在用户对数据业务需求越来越高的时代,传统无线接入网高额的运营维护费用已经不能满足运营商对于利润的追求,建设一个绿色节能、保持长期盈利的可持续发展网络是所有运营商的梦想。C-RAN 作为一个全新的网络架构受到越来越多运营商的重视,势必成为未来发展的方向。本文从架构、优势、技术演进等方面分析了 C-RAN 技术的特点,给出了初步的解决方案,为未来云无线接入技术研究提供了一种新的思路。



- 4 Dousse O, Franceschetti M, Macris N, *et al.* Percolation in the signal to interference ratio graph. *Journals on Appl Prob*, 2006(43): 552~562
- 5 Kong Z, Yeh E. Connectivity, percolation, and information dissemination in large-scale wireless networks with dynamic links. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009(1)
- 6 Vaze R. Percolation and connectivity on the signal to interference ratio graph. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM 2012)*, Orlando, Florida, USA, March 2012
- 7 Ren W, Zhao Q, Swami A. Connectivity of heterogeneous wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2011, 57(7): 4315~4332
- 8 Ao W C, Chen K C. Cognitive radio-enabled network-based cooperation: from a connectivity perspective. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(10):1969~1982
- 9 Lu D, Huang X, Li P, *et al.* Connectivity of large-scale cognitive radio Ad Hoc networks. *IEEE INFOCOM*, 2012(1)
- 10 Wang P, Akyildiz I F, Al-Dhelaan A M. Percolation theory based connectivity and latency analysis of cognitive radio Ad Hoc networks. *Wireless Networks*, 2011(17):659~669
- 11 Li D, Gross J. Robust clustering of Ad Hoc cognitive radio networks under opportunistic spectrum access. *Proceedings of IEEE International Conference on Communication*, Kyoto, Japan, Jun 2011
- 12 Liu S S, Lazos L, Krunz M. Cluster-based control channel allocation in opportunistic cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012,11(10): 1436~1449
- 13 Srinivasa S, Hartin M. Distance distributions in finite uniformly

random networks: theory and applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010,59(2):940~948

- 14 Erdos P, Renyi A. On the evolution of random graphs. *Publ Math Inst Hungary Acad Sci*, 1960(5):17~61
- 15 Achlioptas D, Souza R M D, Spencer J. Explosive percolation in random networks. *Science*, 2009(323)
- 16 Serra M C. A Multi-Type Branching Processes Approach to the Evolutionary Dynamics of Escape, 2007

[作者简介]



郭敬元,男,复旦大学电子工程系硕士生,主要研究方向为异构网络、网络连通性与渗流等。

杨涛,男,复旦大学电子工程系副教授,主要研究方向为认知无线电、网络信息感知及融合、智能信号处理等。

冯辉,男,复旦大学电子工程系讲师,主要研究方向为分布式信号处理理论及应用、网络智能信息处理等。

胡波,男,复旦大学电子工程系教授,主要研究方向为数字图像处理算法研究、信息传输与数字通信、数字系统的设计与实现等。

(收稿日期:2014-01-06)

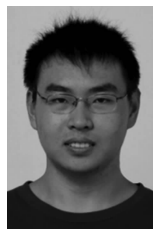
(上接第 53 页)

参考文献

- 1 China Mobile Research Institute. C-RAN, the Road Towards Green RAN. White Paper, 2011
- 2 Demestichas P, Georgakopoulos A, Karvounas D, *et al.* 5G on the horizon. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2013(9): 47~59
- 3 Chih-Lin I, Rowell C. Toward green and soft: a 5G perspective. *IEEE Communications Magazine*, 2014(2):66~73
- 4 谢仲威. 浅谈 C-RAN 技术的应用. *电子制作*, 2013(12)
- 5 Peng M G, Wang W B. Technologies and standards for TD-SCDMA evolutions to IMT-Advanced. *IEEE Communications Magazines*, 2009, 47(12):50~58
- 6 Peng M G, Liu Y, Wei D Y, *et al.* Hierarchical cooperative relay based heterogeneous networks. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(3):48~56
- 7 Li H M, Hajipour J, Attar H, *et al.* Efficient HetNet

implementation using broadband wireless access with fiber connected massively distributed antennas architecture. *IEEE Wireless Communication*, 2011(3): 72~78

[作者简介]



闫实,男,北京邮电大学博士生,主要研究方向为 C-RAN 和分层异构网络性能。

王文博,男,北京邮电大学教授,主要研究方向为新一代移动通信体制、信号处理在移动通信中的应用。

(收稿日期:2014-02-28)