



专题:5G

## 5G 超密集组网网络架构及实现

张建敏, 谢伟良, 杨峰义

(中国电信股份有限公司技术创新中心, 北京 100031)

**摘要:**超密集组网通过小基站加密部署提升空间复用的方式,成为解决未来 5G 网络数据流量 1 000 倍以及用户体验速率 10~100 倍提升的有效解决方案。然而,小区密集部署带来的干扰问题以及小基站较小的覆盖范围导致的高速移动用户频繁切换问题,会降低网络容量和用户体验。因此,为了同时考虑未来 5G 超密集组网“覆盖”和“容量”的问题,提出了以控制承载分离以及簇化集中控制为主要技术特征的 5G 超密集组网网络架构。除此之外,针对宏—微和微—微的超密集组网部署场景,给出了具体实现方案。更进一步地,针对 5G 超密集组网网络架构中可能存在的问题与挑战进行了讨论,为后续研究发展提供参考。

**关键词:**5G;超密集组网;控制与承载分离;簇化集中控制

中图分类号:TN92

文献标识码:A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016076

## Architecture and solutions of 5G ultra dense network

ZHANG Jianmin, XIE Weiliang, YANG Fengyi

Technology Innovation Center of China Telecom Co., Ltd., Beijing 100031, China

**Abstract:** Ultra dense network (UDN) is referred to as the most efficient technique for meeting the challenges of 1 000 times higher traffic volume and 10~100 times higher user data rate, which can improve the network capacity dramatically through network densification. However, due to the limited coverage and higher density of small cell, the problems of frequent handover and inter-cell interference become intractable, which degrade the system capacity and user experience. Therefore, in order to satisfy the challenges of coverage and capacity simultaneously, the architecture of 5G ultra dense network was proposed, which was characterized as the separation of control and user planes and cluster-based centralized control. Besides, regarding to the UDN scenarios of macro-micro and micro-micro, different solutions were presented, respectively. In addition, the problems and challenges of the architecture of 5G ultra dense network were also discussed in detail, providing reference for future research and development.

**Key words:** 5G, UDN, separation of control and user planes, cluster-based centralized control

### 1 引言

移动互联网和物联网的快速发展以及各种新型业务的不断涌现,促使移动通信在过去的 10 年间经历了爆炸

式增长。丰富多彩的移动互联网和物联网的业务在给人们的生活带来便利、改变生活方式的同时,对未来移动通信网络提出了更高的要求和挑战。为了能够更好地应对未来移动数据流量的高速增长、海量的设备连接以及各种各样差

收稿日期: 2015-12-18;修回日期: 2016-02-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2015AA01A705)

Foundation Item: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)(No.2015AA01A705)

异化新型业务应用的涌现,全球范围内学术界和产业界已经展开对未来5G移动通信技术的深入研究,主要包括欧盟的5G NOW (5th Generation Non-Orthogonal Waveforms for Asynchronous Signaling) 课题<sup>[1]</sup>、METIS (Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-Two Information Society) 项目<sup>[2]</sup>、5G PPP (5G Public-Private Partnership) 项目,中国的IMT-2020(5G)推进组<sup>[3]</sup>、韩国的5G技术论坛(5G Forum)以及日本的5G研究组“2020 and Beyond Ad Hoc”等<sup>[3-5]</sup>。截至目前,未来5G网络的总体愿景以及性能要求已经达成共识,主要包括更高的数据流量和用户体验速率、海量终端连接以及更低时延、更高可靠性等<sup>[3-9]</sup>。

其中,为了解决未来移动网络数据流量增大1 000倍以及用户体验速率提升10~100倍的需求,除了增加频谱带宽和利用先进的无线传输技术提高频谱利用率外,提升无线系统容量最为有效的办法依然是通过加密小区部署提升空间复用度<sup>[10,11]</sup>。传统的无线通信系统通常采用小区分裂的方式减小小区半径,然而随着小区覆盖范围的进一步缩小,小区分裂将很难进行,需要在室内外热点区域密集部署低功率小基站,形成超密集组网。

可以看出,超密集组网是解决未来5G网络数据流量爆炸式增长的有效解决方案。据预测,在未来无线网络宏基站覆盖的区域中,各种无线接入技术(radio access technology, RAT)的小功率基站的部署密度将达到现有站点密度的10倍以上<sup>[10]</sup>,形成超密集的异构网络,如图1所示。

在超密集组网场景下,低功率基站较小的覆盖范围会导致具有较高移动速度的终端用户遭受频繁切换,从而降低了用户体验速率。除此之外,虽然超密集组网通过降低基站与终端用户间的路径损耗提升了网络吞吐量,在增大

有效接收信号的同时也提升了干扰信号,即超密集组网降低了热噪声对无线网络系统容量的影响,使其成为一个干扰受限系统。如何有效进行干扰消除、干扰协调成为超密集组网提升网络容量需要重点解决的问题。考虑到现有LTE网络采用的分布式干扰协调技术,其小区间交互控制信令负荷会随着小区密度的增加以二次方趋势增长,极大地增加了网络控制信令负荷。

可以看出,如何能够同时考虑“覆盖”和“容量”这两个无线网络重点关注的问题,成为5G超密集组网需要重点解决的问题,也因此成为本文的主要关注内容。

在前期关于5G蜂窝网络架构的分析中提出了5G无线接入网控制面与数据面的分离以及簇化集中控制的思想<sup>[12,13]</sup>。其中,接入网控制面与数据面的分离通过分别采用不同的小区进行控制面和数据面操作,从而实现未来网络对于覆盖和容量的单独优化设计。此时,未来5G接入网可以灵活地根据数据流量的需求在热点区域扩容数据面传输资源,例如小区加密、频带扩容、增加不同RAT系统分流等,并不需要同时进行控制面增强。簇化集中控制则通过小区簇化集中控制方式,解决小区间干扰协调,相同RAT下不同小区间的资源联合优化配置、负载均衡等以及不同RAT系统间的数据分流、负载均衡等,从而提升系统整体容量和资源整体利用率。虽然前期工作给出了5G蜂窝网络“三朵云”的网络架构,然而并未针对超密集组网的具体部署场景,给出5G超密集组网的网络架构以及控制与承载分离和簇化集中控制的具体实施方案。因此,针对超密集组网部署场景,如何实现控制承载分离以及簇化集中控制的部署成为本文主要的研究内容。

综上所述,本文针对超密集组网,提出了以控制承载分离以及簇化集中控制为主要技术特征的5G超密集组网

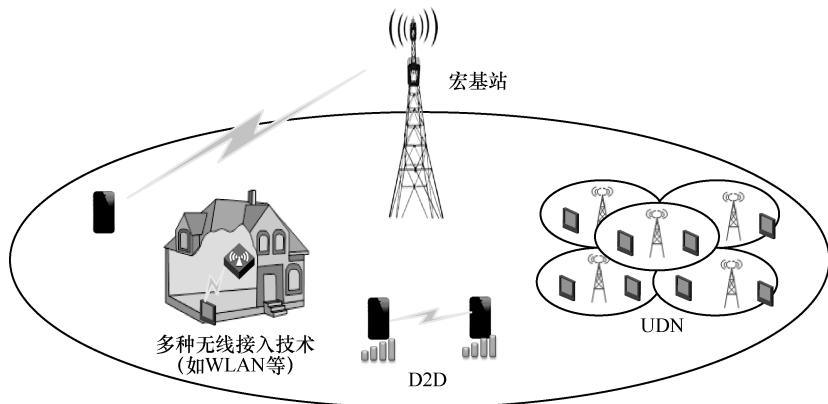


图1 超密集异构组网示意



网络架构。除此之外,本文针对宏—微和微—微的超密集组网部署场景,给出了具体实现方案。更进一步地针对 5G 超密集组网网络架构中可能存在的问题与挑战进行了讨论,为后续研究发展提供了参考。

## 2 5G 超密集组网网络架构

基于前期“三朵云”的 5G 蜂窝网络架构<sup>[12]</sup>,本文针对超密集组网主要应用的热点高容量场景提出了 5G 超密集组网网络架构,如图 2 所示。

可以看出,为了解决特定区域内持续发生高流量业务的热点高容量场景(办公室、大型场馆和家庭等)带来的挑战,即如何在网络资源有限的情况下提高网络吞吐量和传输效率,保证良好的用户体验速率,5G 超密集组网需要如下方面的进一步增强。

首先,接入网采用微基站进行热点容量补充,同时结合大规模天线、高频通信等无线技术,提高无线侧的吞吐量。其中,在宏—微覆盖场景下,通过覆盖与容量的分离(微基站负责容量,宏基站负责覆盖及微基站间资源协同管理),实现接入网根据业务发展需求以及分布特性灵活部署微基站。同时,由宏基站充当的微基站间的接入集中控制模块,负责无线资源协调、小范围移动性管理等功能;

除此之外,对于微—微超密集覆盖的场景,微基站间的干扰协调、资源协同、缓存等需要进行分簇化集中控制。此时,接入集中控制模块可以由所分簇中某一个微基站负责或者单独部署在数据中心,负责提供无线资源协调、小范围移动性管理等功能。

其次,为了尽快对大流量的数据进行处理和响应,需要将用户面网关、业务使能模块、内容缓存/边缘计算等转发相关功能尽量下沉到靠近用户的网络边缘。例如在接入网基站旁设置本地用户面网关,实现本地分流。同时,通过在基站上设置内容缓存/边缘计算能力,利用智能的算法将用户所需内容快速分发给用户,同时减少基站向后的流量和传输压力。更进一步地将诸如视频编解码、头压缩等业务使能模块下沉部署到接入网侧,以便尽早对流量进行处理,减少传输压力。

综上所述,5G 超密集组网网络架构一方面通过控制承载分离,即覆盖与容量的分离,实现未来网络对于覆盖和容量的单独优化设计,实现根据业务需求灵活扩展控制面和数据面资源;另一方面通过将基站部分无线控制功能进行抽离进行分簇化集中式控制,实现簇内小区间干扰协调、无线资源协同、移动性管理等,提升了网络容量,为用户提供极致的业务体验。除此之外,网关功能

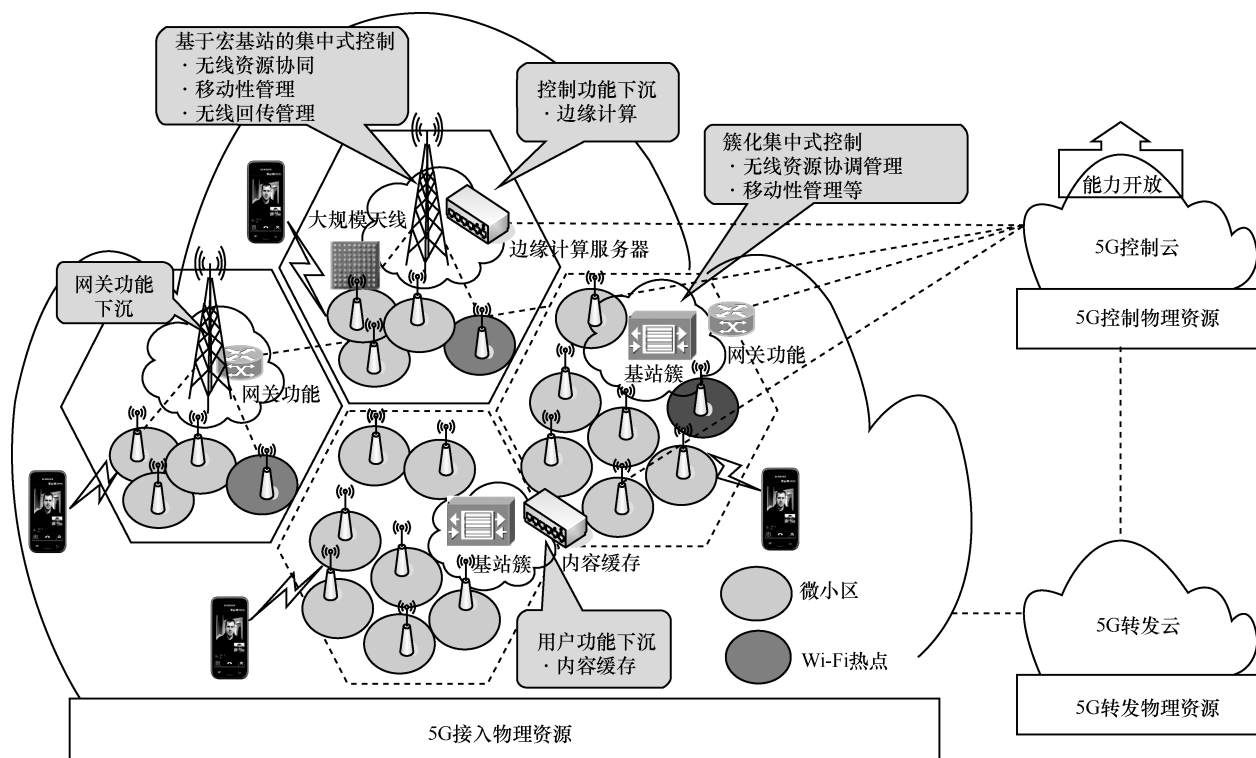


图 2 5G 超密集组网网络架构





中控制面协议架构所示。终端用户面承载与控制面分离,其中,对中断时间敏感、带宽需求较小的业务承载(诸如语音业务等)由宏基站进行承载,而对中断时延不敏感、带宽需求大的业务承载(诸如视频传输等)则由微基站负责。除此之外,从图4中用户面协议架构中可以看出,对于微基站负责传输的数据会由SGW(serving gateway,服务网关)直接分流到微基站,而维持在宏基站的数据承载,其数据将保持由SGW到宏基站的路径。

方案二:与方案一类似,终端的控制面承载(RRC连接)始终由宏基站负责维护,如图5中控制面协议架构所示。终端的用户面承载与控制面分离,对于低速率、移动性要求较高(诸如语音业务等)的业务承载和高带宽需求(诸如视频传输等)的业务承载分别由宏基站和微基站负责传输,其中微基站主要负责系统容量的提升。然而对于用户面协议架构,与方案一不同的是对于微基站负责的数据承载仅将无线链路控制(radio link control, RLC)层、媒体接入控制(media access control, MAC)层以及物理层切换到微基站,而分组汇聚协议(packet data convergence protocol, PDCP)层则依然维持在宏基站。换句话说,也就是分流到微基站的数据承载首先由SGW到宏基站,然后再由宏基站经过PDCP层后分流到微基站。

可以看出,对于用户面协议架构,方案一采用的宏基站和微基站都和核心网直接连接,这样做虽然可以使数据不用经过Xn接口进行传输,降低了用户面的时延,但是宏基站和微基站同时与核心网直接连接将带来核心网信令负荷的增加。方案二则只有宏基站与核心网进行连接,宏基站和微基站通过Xn接口传输终端的数据,这种方案通过在接入网宏基站处进行了数据分流和聚合,微基站对于核心网是不可见的,从而可以减少核心网的信令负担。但是,由于所有微基站的数据都需要通过宏基站传输到核心网,此时对宏基站回程链路容量带来很高的要求,尤其是微基站的超密集部署的场景。因此,基于双连接的5G超密集组网宏—微覆盖场景控制与承载分离方案可以基于不同的用户与场景灵活选择。例如,对于理想回程链路的场景,可以采用宏基站分流的方案二,此时微基站不需要完整的协议栈,减少了功能,降低了成本,为这种仅具备部分功能的轻量化基站的应用带来可能,使得网络部署更加灵活,具备按需部署的能力。然而对于回程链路较差的场景,可以采用宏基站和微基站同时与核心网连接的方案一,此时可以降低用户面时延,增大用户吞吐量。

综上所述,通过基于双连接的技术方案一和方案二,5G超密集组网可以实现控制与承载分离。其中,终端的控制面承载(RRC)由宏基站负责传输,微基站会将一些配置信息打包通过Xn接口传送给宏基站,由宏基站生成最终的RRC信令发送给终端。因此,终端只会看到来自宏基站的RRC实体,并对此RRC实体进行反馈回复。同时,终端的用户面承载除了个别低速率、移动性要求较高的业务(语音等)由宏基站负责传输外,其余高带宽需求的业务承载主要由微基站负责传输,从而实现了5G超密集组网宏—微场景下控制与承载的分离。通过控制与承载的分离,使得对于未来5G超密集组网可以实现覆盖和容量的单独优化设计,灵活地根据数据流量的需求在热点区域实现按需的资源部署扩容数据面传输资源(小区加密、频带扩容、增加不同RAT系统分流等),并不需要同时进行控制面增强。

更进一步,5G超密集组网宏—微场景下的控制承载分离还具备如下优势。

#### (1) 移动性能提升

由于微基站始终处于宏基站的覆盖范围内,可以始终保持与宏基站的RRC连接,此时微基站仅提供用户面连接,此时终端在微基站的切换就简化为微基站的添加、修改、释放等,避免了频繁切换带来的核心网信令增加。同时宏基站RRC连接的持续保持以及部分低速率业务的传输能力,也可以提升终端在频繁切换过程中的用户体验。

#### (2) 资源利用率提升

宏基站可以在终端的微基站选择、微基站间干扰的协调管理、微基站间的负载均衡、微基站的动态打开/关闭等方面通过接入集中控制模块的资源优化算法进行优化控制,从而提升网络整体容量和资源利用率,降低能效。

需要注意的是,上述基于双连接的5G超密集组网控制和承载分离方案要求终端具备双连接甚至多连接的能力,这对该技术方案的直接应用带来了一定制约。除此之外,在缺少宏基站覆盖的5G超密集网络,上述两个方案则无法发挥作用。

## 4 微—微部署场景

如上文所述,在宏—微场景下,基于双连接的控制和承载分离方案可以有效实现5G超密集组网覆盖和容量的分离,实现覆盖和容量的单独优化设计,灵活地根据数据流量的需求在热点区域实现按需部署。然而上述方案除了

要求终端具备双连接甚至多连接的能力外,也无法解决 5G 超密集组网微—微覆盖场景,即无宏基站覆盖的场景。因此,本节针对 5G 超密集组网微—微覆盖场景,基于宏—微场景下“宏覆盖”思想,提出了虚拟宏小区以及微小区动态分簇的两种方案。

#### 4.1 虚拟宏小区方案

为了能够在 5G 超密集组网微—微覆盖场景下实现类似于宏—微场景下宏基站的作用,即宏基站负责控制面承载(RRC)的传输,此时需要利用微基站组成的密集网络构建一个虚拟宏小区。此时,由虚拟宏小区承载控制面信令(RRC)的传输,负责移动性管理以及部分资源协调管理,而微基站则主要负责用户面数据的传输,从而达到与宏—微覆盖场景下控制面与数据面分离相同的效果,如图 6 所示。

不难想象,虚拟宏小区的构建,需要簇内多个微基站共享部分资源(包括信号、信道、载波等),此时同一簇内的微基站通过在此相同的资源上进行控制面承载的传输,以达到虚拟宏小区的目的。同时,各个微基站在其剩余资源上单独进行用户面数据的传输。可以看出,通过上述方式可以实现 5G 超密集组网场景下控制面与数据面的分离。

简单起见,以微基站配置两载波为例,在载波 1 上,簇内不同的微基站采用相同的虚拟宏小区 ID,组成虚拟宏小区,而在载波 2 上,簇内各个微基站则配置为不同的小区 ID。此时,对于空闲态终端只需要驻留在载波 1 上,接收来自载波 1 上的控制面信令。对于连接态终端,此时根据数据业务需求,通过载波聚合技术,即载波 1 为主载波,载波 2 为辅载波。

除此之外,对于仅配置单载波的微基站配置场景,可以通过为每个微基站簇配置不同的虚拟宏小区 ID,此时簇内不同微基站使用同一虚拟宏小区 ID 为其发送的广播信息、寻呼信息,随机接入响应,公共控制信令进行加扰。终端通过虚拟宏小区 ID 解扰接收来自虚拟宏小区的控制承载,而通过微基站小区 ID 的识别与解扰进行用户面数据的传输,从而实现了控制与承载的分离,即覆盖和容量的分离。

#### 4.2 微小区动态分簇方案

上述虚拟宏小区方案通过构建虚拟宏小区的方法可以有效实现 5G 超密集组网微—微覆盖场景下的控制与承载分离,即通过微基站资源的划分,在公共资源上构建了虚拟的宏小区。换句话说,对于终端来说,相当于同时看到了两个网络(虚拟宏小区和微小区),实现了覆盖和容量的分离。除此之外,考虑到网络热点区域会随着时间的空间的变化而变化,例如,举办赛事的运动场以容量需求为主,而未举办赛事时则容量需求降低,转化为以覆盖要求为主。正是基于上述考虑,本文借鉴动态 DAS(distributed antenna system, 分布式天线系统)的思想,针对 5G 超密集组网的微—微覆盖场景提出了覆盖和容量动态转化的方案,即微小区动态分簇的方案,如图 7 所示。

可以看出,该上述方案的主要思想是,当网络负载较轻时,将微基站进行分簇化管理,其中同一簇内的微基站发送相同的数据,从而组成虚拟宏基站,如图 7(a)所示。此时,终端用户在同一簇内微基站间移动时不需要切换,降低高速移动终端在微基站间的切换次数,提升用户体

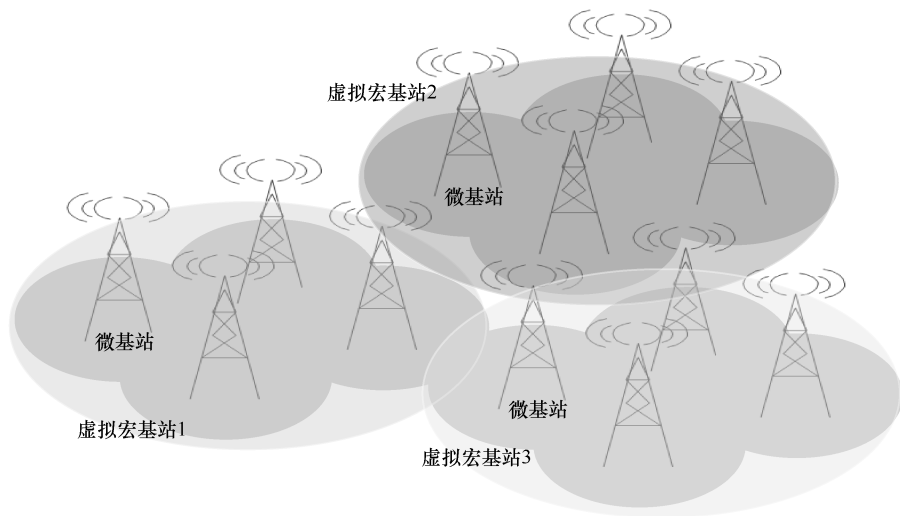


图 6 微—微覆盖场景虚拟宏小区方案

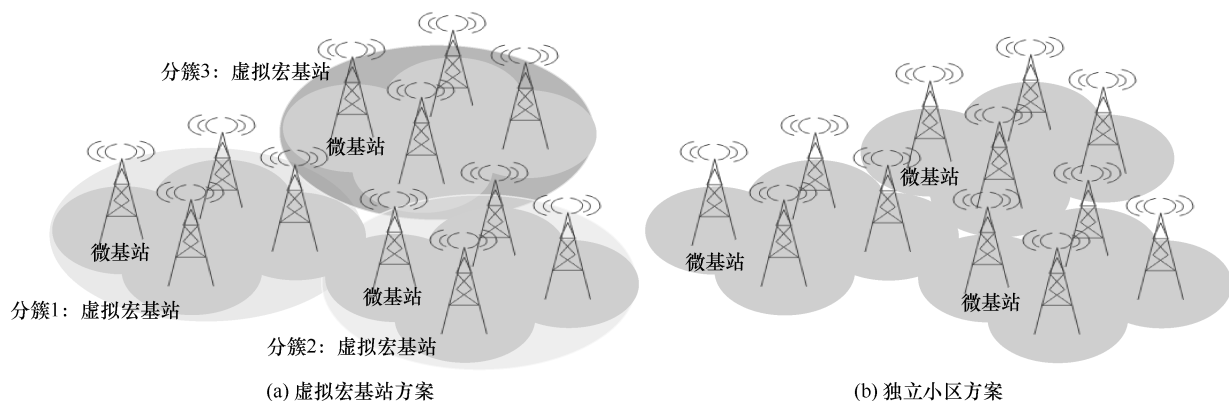


图7 微—微覆盖场景动态分簇方案

验。除此之外,由于同一簇内多个微基站发送相同的数据信息,终端用户可获得接收分集增益,提升了接收信号质量。当网络负载较重时,则每个微基站分别为独立的小区,发送各自的数据信息,实现了小区分裂,从而提升了网络容量,如图7(b)所示。

综上所述,微小区动态分簇的方案通过簇化集中控制模块,根据网络负荷统计信息以及网络即时负荷信息等,对微基站进行动态分簇,实现微—微覆盖场景下覆盖和容量的动态转换与折中。

需要注意的是,与部署在宏基站上的接入集中控制模块类似,除了可以提升终端移动性能外,通过在簇头或者数据中心部署的接入集中控制模块同样可以通过资源的优化配置算法在终端的微基站选择、微基站间干扰的协调管理、微基站间的负载均衡、微基站的动态打开/关闭等方面进行优化,从而提升网络整体性能。

## 5 面临的挑战

综上所述,以控制承载分离(覆盖与容量的分离)以及簇化集中控制为主要特征的5G超密集组网网络架构可以实现接入网根据业务需求灵活扩展控制面和数据面资源,实现簇内小区间干扰协调、无线资源协同、移动性管理等优化控制的功能,从而提升网络容量,为用户提供极致的业务体验。除此之外,利用基于双连接的控制与承载分离方案、虚拟宏小区以及微小区动态分簇的方案,可以分别针对5G超密集组网的宏—微以及微—微覆盖场景实现控制与承载的分离,实现了控制面的宏覆盖以及用户面的灵活按需部署,提升了网络的移动性能和灵活性,适应了未来网络发展的需求。然而,上述方案真正应用到5G超密集组网还存在一些问题与挑战,主要包括以下几个方面。

### (1) 无线接入集中控制模块的优化算法

如上文所述,通过部署在宏基站或者微基站簇头的接入网集中控制模块在终端的微基站选择、微基站间干扰的协调管理、微基站间的负载均衡、微基站的动态打开/关闭等方面能够起到集中优化控制的作用。然而,如何设计合理有效的资源优化算法,成为能够提升网络性能和用户体验、降低网络能耗的关键点,需要下一步重点进行研究,评估其算法性能。

### (2) 微—微场景微基站分簇的准则

对于宏—微覆盖场景,微基站以在同一个宏基站的覆盖下为基准进行分簇化集中控制。然而对于微—微覆盖场景,前述方案暂时以微基站连续覆盖为一般宏基站覆盖面积为基准进行分簇化管理的,是否存在更有效的分簇准则还需要进一步研究。

### (3) 宏—微场景同频覆盖的问题

前述基于双连接的控制承载分离方案仅考虑了宏基站和微基站异频组网的问题,此时宏基站和微基站之间不存在干扰,此时的干扰主要是微基站间干扰,宏基站可为终端提供可靠稳定的RRC连接。然而当宏基站与微基站采用同频部署时,此时宏基站与微基站间存在较大的干扰。宏基站与微基站间的跨层干扰将使得宏基站很难保证为终端提供稳定可靠的RRC连接,可能导致终端在宏基站与其覆盖下的微基站间进行切换,降低了移动性能和用户体验。因此,针对宏—微同频部署场景,如何解决上述问题成为该方案能否成功应用的关键。

## 6 结束语

本文为了解决超密集组网中小小区密集部署带来的干扰问题以及小基站较小的覆盖范围导致的高速移动用户

频繁切换问题,提出了以控制承载分离以及簇化集中控制为主要技术特征的5G超密集组网网络架构。并针对宏—微和微—微的超密集组网部署场景,给出了具体实现方案。更进一步地针对5G超密集组网网络架构中可能存在的问题与挑战进行了讨论,为后续研究发展提供了参考。

## 参考文献:

- [1] 5GNow. 5th generation: non-orthogonal waveform of asynchronous signaling[R/OL]. [2015-09-18]. <http://www.5gnow.eu>.
- [2] METIS. Mobile and wireless communications enablers for the twenty-twenty information society. EU7th framework program project[R/OL]. [2015-09-18]. <http://www.metis2020.com>.
- [3] IMT-2020 (5G) 推进组. 5G 愿景与需求白皮书[R/OL]. (2014-05-29) [2015-09-18]. <http://www.imt-2020.cn/zh/documents/listByQuery?currentPage=1&content>.  
IMT-2020 (5G) PG.White paper on 5G vision and requirements [R/OL]. (2014-05-29) [2015-09-18].<http://www.imt-2020.cn/zh/documents/listByQuery?currentPage=1&content>.
- [4] ITU-R M. IMT vision-framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond [R]. [S.1.]:ITU Working Document 5D/TEMP/224-E, 2013.
- [5] ICT-317669 METIS Project. Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system[R]. [S.1. : s.n.], 2013.
- [6] Nokia Siemens Networks. 2020: Beyond 4G radio evolution for the gigabit experience[R]. [S.1.]:White Paper, 2011.
- [7] Ericsson. More than 50 Billion Connected Devices [R]. [S.1.]: White Paper, 2011.
- [8] FETTWEIS G, ALAMOUTI S.5G: personal mobile internet beyond what cellular did to telephony [J]. IEEE Communalization Magazine, 2014, 52(2): 140-145.
- [9] OSSEIRAN A, BOCCARDI F, BRAUN V, et al. Scenario for 5G mobile and wireless communication: the vision of the METIS project[J]. IEEE CommunalizationMagazine, 2014, 52(5): 26-35.
- [10] 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[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(5): 551-563.  
YOU X H, PAN Z W, GAO X Q, et al. The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques[J]. Science China Press, 2014, 44(5): 551-563.
- [11] AAYAPONG P, IWAMURA M, STAEHLE D, et al. Design considerations for a 5G network architecture[J]. IEEE Communalization Magazine, 2014, 52(11): 65-75.
- [12] 杨峰义, 张建敏, 谢伟良, 等. 5G 蜂窝网络架构分析[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 46-56.
- [13] YANG F Y, ZHANG J M, XIE W N, et al. Analysis of 5G cellular network architecture [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 46-56.
- [14] ISHII H, KISHIYAMA Y, TAKAHASHI H. A novel architecture for LTE-B: C-plane/U-plane split and phantom cell concept[C]// 2012 IEEE Globecom Workshop, December 3-7, 2012, Anaheim, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2012: 624-630.
- [15] LI Q C, NIU H N, PAPATHANASSIOU A T, et al. 5G network capacity: key elements and technologies [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2014, 9(1): 71-78.
- [16] 3GPP. Study on small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN: high layer aspects: TS36.842[S]. [S.1. : s.n.], 2013.

## [作者简介]



张建敏(1983-),男,博士,中国电信股份有限公司技术创新中心高级工程师,主要研究方向为移动通信技术。



谢伟良(1976-),男,博士,中国电信股份有限公司技术创新中心教授级高级工程师,主要研究方向为移动通信标准及测试。



杨峰义(1965-),男,中国电信股份有限公司技术创新中心副主任、教授级高级工程师,“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项总体专家组专家,国家高技术研究发展计划(“863”计划)5G 专家组专家,中国通信标准化协会无线技术委员会副主席,中国通信学会无线及移动通信委员会委员,长期工作在移动通信领域,数次获得国家级和省部级科技进步奖,发表学术论文数十篇,学术专著 6 部,译著 1 部。