

评述

5G 移动通信发展趋势与若干关键技术

尤肖虎^{①*}, 潘志文^①, 高西奇^①, 曹淑敏^②, 邬贺铨^③

① 东南大学移动通信国家重点实验室, 南京 210096

② 工业和信息化部电信研究院, 北京 100191

③ 中国工程院, 北京 100088

* 通信作者. E-mail: xhyu@seu.edu.cn

收稿日期: 2014-02-19; 接受日期: 2014-03-21

国家高技术研究发展计划 (批准号: 2014AA01A704)、国家自然科学基金委员会创新群体 (批准号: 61221002) 和 Intel 公司资助项目

摘要 第5代移动通信系统(5G)是面向2020年之后的新一代移动通信系统,其技术发展尚处于探索阶段.结合国内外移动通信发展的最新趋势,本文对5G移动通信发展的基本需求、技术特点与可能发展途径进行了展望,并分无线传输和无线网络两个部分,重点论述了富有发展前景的7项5G移动通信关键技术,包括大规模天线阵列、基于滤波器组的多载波技术、全双工复用、超密集网络、自组织网络、软件定义网络及内容分发网络.本文还概括性地介绍了国内5G移动通信的相关研发活动及其近期发展目标.

关键词 5G 关键技术 发展趋势 无线传输技术 无线网络技术

1 概述与总体趋势

5G是面向2020年以后移动通信需求而发展的新一代移动通信系统.根据移动通信的发展规律,5G将具有超高的频谱利用率和能效,在传输速率和资源利用率等方面较4G移动通信提高一个量级或更高,其无线覆盖性能、传输时延、系统安全和用户体验也将得到显著的提高.5G移动通信将与其他无线移动通信技术密切结合,构成新一代无所不在的移动信息网络,满足未来10年移动互联网流量增加1000倍的发展需求.5G移动通信系统的应用领域也将进一步扩展,对海量传感设备及机器与机器(M2M)通信的支撑能力将成为系统设计的重要指标之一.未来5G系统还须具备充分的灵活性,具有网络自感知、自调整等智能化能力,以应对未来移动信息社会难以预计的快速变化.

5G已经成为国内外移动通信领域的研究热点.2013年初欧盟在第7框架计划启动了面向5G研发的METIS(mobile and wireless communications enablers for the 2020 information society)项目^[1],由包括我国华为公司等29个参加方共同承担;韩国和中国分别成立了5G技术论坛和IMT-2020(5G)推进组,我国863计划也分别于2013年6月和2014年3月启动了5G重大项目一期和二期研发课题.目前,世界各国正就5G的发展愿景、应用需求、候选频段、关键技术指标及使能技术进行广泛的研讨,力求在2015年世界无线电大会前后达成共识,并于2016年后启动有关标准化进程^[2].

引用格式: 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: 551-563, doi: 10.1360/N112014-00032

移动互联网的蓬勃发展是 5G 移动通信的主要驱动力。移动互联网将是未来各种新兴业务的基础性业务平台, 现有固定互联网的各种业务将越来越多地通过无线方式提供给用户, 云计算及后台服务的广泛应用将对 5G 移动通信系统提出更高的传输质量与系统容量要求。5G 移动通信系统的主要发展目标将是与其他无线移动通信技术密切衔接, 为移动互联网的快速发展提供无所不在的基础性业务能力。按照目前业界的初步估计, 包括 5G 在内的未来无线移动网络业务能力的提升将在 3 个维度上同时进行: 1) 通过引入新的无线传输技术将资源利用率在 4G 的基础上提高 10 倍以上; 2) 通过引入新的体系结构 (如超密集小区结构等) 和更加深度的智能化能力将整个系统的吞吐率提高 25 倍左右; 3) 进一步挖掘新的频率资源 (如高频段、毫米波与可见光等), 使未来无线移动通信的频率资源扩展 4 倍左右。

当前信息技术发展正处于新的变革时期, 5G 技术发展呈现出新的如下特点。

1) 5G 研究在推进技术变革的同时将更加注重用户体验, 网络平均吞吐速率、传输时延以及对虚拟现实、3D、交互式游戏等新兴移动业务的支撑能力等将成为衡量 5G 系统性能的关键指标。

2) 与传统的移动通信系统理念不同, 5G 系统研究将不仅仅把点到点的物理层传输与信道编译码等经典技术作为核心目标, 而是从更为广泛的多点、多用户、多天线、多小区协作组网作为突破的重点, 力求在体系构架上寻求系统性能的大幅度提高。

3) 室内移动通信业务已占据应用的主导地位, 5G 室内无线覆盖性能及业务支撑能力将作为系统优先设计目标, 从而改变传统移动通信系统“以大范围覆盖为主、兼顾室内”的设计理念。

4) 高频段频谱资源将更多地应用于 5G 移动通信系统, 但由于受到高频段无线电波穿透能力的限制, 无线与有线的融合、光载无线组网等技术将被更为普遍地应用。

5) 可“软”配置的 5G 无线网络将成为未来的重要研究方向, 运营商可根据业务流量的动态变化实时调整网络资源, 有效地降低网络运营的成本和能源的消耗。

本文第 2 节分为 5G 无线传输和无线网络两个部分, 对 5G 移动通信若干关键技术的现状与未来发展进行了评述, 内容涉及大规模多输入多输出 (Massive MIMO)、基于滤波器组的多载波技术、全双工等无线传输与多址技术, 以及超密集异构网络、自组织网络、软件定义网络及内容分发网络等无线网络及组网关键技术; 第 3 节简述了我国 5G 移动通信近期的推进计划、研发活动及发展目标; 最后给出了全文的总结。

2 5G 移动通信若干关键技术

为提升其业务支撑能力, 5G 在无线传输技术和网络技术方面将有新的突破^[3]。在无线传输技术方面, 将引入能进一步挖掘频谱效率提升潜力的技术, 如先进的多址接入技术、多天线技术、编码调制技术、新的波形设计技术等; 在无线网络方面, 将采用更灵活、更智能的网络架构和组网技术, 如采用控制与转发分离的软件定义无线网络的架构、统一的自组织网络 (SON)、异构超密集部署等。

5G 移动通信标志性的关键技术主要体现在超高效能的无线传输技术和高密度无线网络 (high density wireless network) 技术。其中基于大规模 MIMO 的无线传输技术将有可能使频谱效率和功率效率在 4G 的基础上再提升一个量级, 该项技术走向实用化的主要瓶颈问题是高维度信道建模与估计以及复杂度控制。全双工 (full duplex) 技术将可能开辟新一代移动通信频谱利用的新格局。超密集网络 (ultra dense network, UDN) 已引起业界的广泛关注, 网络协同与干扰管理将是提升高密度无线网络容量的核心关键问题。

体系结构变革将是新一代无线移动通信系统发展的主要方向. 现有的扁平化 SAE/LTE (system architecture evolution/long term evolution) 体系结构促进了移动通信系统与互联网的高度融合, 高密度、智能化、可编程则代表了未来移动通信演进的进一步发展趋势, 而内容分发网络 (CDN) 向核心网络的边缘部署, 可有效减少网络访问路由的负荷, 并显著改善移动互联网用户的业务体验.

1) 超密集组网: 未来网络将进一步使现有的小区结构微型化、分布化, 并通过小区间的相互协作, 化干扰信号为有用信号, 从而解决小区微型化和分布化所带来的干扰问题, 并最大程度地提高整个网络的系统容量.

2) 智能化: 未来网络将在已有 SON 技术的基础上, 具备更为广泛的感知能力和更为强大的自优化能力, 通过感知网络环境及用户业务需求, 在异构环境下为用户提供最佳的服务体验.

3) 可编程: 未来网络将具备软件可定义 (SDN) 能力, 数据平面与控制平面将进一步分离, 集中控制、分布控制或两者的相互结合, 将是网络演进发展中需要解决的技术路线问题; 基站与路由交换等基础设施具备可编程与灵活扩展能力, 以统一融合的平台适应各种复杂的及不同规模的应用场景.

4) 内容分发边缘化部署: 移动终端访问的内容虽然呈海量化趋势, 但大部分集中在一些热点内容和大型门户网站, 在未来的 5G 网络中采用 CDN 技术将是提高网络资源利用率的重要潜在手段.

2.1 无线传输技术

2.1.1 大规模 MIMO 技术

多天线技术作为提高系统频谱效率和传输可靠性的有效手段, 已经应用于多种无线通信系统, 如 3G 系统、LTE、LTE-A、WLAN 等. 根据信息论, 天线数量越多, 频谱效率和可靠性提升越明显. 尤其是, 当发射天线和接收天线数量很大时, MIMO 信道容量将随收发天线数中的最小值近似线性增长. 因此, 采用大数量的天线, 为大幅度提高系统的容量提供了一个有效的途径. 由于多天线所占空间、实现复杂度等技术条件的限制, 目前的无线通信系统中, 收发端配置的天线数量都不多, 比如在 LTE 系统中最多采用了 4 根天线, LTE-A 系统中最多采用了 8 根天线^[4]. 但由于其巨大的容量和可靠性增益, 针对大天线数的 MIMO 系统相关技术的研究吸引了研究人员的关注, 如单个小区情况下, 基站配有大大超过移动台天线数量的天线的多用户 MIMO 系统的研究等^[5]. 进而, 2010 年, 贝尔实验室的 Marzetta 研究了多小区、TDD (time division duplexing) 情况下, 各基站配置无限数量天线的极端情况的多用户 MIMO 技术, 提出了大规模 MIMO (large scale MIMO, 或者称 Massive MIMO) 的概念^[6], 发现了一些与单小区、有限数量天线时的不同特征. 之后, 众多的研究人员在此基础上研究了基站配置有限天线数量的情况^[7]. 在大规模 MIMO 中, 基站配置数量非常大 (通常几十到几百根, 是现有系统天线数量的 1~2 个数量级以上) 的天线, 在同一个时频资源上同时服务若干个用户. 在天线的配置方式上, 这些天线可以是集中地配置在一个基站上, 形成集中式的大规模 MIMO, 也可以是分布式地配置在多个节点上, 形成分布式的大规模 MIMO. 值得一提的是, 我国学者在分布式 MIMO 的研究一直走在国际的前列^[8~10].

大规模 MIMO 带来的好处主要体现在以下几个方面: 第一, 大规模 MIMO 的空间分辨率与现有 MIMO 相比显著增强, 能深度挖掘空间维度资源, 使得网络中的多个用户可以在同一时频资源上利用大规模 MIMO 提供的空间自由度与基站同时进行通信, 从而在不增加基站密度和带宽的条件下大幅度提高频谱效率. 第二, 大规模 MIMO 可将波束集中在很窄的范围内, 从而大幅度降低干扰. 第三, 可大幅降低发射功率^[7], 从而提高功率效率. 第四, 当天线数量足够大时, 最简单的线性预编码和线性检测器趋于最优, 并且噪声和不相关干扰都可忽略不计.

近两年针对大规模 MIMO 技术的研究工作主要集中在信道模型、容量和传输技术性能分析、预编码技术、信道估计与信号检测技术等方面^[11~14], 但还存在一些问题: 由于理论建模和实测模型工作较少, 还没有被广泛认可的信道模型; 由于需要利用信道互易性减少信道状态信息获取的开销, 目前的传输方案大都假设采用 TDD 系统, 用户都是单天线的, 并且其数量远小于基站天线数量. 导频数量随用户数量线性增加, 开销较大, 信号检测和预编码都需要高维矩阵运算, 复杂度高, 并且由于需要利用上下行信道的互易性, 难以适应高速移动场景和 FDD (frequency division duplexing) 系统; 在分析信道容量及传输方案的性能时, 大都假设独立同分布信道, 从而认为导频污染是大规模 MIMO 的瓶颈问题, 使得分析结果存在明显的局限性, 等等. 因此, 为了充分挖掘大规模 MIMO 的潜在技术优势, 需要深入研究符合实际应用场景的信道模型, 分析其对信道容量的影响, 并在实际信道模型、适度的导频开销、可接受的实现复杂度下, 分析其可达的频谱效率、功率效率, 并研究最优的无线传输方法、信道信息获取方法、多用户共享空间无线资源的联合资源调配方法.

针对以上问题的研究, 存在诸多的挑战, 但随着研究的深入, 大规模 MIMO 在 5G 中的应用被寄予了厚望^[15], 可以预计, 大规模 MIMO 技术将成为 5G 区别于现有系统的核心技术之一.

2.1.2 基于滤波器组的多载波技术

由于在频谱效率、对抗多径衰落、低实现复杂度等方面的优势, OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 技术被广泛应用于各类无线通信系统, 如 WiMaX、LTE 和 LTE-A 系统的下行链路, 但 OFDM 技术也存在很多不足之处. 比如, 需要插入循环前缀以对抗多径衰落, 从而导致无线资源的浪费; 对载波频偏的敏感性高, 具有较高的峰均比; 另外, 各子载波必须具有相同的带宽, 各子载波之间必须保持同步, 各子载波之间必须保持正交等, 限制了频谱使用的灵活性. 此外, 由于 OFDM 技术采用了方波作为基带波形, 载波旁瓣较大, 从而在各载波同步不能严格保证的情况下使得相邻载波之间的干扰比较严重. 在 5G 系统中, 由于支撑高数据速率的需要, 将可能需要高达 1 GHz 的带宽. 但在某些较低的频段, 难以获得连续的宽带频谱资源, 而在这些频段, 某些无线传输系统, 如电视系统中, 存在一些未被使用的频谱资源 (空白频谱). 但是, 这些空白频谱的位置可能是不连续的, 并且可用的带宽也不一定相同, 采用 OFDM 技术难以实现对这些可用频谱的使用. 灵活有效地利用这些空白的频谱, 是 5G 系统设计的一个重要问题.

为了解决这些问题, 寻求其他多载波实现方案引起了研究人员的关注^[16~25]. 其中, 基于滤波器组的多载波 (FBMC, filter-bank based multicarrier) 实现方案是被认为是解决以上问题的有效手段, 被我国学者最早应用于国家 863 计划后 3G 试验系统中^[16]. 滤波器组技术起源于 20 世纪 70 年代, 并在 20 世纪 80 年代开始受到关注, 现已广泛应用于图像处理、雷达信号处理、通信信号处理等诸多领域. 在基于滤波器组的多载波技术中, 发送端通过合成滤波器组来实现多载波调制, 接收端通过分析滤波器组来实现多载波解调. 合成滤波器组和分析滤波器组由一组并行的成员滤波器构成, 其中各个成员滤波器都是由原型滤波器经载波调制而得到的调制滤波器^[16]. 与 OFDM 技术不同, FBMC 中, 由于原型滤波器的冲击响应和频率响应可以根据需要进行设计, 各载波之间不再必须是正交的, 不需要插入循环前缀; 能实现各子载波带宽设置、各子载波之间的交叠程度的灵活控制, 从而可灵活控制相邻子载波之间的干扰, 并且便于使用一些零散的频谱资源; 各子载波之间不需要同步, 同步、信道估计、检测等可在各载波上单独进行处理, 因此尤其适合于难以实现各用户之间严格同步的上行链路. 但另一方面, 由于各载波之间相互不正交, 子载波之间存在干扰; 采用非矩形波形, 导致符号之间存在时域干扰, 需要通过采用一些技术来进行干扰的消除.

FBMC 技术作为 5G 系统多载波方案的重要选择, 吸引了越来越多人的研究兴趣^[26~30]. 由于在

FBMC 技术中, 多载波性能取决于原型滤波器的设计和调制滤波器的设计, 而为了满足特定的频率响应特性的要求, 要求原型滤波器的长度远远大于子信道的数量, 实现复杂度高, 不利于硬件实现. 因此, 发展符合 5G 要求的滤波器组的快速实现算法是 FBMC 技术重要的研究内容^[30].

2.1.3 全双工技术

全双工通信技术指同时、同频进行双向通信的技术. 由于在无线通信系统中, 网络侧和终端侧存在固有的发射信号对接收信号的自干扰, 现有的无线通信系统中, 由于技术条件的限制, 不能实现同时同频的双向通信, 双向链路都是通过时间或频率进行区分的, 对应于 TDD 和 FDD 方式. 由于不能进行同时、同频双向通信, 理论上浪费了一半的无线资源 (频率和时间).

由于全双工技术理论上可提高频谱利用率一倍的巨大潜力, 可实现更加灵活的频谱使用, 同时由于器件技术和信号处理技术的发展, 同频同时的全双工技术逐渐成为研究热点, 是 5G 系统充分挖掘无线频谱资源的一个重要方向^[31~34]. 但全双工技术同时也面临一些具有挑战性的难题. 由于接收和发送信号之间的功率差异非常大, 导致严重的自干扰 (典型值为 70 dB), 因此实现全双工技术应用的首要问题是自干扰的抵消^[35]. 近年来, 研究人员发展了各类干扰抵消技术, 包括模拟端干扰抵消、对已知的干扰信号的数字端干扰抵消及它们的混合方式、利用附加的放置在特定位置的天线进行干扰抵消的技术等^[36,37], 以及后来的一些改进技术^[38]. 通过这些技术的联合应用, 在特定的场景下, 能消除大部分的自干扰. 研究人员也开发了实验系统, 通过实验来验证全双工技术的可行性^[37,39], 在部分条件下达到了全双工系统理论容量的 90% 左右. 虽然这些实验证明了全双工技术是可行的, 但这些实验系统都基本是单基站、小终端数量的, 没有对大量基站和大量终端的情况进行实验验证, 并且现有结果显示, 全双工技术并不能在所有条件下都获得理想的性能增益. 比如, 天线抵消技术中需要多个发射天线, 对大带宽情况下的消除效果还不理想, 并且大都只能支持单数据流工作, 不能充分发挥 MIMO 的能力, 因此, 还不能适用于 MIMO 系统; MIMO 条件下的全双工技术与半双工技术的性能分析还大多是一些简单的、面向小天线数的仿真结果的比较, 特别是对大规模 MIMO 条件下的性能差异还缺乏深入的理论分析^[40,41], 需要在建立更合理的干扰模型的基础上对之进行深入系统的分析; 目前, 对全双工系统的容量分析大多是面向单小区、用户数比较少, 并且是发射功率和传输距离比较小的情况, 缺乏对多小区、大用户数等条件下的研究结果, 因此在多小区大动态范围下的全双工技术中的干扰消除技术、资源分配技术、组网技术、容量分析、与 MIMO 技术的结合, 以及大规模组网条件下的实验验证, 是需要深入研究的重要问题.

2.2 无线网络技术

2.2.1 超密集异构网络技术

由于 5G 系统既包括新的无线传输技术, 也包括现有的各种无线接入技术的后续演进, 5G 网络必然是多种无线接入技术, 如 5G, 4G, LTE, UMTS (universal mobile telecommunications system) 和 WiFi (wireless fidelity) 等共存, 既有负责基础覆盖的宏站, 也有承担热点覆盖的低功率小站, 如 Micro, Pico, Relay 和 Femto 等多层覆盖的多无线接入技术多层覆盖异构网络^[42]. 在这些数量巨大的低功率节点中, 一些是运营商部署, 经过规划的宏节点低功率节点; 更多的可能是用户部署, 没有经过规划的低功率节点, 并且这些用户部署的低功率节点可能是 OSG (open subscriber group) 类型的, 也可能是 CSG (closed subscriber group) 类型的, 从而使得网络拓扑和特性变得极为复杂.

根据统计, 在 1950 年至 2000 年的 50 年间, 相对于语音编码技术、MAC 和调制技术的改进带来

的不到 10 倍的频谱效率的提升和采用更宽的带宽带来的传输速率的几十倍的提升, 由于小区半径的缩小从而频谱资源的空间复用带来的频谱效率提升的增益达到 2700 倍以上^[43]. 因此, 减小小区半径, 提高频谱资源的空间复用率, 以提高单位面积的传输能力, 是保证未来支持 1000 倍业务量增长的核心技术. 以往的无线通信系统中, 减小小区半径是通过小区分裂的方式完成的. 但随着小区覆盖范围的变小, 以及最优的站点位置往往不能得到, 进一步的小区分裂难以进行, 只能通过增加低功率节点数量的方式提升系统容量, 这就意味着站点部署密度的增加. 根据预测, 未来无线网络中, 在宏站的覆盖区域中, 各种无线传输技术的各类低功率节点的部署密度将达到现有站点部署密度的 10 倍以上, 站点之间的距离达到 10 米甚至更小^[44~47], 支持高达每平方公里 25000 个用户^[48], 甚至将来激活用户数和站点数的比例达到 1:1, 即每个激活的用户都将有一个服务节点^[49,50], 从而形成超密集异构网络.

在超密集异构网络中, 网络的密集化使得网络节点离终端更近, 带来了功率效率、频谱效率的提升, 大幅度提高了系统容量, 以及业务在各种接入技术和各覆盖层次间分担的灵活性. 虽然超密集异构网络展示了美好的前景, 由于节点之间距离的减少, 将导致一些与现有系统不同的问题. 在 5G 网络中, 可能存在同一种无线接入技术之间同频部署的干扰、不同无线接入技术之间由于共享频谱的干扰、不同覆盖层次之间的干扰, 如何解决这些干扰带来的性能损伤, 实现多种无线接入技术、多覆盖层次之间的共存, 是一个需要深入研究的重要问题^[51,52]; 由于近邻节点传输损耗差别不大, 可能存在多个强度接近的干扰源, 导致更严重的干扰, 使现有的面向单个干扰源的干扰协调算法不能直接适用于 5G 系统; 由于不同业务和用户的 QoS (quality of service) 要求的不同, 不同业务在网络中的分担^[53,54]、各类节点之间的协同策略、网络选择^[55]、基于用户需求的系统能效最低的小区激活、节能配置策略^[56]是保证系统性能的关键问题. 为了实现大规模的节点协作, 需要准确、有效地发现大量的相邻节点^[57]; 由于小区边界更多、更不规则, 导致更频繁、更为复杂的切换, 难以保证移动性性能, 因此, 需要针对超密集网络场景发展新的切换算法^[58]; 由于用户部署的大量节点的突然、随机的开启和关闭, 使得网络拓扑和干扰图样随机、大动态范围地动态变化, 各小站中的服务用户数量往往比较少, 使得业务的空间和时间分布出现剧烈的动态变化, 因此, 需要研究适应这些动态变化的网络动态部署技术^[59,60]; 站点的密集部署将需要庞大、复杂的回传网络, 如果采用有线回传网络, 会导致网络部署的困难和运营商成本的大幅度增加. 为了提高节点部署的灵活性, 降低部署成本, 利用和接入链路相同的频谱和技术进行无线回传传输, 是解决这个问题的重要方向. 无线回传方式中, 无线资源不仅为终端服务, 而且为节点提供中继服务, 使无线回传组网技术非常复杂, 因此, 无线回传组网关键技术, 包括组网方式、无线资源管理等是重要的研究内容^[2].

2.2.2 自组织网络技术

在传统的移动通信网络中, 网络部署、运维等基本依靠人工的方式, 需要投入大量的人力, 给运营商带来巨大的运行成本. 根据分析^[61], 各大运营商的运营成本基本上占各自收入的 70%左右. 并且, 随着移动通信网络的发展, 依靠人工的方式难以实现网络的优化. 因此, 为了解决网络部署、优化的复杂性问题, 降低运维成本相对总收入的比例, 使运营商能高效运营、维护网络, 在满足客户需求的同时, 自身也能够持续发展, 由 NGMN (next generation mobile network) 联盟中的运营商主导, 联合主要的设备制造商提出了自组织网络 (SON) 的概念^[62]. 自组织网络的思路是在网络中引入自组织能力 (网络智能化), 包括自配置、自优化、自愈合等^[63,64], 实现网络规划、部署、维护、优化和排障等各个环节的自动进行, 最大限度地减少人工干预. 目前, 自组织网络成为新铺设网络的必备特性, 逐渐进入商用, 并展现出显著的优势.

5G 系统采用了复杂的无线传输技术和无线网络架构, 使得网络管理远远比与现有网络复杂, 网络

深度智能化是保证 5G 网络性能的迫切需要. 因此, 自组织网络将成为 5G 的重要技术.

5G 将是融合、协同的多制式共存的异构网络. 从技术上看, 将存在多层、多无线接入技术的共存, 导致网络结构非常复杂, 各种无线接入技术内部和各种覆盖能力的网络节点之间的关系错综复杂, 网络的部署、运营、维护将成为一个极具挑战性的工作. 为了降低网络部署、运营维护复杂度和成本, 提高网络运维质量, 未来 5G 网络应该能支持更智能的、统一的 SON 功能, 能统一实现多种无线接入技术、覆盖层次的联合自配置、自优化、自愈合.

目前, 针对 LTE、LTE-A 以及 UMTS、WiFi 的 SON 技术发展已经比较完善, 逐渐开始在新部署的网络中应用. 但现有的 SON 技术都是面向各自网络, 从各自网络的角度出发进行独立的自部署和自配置、自优化和自愈合, 不能支持多网络之间的协同. 因此, 需要研究支持协同异构网络的 SON 技术, 如支持在异构网络中的基于无线回传的节点自配置技术, 异系统环境下的自优化技术, 如协同无线传输参数优化、协同移动性优化技术, 协同能效优化技术, 协同接纳控制优化技术等, 以及异系统下的协同网络故障检测和定位, 从而实现自愈合功能.

5G 将采用超密集的异构网络节点部署方式, 在宏站的覆盖范围内部署大量的低功率节点, 并且存在大量的未经规划的节点, 因此, 在网络拓扑、干扰场景、负载分布、部署方式、移动性方面都将表现出与现有无线网络明显不同之处, 网络节点的自动配置和维护将成为运营商面临的重要挑战. 比如, 邻区关系由于低功率节点的随机部署远比现有系统复杂, 需要发展面向随机部署、超密集网络场景的新的自动邻区关系技术, 以支持网络节点即插即用的自配置功能; 由于可能存在多个主要的干扰源, 以及由于用户移动性、低功率节点的随机开启何关闭等导致的干扰源的随机、大范围变化, 使得干扰协调技术的优化更为困难; 由于业务等随时间和空间的动态变化, 使得网络部署应该适应这些动态变化, 因此, 应该对网络动态部署技术进行优化, 如小站的动态与半静态开启和关闭的优化、无线资源调配的优化; 为了保证移动平滑性, 必须通过双连接等形式避免频繁切换和对切换目标小区进行优化选择; 由于无线回传网络结构复杂, 规模庞大, 也需要自组织网络功能以实现回传网络的智能化.

由于 5G 将采用大规模 MIMO 无线传输技术, 使得空间自由度大幅度增加, 从而带来天线选择、协作节点优化、波束选择、波束优化、多用户联合资源调配等方面的灵活性. 对这些技术的优化, 是 5G 系统 SON 技术的重要内容.

2.2.3 软件定义无线网络

软件定义网络 (soft defined networking, SDN) 技术是源于 Internet 的一种新技术. 在传统的 Internet 网络架构中, 控制和转发是集成在一起的, 网络互连节点 (如路由器、交换机) 是封闭的, 其转发控制必须在本地完成, 使得它们的控制功能非常复杂, 网络技术创新复杂度高. 为了解决这个问题, 美国斯坦福大学研究人员提出了软件定义网络的概念^[65], 其基本思路将路由器中的路由决策等控制功能从设备中分离出来, 统一由中心控制器通过软件来进行控制, 实现控制和转发的分离^[65], 从而使控制更为灵活, 设备更为简单. 在软件定义网络中, 分成应用层、控制层、基础设施层. 其中控制层通过接口与基础设施层中的网络设施进行交互, 从而实现对网络节点的控制. 因此, 在这种架构中, 路由不再是分布式实现的, 而是集中由控制器定义的. 软件定义网络自提出后引起了广泛的关注, 各研究机构进行了接口的标准化工作、关键技术的研究和实验, 部分厂商也推出了解决方案等. 但总体来说, SDN 技术还有待进一步完善^[66].

现有的无线网络架构中, 基站、服务网关、分组网关除完成数据平面的功能外, 还需要参与一些控制平面的功能, 如无线资源管理、移动性管理等在各基站的参与下完成, 形成分布式的控制功能, 网络没有中心式的控制器, 使得与无线接入相关的优化难以完成, 并且各厂商的网络设备如基站等往往

配备制造商自己定义的配置接口, 需要通过复杂的控制协议来完成其配置功能, 并且其配置参数往往非常多, 配置和优化非常复杂, 网络管理非常复杂, 使得运营商对自己部署的网络只能进行间接控制, 业务创新方面能力严重受限. 因此, 将 SDN 的概念引入无线网络, 形成软件定义无线网络, 是无线网络发展的重要方向 [67].

在软件定义无线网络中, 将控制平面从网络设备的硬件中分离出来, 形成集中控制, 网络设备只根据中心控制器的命令完成数据的转发, 使得运营商能对网络进行更好的控制, 简化网络管理, 更好地进行业务创新. 在现有的无线网络中, 不允许不同的运营商共享同一个基础设施为用户提供服务. 而在软件定义无线网络中, 通过对基站资源进行分片实现基站的虚拟化, 从而实现网络的虚拟化, 不同的运营商可以通过中心控制器实现对同一个网络设备的控制, 支持不同运营商共享同一个基础设施, 从而降低运营商的成本, 同时也可以提高网络的经济效益. 由于采用了中心控制器, 未来无线网络中的不同接入技术构成的异构网络的无线资源管理、网络协同优化等也将变得更为方便.

目前, 软件定义无线网络已经吸引了许多研究人员的兴趣, 就其网络架构 [68~71] 等方面进行了分析研究. 虽然存在诸多的好处, SDN 在无线网络中的应用将面临资源分片和信道隔离、监控与状态报告、切换等技术挑战, 这些关键技术的研究刚刚开始, 还需要深入的研究 [72].

2.2.4 内容分发网络

内容分发网络 (CDN, content distribution network) 是为了解决互联网访问质量而提出的概念. 在传统的 content 发布方式中, content 发布由内容提供商的服务器完成, 随着互联网访问量的急剧增加, 使得其服务器可能处于重负载状态, 互联网中的拥塞问题更加突出, 网站的响应速度受到严重影响, 使网站难以为用户提供高质量的服务. CDN 通过在网络中采用缓存服务器, 并将这些缓存服务器分布到用户访问相对集中的地区或网络中, 根据网络流量和各节点的连接、负载状况以及到用户的距离和响应时间等综合信息将用户的请求重新导向离用户最近的服务节点上, 使用户可就近取得所需内容, 解决 Internet 网络拥挤的状况, 提高用户访问网站的响应速度 [73].

在无线网络中, 由于智能终端等应用的日益普及, 使得移动数据业务的需求越来越大, content 越来越多. 为了加快网络访问速度, 在无线网络中采用 CDN 技术成为自然的选择, 在各类无线网络中得以应用 [74~77], 也将成为 5G 系统的一个重要的技术.

3 我国 5G 移动通信推进及研发进程¹⁾

在过去的 15 年中, 我国相继启动了 3G 和 4G 移动通信 863 重大研究计划, 并推动实施了国家中长期发展规划“新一代宽带无线移动通信网”重大专项, 极大地促进了我国移动通信技术水平的提高, 实现了我国移动通信技术研发与产业化的跨越式发展. 在分布式无线组网基础理论 [8~10,78] 等方面做出了一系列有重要国际影响的研究成果, 我国所倡导的 TD 技术入选国际标准, 华为、中兴等一批企业的全球移动通信市场份额已位居世界最前列, 移动通信产业已经成为国内具有国际竞争力的规模性高技术产业之一.

5G 移动通信发展是全球移动通信领域新一轮技术竞争的开始. 及早布局、构造开放式研发环境, 力争在未来 5G 技术与商业竞争中的获得领先优势, 已成为我国信息技术与产业未来发展最为重要的任务之一. 2013 年初, 在政府部门的大力支持下, 成立了面向 5G 移动通信研究与发展的 IMT-2020 推

1) You X H. 5G Mobile communications and its promotion. In: Proceeding of Future 5G Mobile and Communication Technology, Beijing, 2013

进组, 明确 5G 发展远景、业务、频谱与技术需求, 研究 5G 主要技术发展方向及使能技术, 形成 5G 移动通信技术框架, 协同产学研用各方力量, 积极融入国际 5G 发展进程, 为 2015 年之后全面参与 5G 移动通信技术标准制定打下坚实的技术基础. “新一代宽带无线移动通信网”重大专项在推动 LTE 产业化的同时, 开展了 LTE 的后续演进与无线新技术的研究, 力争在 5G 国际化的候选技术上产生更多的自主知识产权, 为我国布局 5G 关键技术的研究做了起步的工作. 国家 973 计划也部署了移动网络体系创新的研究课题.

2013 年 6 月, 国家 863 计划启动了 5G 移动通信系统先期研究一期重大项目, 其总体目标是: 面向 2020 年移动通信应用需求, 研究 5G 网络系统体系架构、无线组网、无线传输、新型天线与射频以及新频谱开发与利用等关键技术, 完成性能评估及原型系统设计, 开展无线传输技术试验, 支持业务总速率达 10Gbps, 空中接口频谱效率和功率效率较 4G 提升 10 倍. 主要研究任务包括: 5G 无线网络构架与关键技术研发、5G 无线传输关键技术研发、5G 移动通信系统总体技术研究及 5G 移动通信技术评估与测试验证技术研究等. 拟采取的主要技术路线包括: 重点突破高密度、高通量、超蜂窝无线网络技术, 基于大规模协作天线的超高速率、超高效能无线传输技术、新型射频技术等关键核心技术, 解决基于超微小区的网络协同与干扰消除等关键问题, 将单位面积系统容量提高 25 倍左右; 突破大规模天线高维度信道建模与估计以及复杂度控制等关键问题, 开展无线传输技术实验, 将无线传输频谱效率和功率效率提升一个量级; 开展高频段等新型频谱资源无线传输与组网关键技术研发, 将移动通信系统总的可用频谱资源扩展 4 倍左右. 项目共设立 7 个课题, 其中大规模协作和高效能无线传输技术研究开发分别由东南大学和电信科学技术研究院牵头承担; 高密度、高通量、超蜂窝无线网络技术研究开发分别由北京邮电大学、华为公司和清华大学牵头承担; 总体技术研究由电信研究院牵头承担; 技术评估与测试验证技术研究由上海无线通信研究中心牵头承担. 项目成立总体专家组, 负责 5G 移动通信 863 计划的综合推进、技术实施与协调等, 进行 5G 技术框架体系的规划以及 5G 技术研发的顶层设计; 拟设立 IMT-2020 推进对口工作组, 包括频谱研究工作组、业务需求研究工作组, 技术标准前期研究工作组, 以及知识产权工作组等; 拟构建面向 5G 发展的技术创新与产业发展联盟, 研究 5G 知识产权管理与协作机制等, 探索 5G 移动通信技术、产业与商业应用的新模式、新途径, 以及上下游衔接的高效协调机制; 拟构建面向 5G 的国际性论坛, 推动国际技术交流与合作研究, 不断扩大我国移动通信的国际影响力.

4 结束语

按照移动通信的发展规律, 5G 技术将在 2020 年之后实现商用, 其基本发展目标是满足未来移动互联网业务飞速增长的需求, 并为用户带来新的业务体验. 5G 技术的研究尚处于初期阶段, 今后几年将是确定其技术需求、关键指标和使能技术的关键时期. 5G 移动通信系统容量的提升将从频谱效率的进一步提高、网络结构的变革和新型频谱资源开发与利用技术等途径加以实现, 将派生出一系列新的无线移动通信核心支撑关键技术. 结合 5G 移动通信的最新发展趋势, 本文对富有发展前景的 5G 移动通信系统若干关键技术进行了评述, 并对国内移动通信的研发活动和推进目标进行了介绍. 随着研究的不断深入, 5G 关键支撑技术将逐步得以明确, 并在未来几年内进入实质性的标准化研究与制定阶段.

参考文献

- 1 METIS. Mobile and wireless communications enablers for the 2020 information society. In: EU 7th Framework Programme Project, <https://www.metis2020.com>
- 2 Wen T, Zhu P Y. 5G: A technology vision. Huawei, 2013. <http://www.huawei.com/en/about-huawei/publications/winwin-magazine/hw-329304.htm>
- 3 Wang C X, Haider F, Gao X Q, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. *IEEE Commun Mag*, 2014, 52: 122–130
- 4 3GPP. Physical Channels and Modulation (Release 11). 3GPP TS36.211. 2010
- 5 Marzetta T L. How Much training is required for multiuser MIMO? In: Proceedings of the 40th Asilomar Conference on Signals, Systems, & Computers, Pacific Grove, 2006. 359–363
- 6 Marzetta T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2010, 9: 3590–3600
- 7 Ngo H Q, Larsson E G, Marzetta T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems. *IEEE Trans Commun*, 2013, 61: 1436–1449
- 8 You X H, Wang D M, Sheng B, et al. Cooperative distributed antenna systems for mobile communications. *IEEE Wirel Commun*, 2010, 17: 35–43
- 9 You X H, Wang D M, Zhu P C, et al. Cell edge performance of cellular systems. *IEEE J Sel Area Commun*, 2011, 29: 1139–1150
- 10 Tao X F, Xu X D, Cui Q M. An overview of cooperative communications. *IEEE Commun Mag*, 2012, 50: 65–71
- 11 Hoydis J, ten Brink S, Debbah M. Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need? *IEEE J Sel Area Commun*, 2013, 31: 160–171
- 12 Mohammed S K, Larsson E G. Per-antenna constant envelope precoding for large multi-user MIMO systems. *IEEE Trans Commun*, 2013, 61: 1059–1071
- 13 Yin H F, Gesbert D, Filippou M, et al. A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems. *IEEE J Sel Area Commun*, 2013, 31: 264–273
- 14 Svac P, Meyer F, Riegler E, et al. Soft-heuristic detectors for large MIMO systems. *IEEE Trans Signal Process*, 2013, 61: 4573–4586
- 15 Larsson E G, Tufvesson F, Edfors O, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE Commun Mag*, 2014, 52: 186–195
- 16 Gao X Q, You X H, Jiang B, et al. MIMO-GMC wireless transmission technology for beyond 3G mobile communications. *Acta Electron Sin*, 2004, 12A: 105–108 [高西奇, 尤肖虎, 江彬, 等. 面向后三代移动通信的 MIMO-GMC 无线传输技术. *电子学报*, 2004, 12A: 105–108]
- 17 Bellanger M. FBMC Physical Layer: A Primary Technical Report, 2010. www.ict-phydyas.org
- 18 Fettweis G, Krondorf M, Bittner S. GFDM-generalized frequency division multiplexing. In: Proceeding of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Barcelona, 2009. 1–4
- 19 Michailow N, Lentmaier M, Rost P, et al. Integration of a GFDM secondary system in an OFDM primary system. In: Proceedings of Future Network & Mobile Summit, 2011. 1–8
- 20 Datta R, Michailow N, Lentmaier M, et al. GFDM interference cancellation for flexible cognitive radio PHY design. In: Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Québec City, 2012. 1–5
- 21 Datta R, Panaitopol D, Fettweis G. Analysis of cyclo-stationary GFDM signal properties in flexible cognitive radio. In: Proceedings of International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), 2012. 663–667
- 22 Michailow N, Gaspar I, Krone S, et al. Generalized frequency division multiplexing: Analysis of an alternative multi-carrier technique for next generation cellular systems. In: Proceedings of International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), Paris, 2012. 171–175
- 23 Michailow N, Krone S, Lentmaier M, et al. Bit error rate performance of generalized frequency division multiplexing. In: Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Québec City, 2012. 1–5
- 24 Vaidyanathan P. Multirate digital filters, filter banks, polyphase networks, and applications: A tutorial. *Proc IEEE*, 1990, 78: 56–93

- 25 Schaich F. Filterbank based multi carrier transmission (FBMC)-evolving OFDM. In: Proceedings of European Wireless Conference, 2010. 1051–1058
- 26 Kishiyama Y. Future radio access for 5G. NTT DOCOMO, Inc
- 27 Estella I, Pascual-Iserte A, Payar M. OFDM and FBMC performance comparison for multistream MIMO systems. In: Proceedings of Future Network and Mobile Summit, 2010. 1–8
- 28 Wunder G, Kasparick M, ten Brink S. 5G NOW: Challenging the LTE design paradigms of orthogonality and synchronicity. In: Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2013. 1–5
- 29 Pinchon D, Siohan P. Derivation of analytical expressions for flexible PR low complexity FBMC Systems. In: Proceedings of European Signal Processing Conference, 2013. 1–5
- 30 Sahin A, Guvenc I, Arslan H. A survey on multicarrier communications: prototype filters, lattice structures, and implementation aspects. [Http://arxiv.org/abs/1212.3374v2](http://arxiv.org/abs/1212.3374v2)
- 31 Cheng W C, Zhang X, Zhang H L. Optimal dynamic power control for full-duplex bidirectional-channel based wireless networks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), 2013. 3120–3128
- 32 Ahmed E, Eltawil A M, Sabharwal A. Rate gain region and design tradeoffs for full-duplex wireless communications. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2013, 12: 3556–3565
- 33 Aggarwal V, Duarte M, Sabharwal A, et al. Full- or half-duplex? A capacity analysis with bounded radio resources. In: Proceedings of IEEE Information Theory Workshop, 2012. 207–211
- 34 Ju H S, Lim S M, Kim D K, et al. Full duplexity in beamforming-based multi-hop relay networks. *IEEE J Sel Area Commun*, 2012, 30: 1554–1565
- 35 DUPLO Project. System Scenarios and Technical Requirements for Full-Duplex Concept. DUPLO Deliverable D1.1, 2013
- 36 Jainy M, Choiy J I, Kim T M, et al. Practical, real-time, full duplex wireless. In: Proceeding of ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), 2011. 301–312
- 37 Choiy J I, Jainy M, Srinivasany K, et al. Achieving single channel, full duplex wireless communication. In: Proceeding of ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom), 2010. 1–12
- 38 Thangaraj A, Ganti R K, Bhashyam S. Self-interference cancellation models for full-duplex wireless communications. In: Proceedings of International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM), 2012. 1–5
- 39 Duarte M, Dick C, Sabharwal A. Experiment-driven characterization of full-duplex wireless systems. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2012, 11: 4296–4307
- 40 Vehkaperä M, Girnyk M A, Riihonen T, et al. On achievable rate regions at large-system limit in full-duplex wireless local access. In: Proceedings of International Black Sea Conference on Communications and Networking (Black Sea Com), 2013. 7–11
- 41 Hua Y B, Liang P, Ma Y M, et al. A method for broadband full-duplex MIMO radio. *IEEE Signal Process Lett*, 2012, 19: 793–796
- 42 Osseiran A, Braun V, Hidekazu T, et al. The foundation of the mobile and wireless communications system for 2020 and beyond: Challenges, enablers and technology solutions. In: Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2013. 1–5
- 43 Webb W. *Wireless Communications: The Future*. New York: Wiley, 2007
- 44 Nokia Siemens Networks. 2020: Beyond 4G Radio Evolution for the Gigabit Experience. Nokia Siemens Networks Beyond 4G White Paper
- 45 Hwang I S, Song B Y, Soliman S S. A holistic view on hyper-dense heterogeneous and small cell networks. *IEEE Commun Mag*, 2013, 51: 20–27
- 46 Baldemair R, Dahlman E, Parkvall S, et al. Future wireless communications. In: Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC spring), 2013. 1–5
- 47 Hoydis J, Kobayashi M, Debbah M. Green small cell networks: A cost- and energy-efficient way of meeting the future traffic demands. *IEEE Veh Technol Mag*, 2011, 31: 37–43
- 48 Liu S, Wu J J, Chung H K, et al. A 25 Gb/s (/km²) urban wireless network beyond IMT-advanced. *IEEE Commun Mag*, 2011, 49: 122–129
- 49 Qualcomm Research. LTE Rel-12 & Beyond. 2012. [Http://www.qualcomm.com/1000x/](http://www.qualcomm.com/1000x/)

- 50 Qualcomm Research. Neighborhood Small Cells for Hyper-Dense Deployments: Taking HetNets to the Next Level. Qualcomm Technologies, Inc., 2013. <http://www.qualcomm.com/media/documents/files/neighborhood-small-cell-deployment-model.pdf>
- 51 Galiotto C, Marchetti N, Doyle L. Flexible spectrum sharing and interference coordination for low power nodes in heterogeneous networks. In: Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012. 1–5
- 52 Dhillon H S, Ganti R K, Baccelli F, et al. Modeling and analysis of K-tier downlink heterogeneous cellular networks. *IEEE J Sel Area Commun*, 2012, 30: 550–560
- 53 Amani M, Aijaz A, Uddin N, et al. On mobile data offloading policies in heterogeneous wireless networks. In: Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2013. 1–5
- 54 Aijaz A, Aghvami H, Amani M. A survey on mobile data offloading: Technical and business perspectives. *IEEE Wirel Commun*, 2013, 20: 104–112
- 55 Tabrizi H, Farhadi G, Cioffi J. A learning-based network selection method in heterogeneous wireless systems. In: Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), 2011. 1–5
- 56 Yoon S G, Han J H, Bahk S W. Low-duty mode operation of femto base stations in a densely deployed network environment. In: Proceedings of the International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2012. 652–656
- 57 Prasad A, Lunden P, Tirkkonen O, et al. Mobility state based flexible inter-frequency small cell discovery for heterogeneous networks. In: Proceedings of IEEE the International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013. 2057–2061
- 58 Lopez-Perez D, Guvenc I, Chu X L. Mobility enhancements for heterogeneous networks through interference coordination. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), 2012. 69–74
- 59 Stefanatos S, Alexiou A. Access point density and bandwidth partitioning in ultra dense wireless networks. <http://arxiv.org/abs/1307.7249v1>
- 60 Ni W, Collings I B. A new adaptive small-cell architecture. *IEEE J Sel Area Commun*, 2013, 31: 829–839
- 61 Siebert M. Self-X Control in (future) mobile radio networks. In: Proceedings of the European-Chinese Cognitive Radio Systems Workshop, Beijing, 2008. 26–27
- 62 NGMN. NGMN Recommendation on SON and O&M Requirements, 2008. http://www.ngmn.org/uploads/media/NGMN_Recommendation_on_SON_and_O_M_Requirements.pdf
- 63 Aliu G O, Imran A, Imran M A, et al. A survey of self organisation in future cellular networks. *IEEE Commun Survey Tutor*, 2013, 15: 336–361
- 64 Hämäläinen S, Sanneck H, Sartori C. LTE Self Organising Networks (SON): Network Management Automation for Operational Efficiency. John Wiley & Sons, 2012
- 65 McKeown N, Anderson t, Balakrishnan H, et al. Openflow: Enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Commun Rev*, 2008, 38: 69–74
- 66 Sezer S, Scott-Hayward S, Chouhan P K. Are we ready for SDN? Implementation challenges for software-defined networks. *IEEE Commun Mag*, 2013, 51: 36–43
- 67 Demestichas P, Georgakopoulos A, Karvounas D, et al. 5G on the horizon: Key challenges for the radio-access network. *IEEE Veh Technol Mag*, 2013, 51: 47–53
- 68 Ali-Ahmad H, Cicconetti C, Oliva A D L. An SDN-based network architecture for extremely dense wireless networks. <http://eprints.networks.imdea.org/621/>
- 69 Savarese G, Vaser M, Ruggieri M. A software defined networking-based context-aware framework combining 4G cellular networks with M2M. In: Proceedings of International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2013. 1–5
- 70 Costanzo S, Galluccio L, Morabito G, et al. Software defined wireless networks: Unbridling SDNs. In: Proceedings of European Workshop on Software Defined Networking (EWSDN), 2012. 1–6
- 71 Li L E, Mao Z M, Rexford J. Toward software-defined cellular networks. In: Proceedings of European Workshop on Software Defined Networking (EWSDN), 2012. 7–12
- 72 Chaudet C, Haddad Y. Wireless software defined networks: Challenges and opportunities. In: Proceedings of IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS), 2013. 1–5

- 73 Peng G. CDN: Content distribution network, <http://arxiv.org/abs/cs/0411069v1>
- 74 Abedini N, Shakkottai S. Content caching and scheduling in wireless networks with elastic and inelastic traffic. *IEEE/ACM Trans Netw*, 2013, 99: 1
- 75 Zhao F, Kalker T, Médard M. Signatures for content distribution with network coding. In: *Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT)*, 2007. 1–5
- 76 Andronache A, Rothkuge S. Multimedia content distribution in hybrid wireless using weighted clustering. In: *Proceedings of ACM Workshop on Wireless Multimedia Networking and Performance Modeling*, 2006. 1–9
- 77 Cheng C M, Kung H T, Lin C K, et al. Rainbow: A wireless medium access control using network coding for multi-hop content distribution. In: *Proceedings of IEEE Military Communications Conference (MilCom)*, 2008. 1–5
- 78 Zhou S D, Zhao M, Xu X, et al. Distributed wireless communications system: A new architecture for public wireless access. *IEEE Commun Mag*, 2003, 41: 108–113

The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques

YOU XiaoHu^{1*}, PAN ZhiWen¹, GAO XiQi¹, CAO ShuMin² & WU HeQuan³

¹ *National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;*

² *China Academy of Telecommunications Research, Beijing 100191, China;*

³ *China Academy of Engineering, Beijing 100088, China*

*E-mail: xhyu@seu.edu.cn

Abstract 5G is a new generation mobile communication system that is to be commercialized in the year beyond 2020. Currently the development of 5G mobile communication system is on its earlier stage. In this article, the development requirements, technique features and possible approaches for the 5G are firstly addressed. The wireless transmission and networking techniques are introduced and remarked, which include massive multiple-input-multiple-output (MIMO), filter-bank based multi-carrier, full duplex, ultra dense network (UDN), self-organizing network (SON), software defined networking (SDN), and content distribution network (CDN). Furthermore, the recent R&D and promotion activities for 5G mobile communication system in China are summarized.

Keywords 5G, key techniques, development trends, radio transmission technology, wireless network technology



YOU XiaoHu was born in 1962. He received his master and Ph.D. degree from Southeast University, Nanjing, China, in Electrical Engineering in 1985 and 1988, respectively. Since 1990, he has been working with National Mobile Communications Research Laboratory at Southeast University, where he has been holding the rank of Professor from 1992, Changjiang Scholar Program Pro-

fessor since 2000, and Director since 2002. His research interests include wireless transmission, wireless networking, signal processing and its applications.