

白皮书
2015-05


IMT-2020 (5G) 推进组

CAICT
中国信息通信研究院

CAICT
中国信息通信研究院

CAICT
中国信息通信研究院

CAICT
中国信息通信研究院

5G 无线技术架构

CAICT
中国信息通信研究院

CAICT
中国信息通信研究院

CAICT
中国信息通信研究院

CAICT
中国信息通信研究院



目录

引言	P1
场景与技术需求	P2
5G无线技术路线	P3
5G空口技术框架	P5
5G无线关键技术	P11
总结	P34
主要贡献单位	P35

IMT-2020(5G)推进组于2013年2月由中国工业和信息化部、国家发展和改革委员会、科学技术部联合推动成立，组织架构基于原IMT-Advanced推进组，成员包括中国主要的运营商、制造商、高校和研究机构。推进组是聚合中国产学研力量、推动中国第五代移动通信技术研究和开展国际交流与合作的主要平台。

引言

在过去的三十年里，移动通信经历了从语音业务到移动宽带数据业务的飞跃式发展，不仅深刻地改变了人们的生活方式，也极大地促进了社会和经济的飞速发展。移动互联网和物联网作为未来移动通信发展的两大主要驱动力，为第五代移动通信（5G）提供了广阔的应用前景。面向2020年及未来，数据流量的千倍增长，千亿设备连接和多样化的业务需求都将对5G系统设计提出严峻挑战。与4G相比，5G将支持更加多样化的场景，融合多种无线接入方式，并充分利用低频和高频等频谱资源。同时，5G还将满足网络灵活部署和高效运营维护的需求，大幅提升频谱效率、能源效率和成本效率，实现移动通信网络的可持续发展。

传统的移动通信升级换代都是以多址接入技术为主线，5G的无线技术创新来源将更加丰富。除了稀疏码分多址（SCMA）、图样分割多址（PDMA）、多用户共享接入（MUSA）等新型

多址技术之外，大规模天线、超密集组网和全频谱接入都被认为是5G的关键使能技术。此外，新型多载波、灵活双工、新型调制编码、终端直通（D2D）、全双工（又称同时同频全双工）等也是潜在的5G无线关键技术。5G系统将会构建在以新型多址、大规模天线、超密集组网、全频谱接入为核心的技术体系之上，全面满足面向2020年及未来的5G技术需求。

当前，5G愿景与需求已基本明确，概念与技术路线逐步清晰，国际标准制定工作即将启动。为此，迫切需要尽快细化5G技术路线，整合各种无线关键技术，形成5G无线技术框架并推动达成产业共识，以指导5G国际标准及后续产业发展。

场景与技术需求

与以往移动通信系统相比，5G需要满足更加多样化的场景和极致的性能挑战。归纳未来移动互联网和物联网主要场景和业务需求特征，可提炼出连续广域覆盖、热点高容量、低时延高可靠和低功耗大连接四个5G主要技术场景。

- 连续广域覆盖场景是移动通信最基本的覆盖方式，在保证用户移动性和业务连续性的前提下，无论在静止还是高速移动，覆盖中心还是覆盖边缘，用户都能够随时随地获100Mbps以上的体验速率。
- 热点高容量场景主要面向室内外局部热点区域，为用户提供极高的数据传输速率，满足网络极高的流量密度需求。主要技术挑战包括1Gbps用户体验速率、数十Gbps峰值速率和数十Tbps/km²的流量密度。
- 低时延高可靠场景主要面向车联网、工业控制等物联网及垂直行业的特殊应用需求，为用户提供毫秒级的端到端时延和/或接近100%的业务可靠性保证。

- 低功耗大连接场景主要面向环境监测、智能农业等以传感和数据采集为目标的应用场景，具有小数据包、低功耗、低成本、海量连接的特点，要求支持百万/平方公里连接数密度。

总之，5G的技术挑战主要包括：0.1~1Gbps的用户体验速率，数十Gbps的峰值速率，数十Tbps/km²的流量密度，1百万/平方公里的连接数密度，毫秒级的端到端时延，以及百倍以上能效提升和单位比特成本降低。

5G无线技术路线

面对5G场景和技术需求，需要选择合适的无线技术路线，以指导5G标准化及产业发展。综合考虑需求、技术发展趋势以及网络平滑演进等因素，5G空口技术路线可由5G新空口（含低频空口与高频空口）和4G演进两部分组成。

LTE/LTE-Advanced技术作为事实上的统一4G标准，已在全球范围内大规模部署。为了持续提升4G用户体验并支持网络平滑演进，需要对4G技术进一步增强。在保证后向兼容的前提下，4G演进将以LTE/LTE-Advanced技术框架为基础，在传统移动通信频段引入增强技术，进一步提升4G系统的速率、容量、连接数、时延等空口性能指标，在一定程度上满足5G技术需求。

受现有4G技术框架的约束，大规模天线、超密集组网等增强技术的潜力难以完全发挥，全频谱接入、部分新型多址等先进技术难以在现有技术框架下采用，4G演进路线无法满足5G极致的性能需求。因此，5G需要突破后向兼容的限制，设计全新的空口，充分挖掘各种先进技术的潜力，以全面满足5G性能和效率指标要求，新空口将是5G主要的演进方向，4G演进将是有效补充。

5G将通过工作在较低频段的新空口来满足大覆盖、高移动性场景下的用户体验和海量设备连接。同时，需要利用高频段丰富的频谱资源，来满足热点区域极高的用户体验速率和系统容量需求。综合考虑国际频谱规划及频段传播特性，5G应当包含工作在6GHz以下频段的低频新空口以及工作在6GHz以上频段的高频新空口。

5G低频新空口将采用全新的空口设计，引入大规模天线、新型多址、新波形等先进技术，支持更短的帧结构，更精简的信令流程，更灵活的双工方式，有效满足广覆盖、大连接及高速等多数场景下的体验速率、时延、连接数以及能效等指标要求。在系统设计时应当构建统一的技术方案，通过灵活配置技术模块及参数来满足不同场景差异化的技术需求。

5G高频新空口需要考虑高频信道和射频器件的影响，并针对波形、调制编码、天线技术等进行相应的优化。同时，高频频段跨度大、候选频段多，从标准、成本及运维角度考虑，应当尽可能采用统一的空口技术方案，通过参数调整来适配不同信道及器件的特性。

高频段覆盖能力弱，难以实现全网覆盖，需要与低频段联合组网。由低频段形成有效的

网络覆盖，对用户进行控制、管理，并保证基本的数据传输能力；高频段作为低频段的有效补充，在信道条件较好情况下，为热点区域用户提供高速数据传输。



图1 5G技术路线与场景

5G空口技术框架

1. 设计理念

5G空口技术框架应当具有统一、灵活、可配置的技术特性。面对不同场景差异化的性能需求，客观上需要专门设计优化的技术方案。然而，从标准和产业化角度考虑，结合5G新空

口和4G演进两条技术路线的特点，5G应尽可能基于统一的技术框架进行设计。针对不同场景的技术需求，通过关键技术和参数的灵活配置形成相应的优化技术方案。

2. 5G空口技术框架

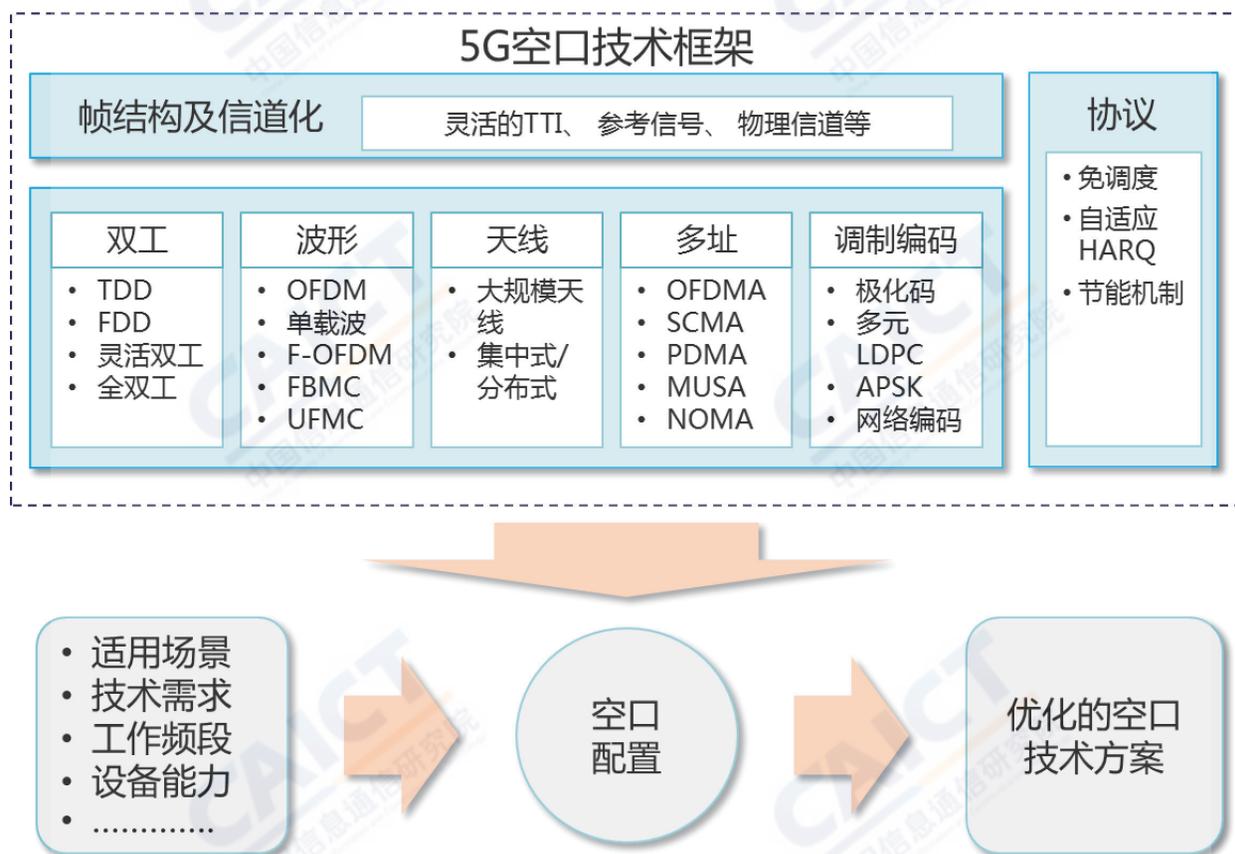


图2 灵活可配的5G空口技术框架

根据移动通信系统的功能模块划分，5G空口技术框架包括帧结构、双工、波形、多址、调制编码、天线、协议等基础技术模块，通过最大可能地整合共性技术内容，从而达到“灵活但不复杂”的目的，各模块之间可相互衔接，协同工作。根据不同场景的技术需求，对各技术模块进行优化配置，形成相应的空口技术方案。下面简要介绍各模块及相关备选技术：

- 帧结构及信道化：面对多样化的应用场景，5G的帧结构参数可灵活配置，以服务不同类型的业务。针对不同频段、场景和信道环境，可以选择不同的参数配置，具体包括带宽、子载波间隔、循环前缀（CP）、传输时间间隔（TTI）和上下行配比等。参考信号和控制信道可灵活配置以支持大规模天线、新型多址等新技术的应用。
- 双工技术：5G将支持传统的FDD和TDD及其增强技术，并可能支持灵活双工和全双工等新型双工技术。低频段将采用FDD和TDD，高频段更适宜采用TDD。此外，灵活双工技术可以灵活分配上下行时间和频率资源，更好地适应非均匀、动态变化的业务分布。全双工技术支持相同频率相同时间上同时收发，也是5G潜在的双工技术。
- 波形技术：除传统的OFDM和单载波波形外，5G很有可能支持基于优化滤波器设计的滤波器组多载波（FBMC）、基于滤波的OFDM（F-OFDM）和通用滤波多载波（UFMC）等新波形。这类新波形技术具有极低的带外泄露，不仅可提升频谱使用效率，还可以有效利用零散频谱并与其他波形实现共存。由于不同波形的带外泄露、资源开销和峰均比等参数各不相同，可以根据不同的场景需求，选择适合的波形技术，同时有可能存在多种波形共存的情况。
- 多址接入技术：除支持传统的OFDMA技术外，还将支持SCMA、PDMA、MUSA等新型多址技术。新型多址技术通过多用户的叠加传输，不仅可以提升用户连接数，还可以有效提高系统频谱效率。此外，通过免调度竞争接入，可大幅度降低时延。
- 调制编码技术：5G既有高速率业务需求，也有低速率小包业务和低时延高可靠业务需求。对于高速率业务，多元低密度奇偶校验码（M-ary LDPC）、极化码、新的星座映射以及超奈奎斯特调制（FTN）等比传统的二元Turbo+QAM方式可进一步提升链路的频谱效率；对于低速率小包业务，极化码和低码率的卷积码可以在短码

和低信噪比条件下接近香农容量界；对于低时延业务，需要选择编译码处理时延较低的编码方式。对于高可靠业务，需要消除译码算法的地板效应。此外，由于密集网络中存在大量的无线回传链路，可以通过网络编码提升系统容量。

- 多天线技术：5G基站天线数及端口数将有大幅度增长，可支持配置上百根天线和数十个天线端口的大规模天线，并通过多用户MIMO技术，支持更多用户的空间复用传输，数倍提升系统频谱效率。大规模天线还可用于高频段，通过自适应波束赋形补偿高的路径损耗。5G需要在参考信号设计、信道估计、信道信息反馈、多用户调度机制以及基带处理算法等方面进行改进和优化，以支持大规模天线技术的应用。
- 底层协议：5G的空口协议需要支持各种先进的调度、链路自适应和多连接等方案，并可灵活配置，以满足不同场景的业务需求。5G空口协议还将支持5G新空口、4G演进空口及WLAN等多种接入方式。为减少海量小包业务造成的资源和信令开销，可考虑采用免调度的竞争接入机制，以减少基站和用户之间的信令交互，降低接入时延。5G的自适应HARQ协议将能够满足不同时延和可靠性的业务需求。此外，5G将支持更高效的节能机制，以满足低功耗

物联网业务需求。

5G空口技术框架可针对具体场景、性能需求、可用频段、设备能力和成本等情况，按需选取最优技术组合并优化参数配置，形成相应的空口技术方案，实现对场景及业务的“量体裁衣”，并能够有效应对未来可能出现的新场景和新业务需求，从而实现“前向兼容”。

3. 5G低频新空口设计考虑

低频新空口可广泛用于连续广域覆盖、热点高容量、低功耗大连接和低时延高可靠场景，其技术方案将有效整合大规模天线、新型多址、新波形、先进调制编码等关键技术，在统一的5G技术框架基础上进行优化设计。

在连续广域覆盖场景中，低频新空口将利用6GHz以下低频段良好的信道传播特性，通过增大带宽和提升频谱效率来实现100Mbps的用户体验速率。在帧结构方面，为了有效支持更大带宽，可增大子载波间隔并缩短帧长，并可考虑兼容LTE的帧结构，如：帧长可被1ms整除，子载波间隔可为15kHz的整数倍；在天线技术方面，基站侧将采用大规模天线技术提升系统频谱效率，天线数目可达128个以上，可支持多达10个以上用户的并行传输；在波形方面，可沿用OFDM波形，上下行可采用相同的设计，还可以采用F-OFDM等技术支持与其它场景技术方案的共存；在多址技术方面，可在OFDMA基础上引入基于叠加编码的新型多址技术，提升用户连接能力和频谱效率；在信道设计方面，将会针对大规模天线、新型多址等技术需求，对参考信号、信道估计及多用户配对机制进行全新设计；在双工技术方面，TDD可利用信道互易性更好地展现大规模天线的性能。此外，宏基站的控制面将进一步增强并支持C/U分离，实现对小站和用户的高效控制与管理。

在热点高容量场景中，低频新空口可通过增加小区部署密度、提升系统频谱效率和增加带宽等方式在一定程度上满足该场景的传输速率与流量密度需求。本场景的技术方案应与连续广域覆盖场景基本保持一致，并可在如下几方面做进一步优化：帧结构的具体参数可根据热点高容量场景信道和业务特点做相应优化；在部分干扰环境较为简单的情况下，可考虑引入灵活双工或全双工；调制编码方面，可采用更高阶的调制方式和更高的码率；为了降低密集组网下的干扰，可考虑采用自适应小小区分簇、多小区协作传输及频率资源协调；此外，可通过多小区共同为用户提供服务，打破传统小区边界，实现以用户为中心的小区虚拟化；为了给小小区提供一种灵活的回传手段，可考虑接入链路与回传链路的统一设计，并支持接入与回传频谱资源的自适应分配，有效提高资源的使用效率。同时，在系统设计时还要考虑集中式、分布式和无线网状网（MESH）等不同无线组网方式带来的影响。

在低功耗大连接场景中，由于物联网业务具有小数据包、低功耗、海量连接、强突发性的特点，虽然总体数量较大，但对信道带宽的需求量较低，本场景更适合采用低频段零散、碎片频谱或部分OFDM子载波。在多址技术方面，可采用SCMA、MUSA、PDMA等多址技术通过叠加传输来支持大量的用户连接，并

支持免调度传输，简化信令流程，降低功耗；在波形方面，可采用基于高效滤波的新波形技术（如：F-OFDM，FBMC等）降低带外干扰，利用零散频谱和碎片频谱，有效实现子带间技术方案的解耦，不同子带的编码、调制、多址、信令流程等都可进行独立配置；可通过采用窄带系统设计，提升系统覆盖能力，增加接入设备数，并显著降低终端功耗和成本；此外，还需大幅增强节能机制（包括连接态和空闲态），在连接态通过竞争接入方式，简化信令流程，降低用户接入时延，减少开启时间；空闲态采用更长的寻呼间隔，使终端更长时间处于休眠状态，实现更低的终端功耗。

在低时延高可靠场景，为满足时延指标要求，一方面要大幅度降低空口传输时延，另一方面要尽可能减少转发节点，降低网络转发时延。为了满足高可靠性指标要求，需要增加单位时间内的重传次数，同时还应有效提升单链路的传输可靠性。为有效降低空口时延，在帧结构方面，需要采用更短的帧长，可与连续广域覆盖的帧结构保持兼容。在波形方面，由于短的TTI设计可能导致CP开销过大，可考虑采用无CP或多个符号共享CP的新波形；在多址技术方面，可通过SCMA、PDMA、MUSA等技术实现免调度传输，避免资源分配流程，实现上行数据包调度“零”等待时间。为有效降低网络转发时延，一方面可通过核心网功能下沉，移动内容本地化等方式，缩短传输路径；另一方面，接入网侧

可引入以簇为单位的动态网络结构，并建立动态MESH通信链路，支持设备和终端间单跳和/或多跳直接通信，进一步缩短端到端时延。为了提升数据传输的可靠性，在调制编码方面，可采用先进编码和空时频分集等技术提升单链路传输的可靠性；在协议方面，可采用增强的HARQ机制，提升重传的性能。此外，还可以利用增强协作多点（CoMP）和动态MESH等技术，加强基站间和终端间的协作互助，进一步提升数据传输的可靠性。

4. 5G高频新空口设计考虑

高频新空口通过超大带宽来满足热点高容量场景极高传输速率要求。同时，高频段覆盖小、信号指向性强，可通过密集部署来达到极高流量密度。在天线技术方面，将采用大规模天线，通过自适应波束赋形与跟踪，补偿高路损带来的影响，同时还可以利用空间复用支持更多用户，并增加系统容量；在帧结构方面，为满足超大带宽需求，与LTE相比，子载波间隔可增大10倍以上，帧长也将大幅缩短；在波形方面，上下行可采用相同的波形设计，OFDM仍是重要的候选波形，但考虑到器件的影响以及高频信道的传播特性，单载波也是潜在的候选方式；在双工方面，TDD模式可更好地支持高频段通信和大规模天线的应用；编码技术方面，考虑到高速率大容量的传输特点，

应选择支持快速译码、对存储需求量小的信道编码，以适应高速数据通信的需求。高频新空口对回传链路的要求高，可利用高频段丰富的频谱资源，统一接入与回传链路设计，实现高频基站的无线自回传。此外，为解决高频覆盖差的问题，可采用支持C/U分离的低频与高频融合组网，低频空口可承担控制面功能，高频新空口主要用于用户面的高速数据传输，低频与高频的用户面可实现双连接，并支持动态负载均衡。

5. 4G演进空口设计考虑

4G演进空口将基于LTE/LTE-Advanced技术框架，在帧结构、多天线、多址接入等方面进一步改进优化，从而在保持平滑演进的基础上，满足5G在速率、时延、流量密度和连接数密度等方面的部分需求。在帧结构方面，可减少每个TTI的OFDM符号数量，并引入优化的调度和反馈机制，以降低空口时延；在多天线方面，可以利用三维信道信息实现更精准的波束赋形，支持更多用户和更多流传输；在多址

接入方面，可以利用多用户叠加传输技术和增强的干扰消除算法，提升系统频谱效率及用户容量；针对物联网应用需求，可引入窄带设计方案，以提升覆盖能力，增加设备连接数，并降低功耗和实现成本。此外，4G演进空口应当能够与5G新空口密切协作，通过双连接等方式共同为用户提供服务。

5G无线关键技术

1. 大规模天线

MIMO技术已经在4G系统中得以广泛应用。面对5G在传输速率和系统容量等方面的性能挑战，天线数目的进一步增加仍将是MIMO技术继续演进的重要方向。根据概率统计学原理，当基站侧天线数远大于用户天线数时，基站到各个用户的信道将趋于正交。这种情况下，用户间干扰将趋于消失，而巨大的阵列增益将能够有效地提升每个用户的信噪比，从而能够在相同的时频资源上支持更多用户传输。

在实际应用中，通过大规模天线，基站可以在三维空间形成具有高空间分辨能力的高增益窄细波束，能够提供更灵活的空间复用能力，改善接收信号强度并更好地抑制用户间干扰，从而实现更高的系统容量和频谱效率。

大规模天线技术的研究内容主要包括：

(1) 应用场景与信道建模

大规模天线技术的潜在应用场景主要包括：宏覆盖、高层建筑、异构网络、室内外热点以及无线回传链路等。此外，以分布式天线的形式构建大规模天线系统也可能成为该技术的应用场景之一。在需要广域覆盖的场景，大规模天线技术可以利用现有频段；在热点覆盖或回传链路等场景，则可以考虑使用更高频段。针对上述典型应用场景，需要根据大规模天线信道的实测结果，对一系列信道参数的分

布特征及其相关性进行建模，从而反映出信号在三维空间中的传播特性。

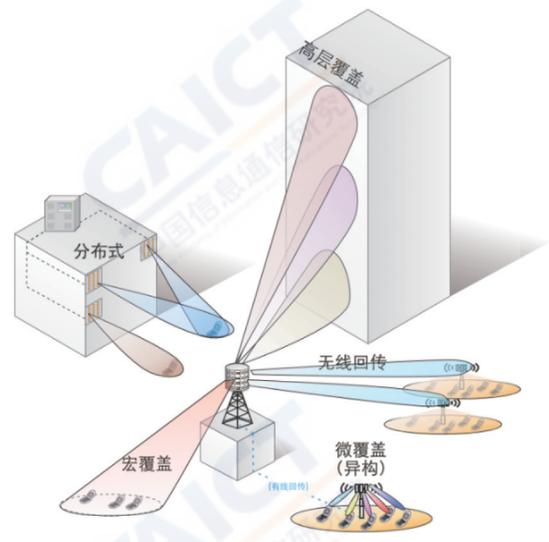


图3 大规模天线应用场景

(2) 传输与检测技术

大规模天线的性能增益主要是通过大量天线阵元形成的多用户信道间的准正交特性保证的。然而，在实际的信道条件中，由于设备与传播环境中存在诸多非理想因素，为了获得稳定的多用户传输增益，仍然需要依赖下行发送与上行接收算法的设计来有效地抑制用户间乃至小区间的同道干扰，而传输与检测算法的计算复杂度则直接与天线阵列规模和用户数相

关。此外，基于大规模天线的预编码/波束赋形算法与阵列结构设计、设备成本、功率效率和系统性能都有直接的联系。基于Kronecker运算的水平垂直分离算法、数模混合波束赋形技术，或者分级波束赋型技术等可以较为有效地降低大规模天线系统计算复杂度。

(3) 信道状态信息测量与反馈技术

信道状态信息测量、反馈及参考信号设计等对于MIMO技术的应用具有重要意义。为了更好地平衡信道状态信息测量开销与精度，除了传统的基于码本的隐式反馈和基于信道互易性的反馈机制之外，诸如分级CSI测量与反馈、基于Kronecker运算的CSI测量与反馈、压缩感知以及预体验式等新型反馈机制也值得考虑。

(4) 覆盖增强技术以及高速移动解决方案

天线规模的扩展对于业务信道的覆盖将带来巨大的增益，但是对于需要有效覆盖全小区内所有终端的广播信道而言，则会带来诸多不利影响。在这种情况下，类似内外双环波束扫描的接入技术能够解决窄波束的广覆盖问题。除此之外，大规模天线还需要考虑在高速移动场景下，如何实现信号的可靠和高速率传输问题。对信道状态信息获取依赖度较低的波束跟踪和波束拓宽技术，可以有效利用大规模天线的阵列增益提升数据传输可靠性和传输速率。

(5) 多用户调度与资源管理技术

大规模天线为无线接入网络提供了更精细的空间粒度以及更多的空间自由度，因此基于大规模天线的多用户调度技术、业务负载均衡技术以及资源管理技术将获得可观的性能增益。

(6) 大规模有源阵列天线技术

大规模天线前端系统从结构上可分为数字阵和数模混合阵两大类。出于复杂度、功耗和成本的考虑，数模混合的阵列架构在高频段将具有很大的应用潜力。大规模有源阵列天线的构架、高效/高可靠/小型化/低成本/模块化收发组件、高精度监测与校准方案等关键技术将直接影响到大规模天线技术在实际应用环境中的性能与效率，并将成为直接关系到大规模天线技术能否最终进入实用化阶段的关键环节。

大规模天线技术为系统频谱效率、用户体验、传输可靠性的提升提供了重要保证，同时也为异构化、密集化的网络部署环境提供了灵活的干扰控制与协调手段。随着一系列关键技术的突破以及器件、天线等技术的进一步发展，大规模天线技术必将在5G系统中发挥重大作用。

2. 超密集组网

超密集组网将是满足2020年以及未来移动数据流量需求的主要技术手段。超密集组网通过更加“密集化”的无线网络基础设施部署，可获得更高的频率复用效率，从而在局部热点区域实现百倍量级的系统容量提升。超密集组网的典型应用场景主要包括：办公室、密集住宅、密集街区、校园、大型集会、体育场、地铁、公寓等。随着小区部署密度的增加，超密集组网将面临许多新的技术挑战，如干扰、移动性、站址、传输资源以及部署成本等。为了满足典型应用场景的需求和技术挑战，实现易部署、易维护、用户体验轻快的轻型网络，接入和回传联合设计、干扰管理和抑制、小区虚拟化技术是超密集组网的重要研究方向。

(1) 接入和回传联合设计

接入和回传联合设计包括混合分层回传、多跳多路径的回传、自回传技术和灵活回传技术等。混合分层回传是指在架构中将不同基站分层标示，宏基站以及其他享有有线回传资源的小基站属于一级回传层，二级回传层的小基站以一跳形式与一级回传层基站相连接，三级及以下回传层的小基站与上一级回传层以一跳形式连接、以两跳/多跳形式与一级回传层基站相连接，将有线回传和无线回传相结合，提供一种轻快、即插即用的超密集小区组网形式。多跳多路径的回传是指无线回传小基站与相邻小基站之间进行多跳路径的优化选择、多路径建立和多路径承载管理、动态路径选择、回

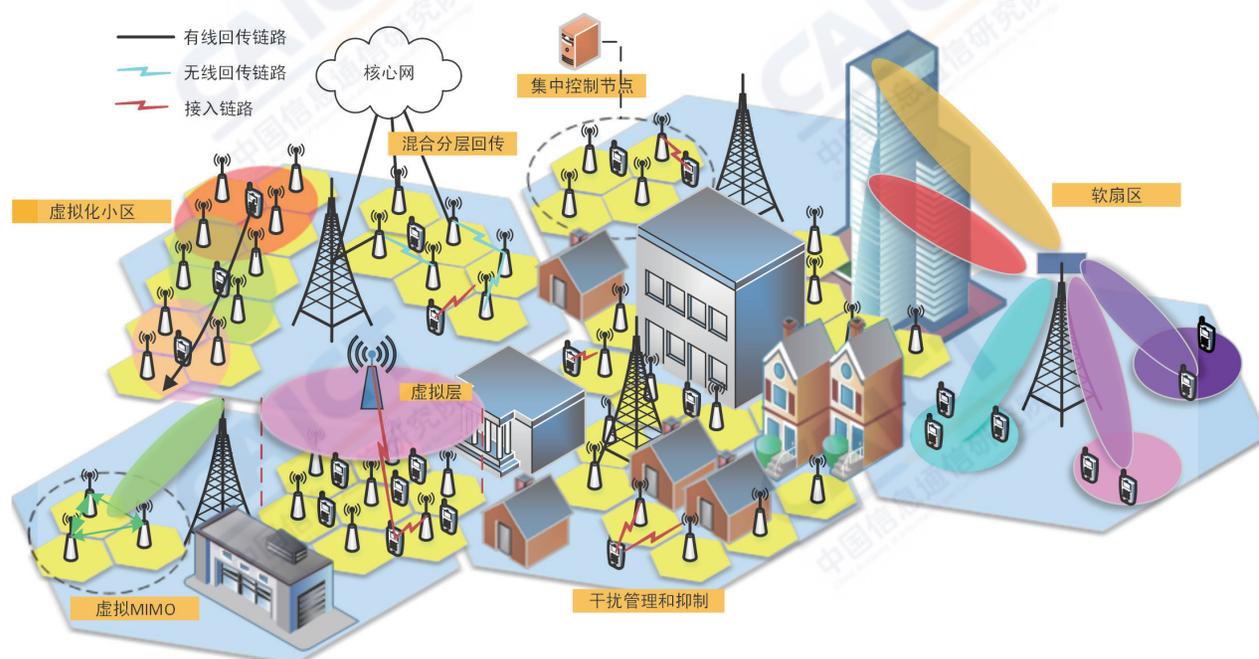


图4 关键技术示意图

传和接入链路的联合干扰管理和资源协调，可给系统容量带来较明显的增益。自回传技术是指回传链路和接入链路使用相同的无线传输技术，共用同一频带，通过时分或频分方式复用资源，自回传技术包括接入链路和回传链路的联合优化以及回传链路的链路增强两个方面。在接入链路和回传链路的联合优化方面，通过回传链路和接入链路之间自适应的调整资源分配，可提高资源的使用效率。在回传链路的链路增强方面，利用BC plus MAC (Broadcast Channel plus Multiple Access Channel, 广播信道特性加上多址接入信道特性) 机制，在不同空间上使用空分子信道发送和接收不同数据流，增加空域自由度，提升回传链路的链路容量；通过将多个中继节点或者终端协同形成一个虚拟MIMO网络进行收发数据，获得更高阶的自由度，并可协作抑制小区间干扰，从而进一步提升链路容量。灵活回传是提升超密集网络回传能力的高效、经济的解决方案，它通过灵活地利用系统中任意可用的网络资源（包括有线和无线资源），灵活地调整网络拓扑和回传策略来匹配网络资源和业务负载，灵活地分配回传和接入链路网络资源来提升端到端传输效率，从而能够以较低的部署和运营成本来满足网络的端到端业务质量要求。

(2) 干扰管理和抑制策略

超密集组网能够有效提升系统容量，但随

着小小区更密集的部署、覆盖范围的重叠，带来了严重的干扰问题。当前干扰管理和抑制策略主要包括自适应小小区分簇、基于集中控制的多小区相干协作传输，和基于分簇的多小区频率资源协调技术。自适应小小区分簇通过调整每个子帧、每个小小区的开关状态并动态形成小小区分簇，关闭没有用户连接或者无需提供额外容量的小小区，从而降低对临近小小区的干扰。基于集中控制的多小区相干协作传输，通过合理选择周围小区进行联合协作传输，终端对来自于多小区的信号进行相干合并避免干扰，对系统频谱效率有明显提升。基于分簇的多小区频率资源协调，按照整体干扰性能最优的原则，对密集小基站进行频率资源的划分，相同频率的小站为一簇，簇间为异频，可较好地提升边缘用户体验。

(3) 小区虚拟化技术

小区虚拟化技术包括以用户为中心的虚拟化小区技术、虚拟层技术和软扇区技术。以用户为中心的虚拟化小区技术是指打破小区边界限制，提供无边界的无线接入，围绕用户建立覆盖、提供服务，虚拟小区随着用户的移动快速更新，并保证虚拟小区与终端之间始终有较好的链路质量，使得用户在超密集部署区域中无论如何移动，均可以获得一致的高QoS/QoE。虚拟层技术由密集部署的小基站构建虚拟层和实体层网络，其中虚拟层承载广播、寻呼等控制信令，负责移

动性管理；实体层承载数据传输，用户在同一虚拟层内移动时，不会发生小区重选或切换，从而实现用户的轻快体验。软扇区技术由集中式设备通过波束赋形手段形成多个软扇区，可以降低大

量站址、设备、传输带来的成本；同时可以提供虚拟软扇区和物理小区间统一的管理优化平台，降低运营商维护的复杂度，是一种易部署、易维护的轻型解决方案。

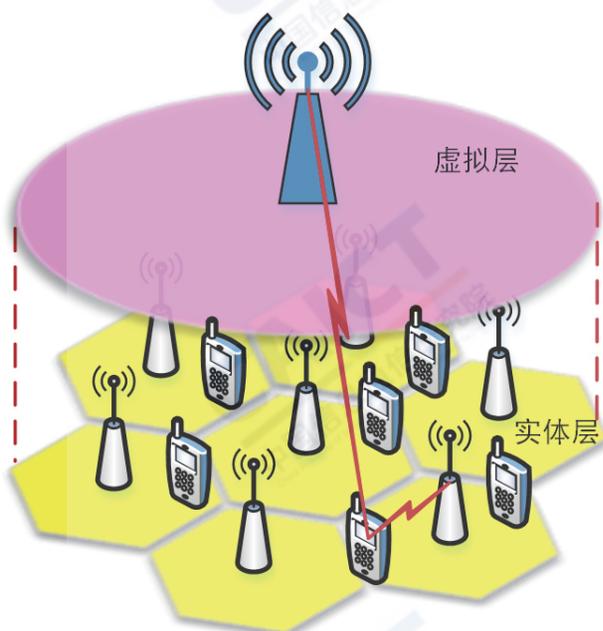


图5 虚拟层技术示意图

3. 全频谱接入

全频谱接入涉及6GHz以下低频段和6GHz以上高频段，其中低频段是5G的核心频段，用于无缝覆盖；高频段作为辅助频段，用于热点区域的速率提升。全频谱接入采用低频和高频混合组网，充分挖掘低频和高频的优势，共同满足无缝覆盖、高速率、大容量等5G需求。考虑高频段传播特性与6GHz以下频段有明显不同，全频谱接入重点研究高频段在移动通信中应用的关键技术，目前业界统一的认识

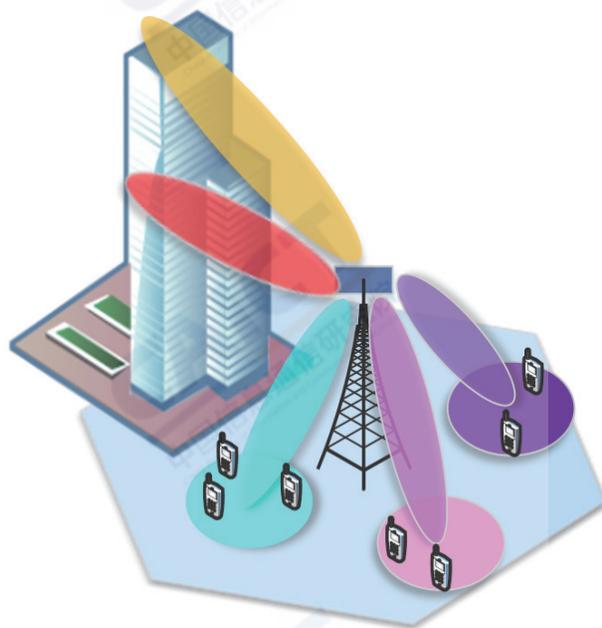


图6 软扇区示意图

是研究6–100GHz频段，该频段拥有丰富的空闲频谱资源，可有效满足未来5G对更高容量和速率的需求，可支持10Gbps以上的用户传输速率。

高频通信在军事通信和无线局域网（WLAN）等领域已经获得应用，但是在蜂窝通信领域的研究尚处于起步阶段。高频信号在移动条件下，易受到障碍物、反射物、散射体以及大气吸收等环境因素的影响，高频信道与

传统蜂窝频段信道有着明显差异，如传播损耗大、信道变化快、绕射能力差等，因此需要对

高频信道测量与建模、高频新空口、组网技术以及器件等内容开展深入研究。

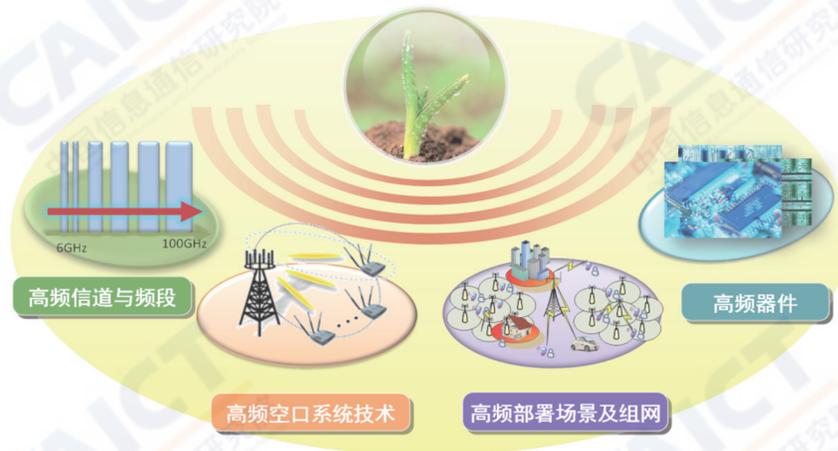


图7 高频通信关键技术

(1) 高频候选频段及信道特性研究

当前高频段研究范围涵盖6–100GHz频段，包括授权频谱和非授权频谱、对称频谱和非对称频谱、连续频谱和离散频谱等。面向未来5G可能的候选频点，结合业界信道测量成果，研究高频候选频点的信道传播特性，构建适用于高频频段的信道模型，分析和评估高频频点的适用场景，选择适合5G的高频频段。目前业界开展研究的5G典型候选频段主要包括6GHz、15GHz、18GHz、28GHz、38GHz、45GHz、60GHz和72GHz等，测量场景涵盖室外热点和室内热点。

初步的信道测量表明，频段越高，信道传播路损越大。高频信道表现出来的一个新特性是信道特性比较依赖所采用的天线形态，如传输损耗、时延扩展和接收功率角度谱等参数随着天线形态的不同将发生较大的变化，因此信道测量如何与天线形态解耦是高频信道建模的研究重点。

信道传输损耗方面，可采用业界公认的Close-in Reference和Floating Intercept两种不同的路损模型分别提取参数。比较而言，测量数据不足的情况下Close-in Reference模型更加稳健，当有足够的测量数据情况下，采用Floating Intercept模型更加合理。

(2) 高频空口设计

基于高频信道的特征，高频通信系统以多天线、阵列天线技术为核心研究收发波束赋形技术，以及窄波束的对准与跟踪技术，以提高高频系统的覆盖；研究适用于不同高频频点信道传播特性的信号波形，以及支持高低频混合组网下统一的空口帧结构及接入机制；研究自适应感知频谱技术，以支持授权频谱和非授权频谱等多种频谱使用需求；研究适用于高频通信的编码调制技术、点射技术、干扰管理技术以及高效的MAC层技术等，提升高频空口传输的性能；研究接入与回传相结

合的无线传输技术，降低高频组网的成本。

(3) 低频与高频混合组网

作为低频蜂窝空口的补充，高频空口将主要部署在室内外热点区域，用以提供高速率的数据业务。由于高频信号的传播特性，采用高、低频混合组网，结合数据面与控制面分离的架构，利用超密集网络和高频自适应回传技术，可以有效地解决热点场景下的高容量和高速率需求，并能够保持较低的布网成本。利用高频通信的窄波束和小覆盖的特点，可用于D2D、车载雷达等新型无线应用通信场景。

(4) 高频器件

与中低频相比，高频器件更易于系统集成，实现大规模天线和设备小型化。目前6–100GHz的器件在微波产品中相对成熟，其中，工作在14GHz，23GHz，28GHz，V波段和E波段等微波产品已商用，但应用于蜂窝通信尚需在关键高频器件上进一步突破。高频功放和低噪放需要进一步提升功率效率，降低相位噪声；ADC和DAC器件要求满足至少1GHz信道带宽的采样需求；新型的高频阵列天线需要满足高增益波束和大范围空间扫描的需求。

为了验证高频通信关键技术，业界研制了一些高频通信原型系统。其中，基于E波段的原型系统可实现高达115Gbps的传输速率，基于20–40GHz的原型系统可支持10Gbps的传输速率，初步验证了高频段支持高速数据通信的可行性。

综上所述，高频段通信能够利用高频丰富

的频谱资源，大幅度提升数据传输速率和系统容量，是突破传统蜂窝通信的革命性技术。要推动高频通信标准化和产业化，尚需在信道传播特性、空口技术方案、高低频组网和射频器件上实现技术突破。

4. 新型多址

面向2020年及未来，移动互联网和物联网将成为未来移动通信发展的主要驱动力，5G不仅需要大幅度提升系统频谱效率，而且还要具备支持海量设备连接的能力，此外，在简化系统设计及信令流程方面也提出了很高的要求，这些都将对现有的正交多址技术形成严峻挑战。

以SCMA、PDMA和MUSA为代表的新型多址技术通过多用户信息在相同资源上的叠加传输，在接收侧利用先进的接收算法分离多用户信息，不仅可以有效提升系统频谱效率，还可成倍增加系统的接入容量。此外，通过免调度传输，也可有效简化信令流程，并降低空口传输时延。

(1) SCMA

SCMA是一种基于码域叠加的新型多址技术，它将低密度码和调制技术相结合，通过共轭、置换以及相位旋转等方式选择最优的码本集合，不同用户基于分配的码本进行信息传输。在接收端，通过MPA (Message Passing Algorithm) 算法进行解码。由于采用非正交稀疏编码叠加技术，在同样资源条件下，SCMA技

术可以支持更多用户连接，同时，利用多维调制和扩频技术，单用户链路质量将大幅度提升。此外，还可以利用盲检测技术以及SCMA对码字碰撞不敏感的特性，实现免调度随机竞争接入，有效降低实现复杂度和时延，更适合用于小数据包、低功耗、低成本的物联网业务应用。

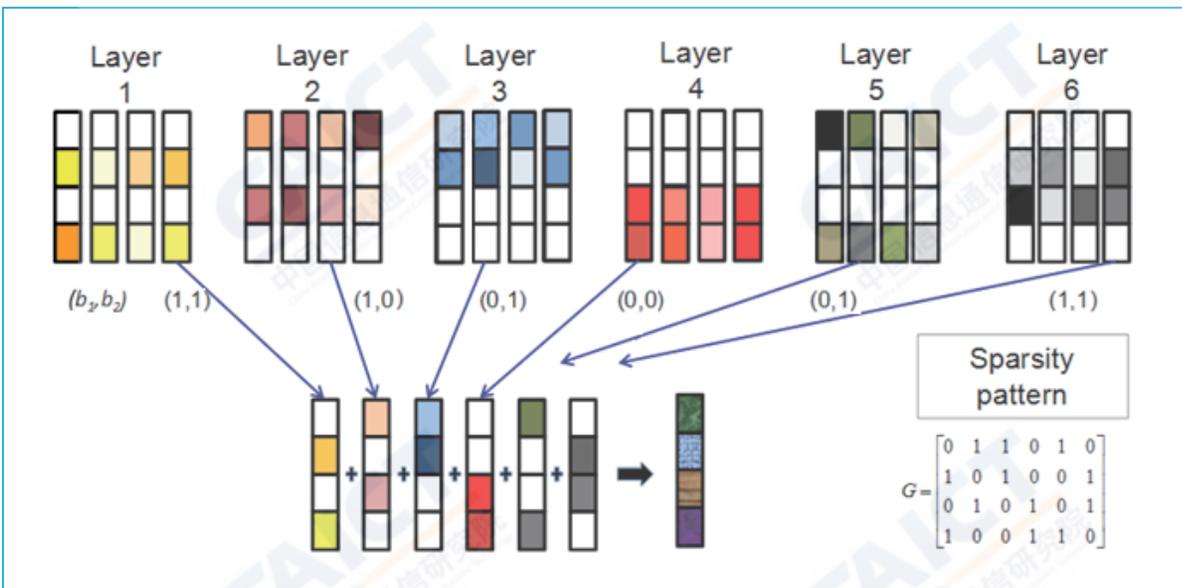


图8 SCMA工作原理

(2) PDMA

PDMA以多用户信息理论为基础，在发送端利用图样分割技术对用户信号进行合理分割，在接收端进行相应的串行干扰删除（SIC），可以逼近多址接入信道的容量界。用户图样的设计可以在空域、码域和功率域独立进行，也可以在多个信号域联合进行。图样分割技术通过在发送端

利用用户特征图样进行相应的优化，加大不同用户间的区分度，从而有利于改善接收端串行干扰删除的检测性能。

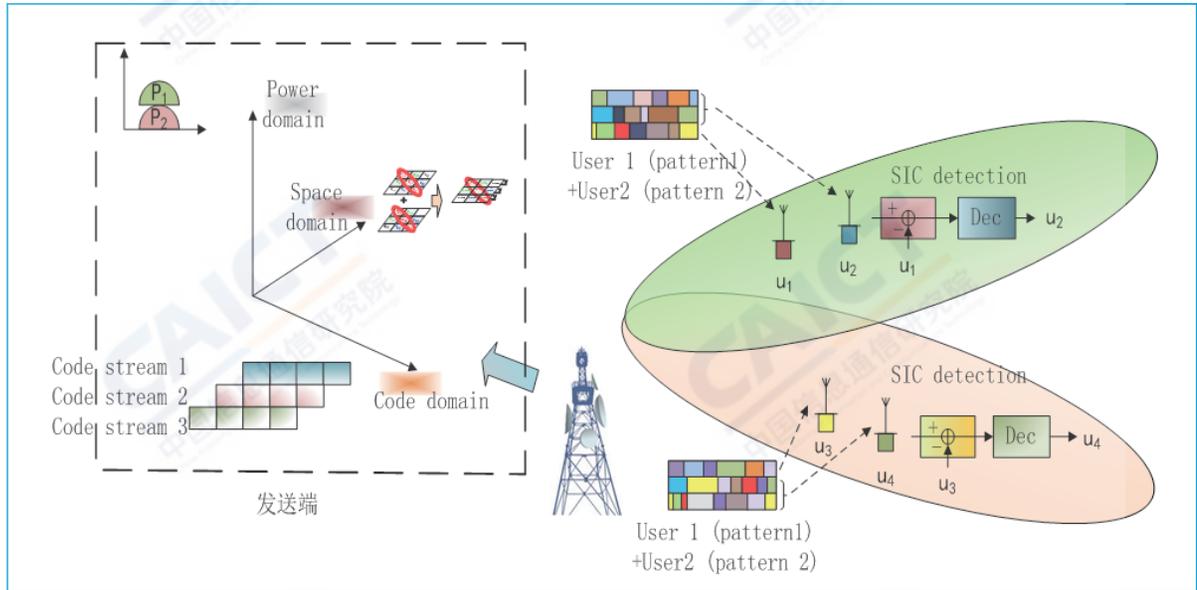


图9 PDMA工作原理

(3) MUSA

MUSA是一种基于码域叠加的多址接入方案，对于上行链路，将不同用户的已调符号经过特定的扩展序列扩展后在相同资源上发送，接收端采用SIC接收机对用户数据进行译码。扩展序列的设计是影响MUSA方案性能的关键，要求在码长很短的条件下（4个或8个）具有较好的互相关特性。对于下行链路，基于传统的功率叠加方案，利用镜像星座图对配对用户的符号映射进行优化，提升下行链路性能。

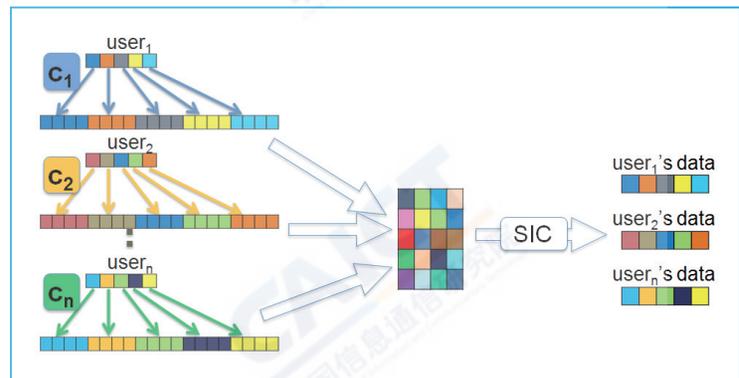


图10 MUSA工作原理

通过仿真分析，相对于LTE系统，采用上述新型多址技术不但可以获得30%左右的下行频谱效率提升，还可以将系统的上行用户连接能力提升3倍以上。同时，通过免调度传输方式，可以简化信令流程，大幅度降低数据传输时延。

5. 新型多载波

作为多载波技术的典型代表，OFDM技术在4G中得到了广泛应用。在未来的5G中，OFDM仍然是基本波形的重要选择。但是，面对5G更加多样化的业务类型、更高的频谱效率和更多的连接数等需求，OFDM将面临挑战，新型多载波技术可以作为有效的补充，更好地满足5G的总体需求。

OFDM可以有效地对抗信道的多径衰落，支持灵活的频率选择性调度，这些特性使它能够有效支持移动宽带业务。但是，OFDM也存在一些缺点，例如：较高的带外泄露、对时频同步偏差比较敏感以及要求全频带统一的波形参数等。

为了更好地支撑5G的各种应用场景，新型多载波技术的研究需要关注多种需求。首先，新型多载波需要能更好的支持新业务。和4G主要关注移动宽带业务不同，5G的业务类型更加丰富，尤其是大量的物联网业务，例如：低成本大连接的机器通信业务，低时延高可靠的V2V业务等，这些业务对基础波形提出了新的要求。新型多载波技术除兼顾传统的移动宽带

用户体验速率、连接数密度以及时延是5G的三个最关键的性能指标，上述新型多址技术相比于OFDM，不但可以提供更高的频谱效率，支持更多的用户连接数，还可以有效降低时延，可以作为未来5G系统的基础性核心技术之一。

业务之外，也需要对这些物联网业务具有良好的支持能力。其次，由于新技术和新业务的不断涌现，为了避免“一出现就落后”的局面，新的多载波技术需要具有良好的可扩展性，以便通过增加参数配置或简单修改就可以支撑未来可能出现的新业务。此外，新型多载波技术还需要和其他技术实现良好兼容。5G的多样化需求需要通过融合新型调制编码、新型多址、大规模天线和新型多载波等新技术来共同满足，作为基础波形，新型多载波技术需要和这些技术能够很好的结合。

围绕着这些需求，业界已提出了多种新型多载波技术，例如：F-OFDM技术、UFMC技术和FBMC技术等。这些技术的共同特征是都使用了滤波机制，通过滤波减小子带或子载波的频谱泄露，从而放松对时频同步的要求，避免了OFDM的主要缺点。在这些技术中，F-OFDM和UFMC都使用了子带滤波器，其中，F-OFDM使用了时域冲击响应较长的滤波器，并且子带内部采用了和OFDM一致的信号处理方法，因此可以更好的兼容OFDM。而UFMC则使用了冲击响

应较短的滤波器，并且没有采用OFDM中的CP方案。FBMC则是基于子载波的滤波，它放弃了复数域的正交，换取了波形时频局域性上的设计自由度，这种自由度使FBMC可以更灵活的适配信道的变化，同时，FBMC不需要CP，因此，系统开销也得以减小。

通过这几种新型多载波技术，5G的一些关键需求可以得到满足，包括：

(1) 通过新型多载波支撑灵活可配的新空口。F-OFDM和UFMC都可以通过子带滤波实现子带之间参数配置的解耦，因此系统带宽可以根据业务的不同，划分成不同的子带，并在每个子带上配置不同的TTI、子载波间隔和CP长度等，从而实现灵活自适应的空口，增强系统对各种业务的支持能力，提高系统的灵活性和可扩展性。

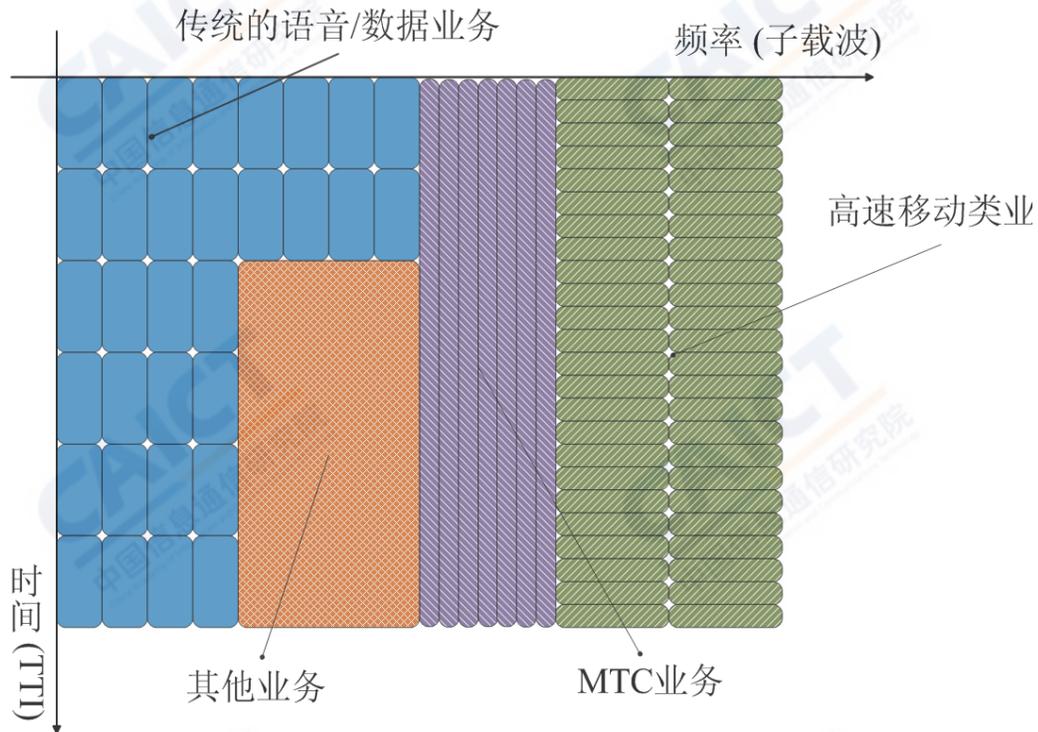


图11 基于F-OFDM的灵活自适应帧结构

(2) 通过新型多载波支持特定的场景和业务类型。例如，在V2V或高铁场景下，由于较高的相对速度以及车与车之间复杂的散射环境，信道可能呈现明显的双色散特性，并且不同设备的

信道可能具有较大差异。这种场景下需要新型多载波进行支持。例如，FBMC技术可以根据实时的信道状态对原型滤波器进行优化，从而更好地匹配信道双色散特征，获得更好的性能。

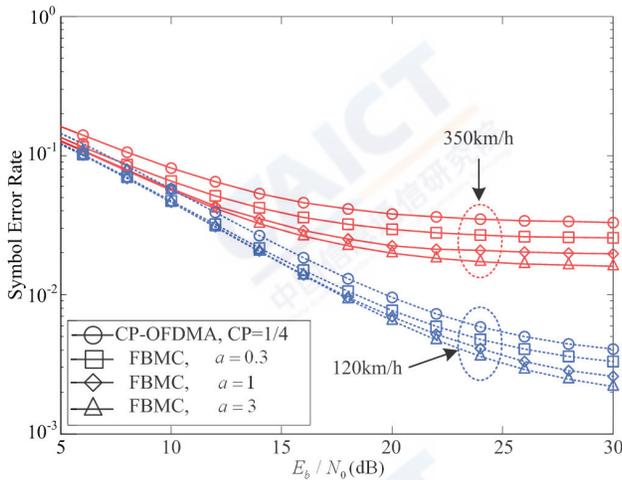


图12 OFDM和FBMC在高速场景下性能对比
(a为原型滤波器调整系数)

(3) 通过新型多载波支持异步信号传输，减小信令开销。UFMC、F-OFDM和FBMC均采用了滤波的机制，他们都具有较低的带外泄露，因此可以减小保护带开销。同时，由于子带间能量的隔离，子带之间不再需要严格的同步，有利于支持异步信号传输，减小同步信令开销。

6. 先进调制编码

5G包括多种应用场景，性能指标要求差异很大。例如，热点高容量场景对单用户链路的速率要求极高，这就需要在带宽和信道好的条件下支持很高的频谱效率和码长。在密集部署场景，无线回传会广泛应用，这就需要有更先进的信道编码设计和路由策略来降低节点之间的干扰，充分利用空口的传输特性，以满足系统高容量的需求。

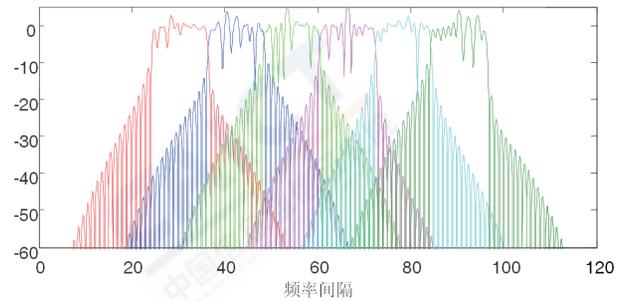


图13 UFMC的带外泄露示意图

总之，由于未来5G应用场景和业务类型的巨大差异，单一的波形很难满足所有需求，多种波形技术将共存，在不同的场景下发挥着各自的作用。新型多载波应当从场景和业务的根本需求出发，以最合适的波形和参数，为特定业务达到最佳性能发挥基础性的作用。

先进调制编码涵盖许多单点技术，它们大致可以分为链路级调制编码、链路自适应、网络编码三大领域。其中链路级技术包括多元域编码、比特映射技术和联合编码调制等，多元域编码通过伽罗华域的运算和比特交织，从而使得链路在高信噪比条件下更容易逼近香农极限，并且增加分集效益。新的比特映射技术采用同心辐射状的幅度相位调制（APSK），能

够提高频谱利用效率。联合调制编码采用相位旋转等技术，使得链路在快衰信道下更加鲁棒。链路自适应包括基于无速率（Rateless）和码率兼容的，以及一些工程实现类的编码（如图14所示），可以通过对码字结构的优

化以及合理的重传比特分布，让调制编码方式更准确地匹配快衰信道的变化。网络编码利用无线传输的广播特性，捡拾节点之间无线传播中所含的有用比特信息，能够提高系统的吞吐量。

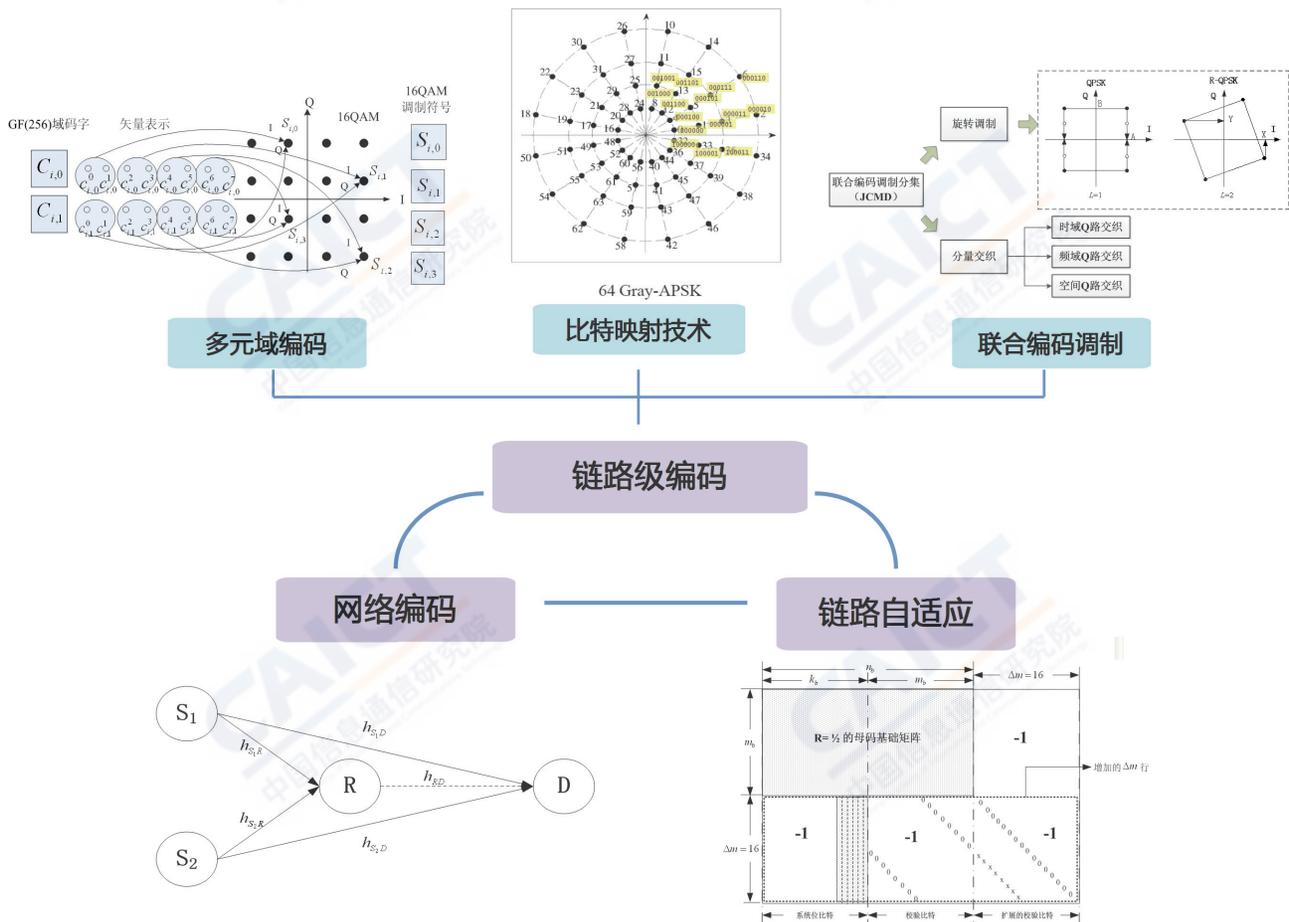


图14 新型调制编码的技术分类

(1) 链路级调制编码

多元域编码的设计目标是在与二元码解码复杂度相近条件下，获得更好的性能，目前多元LDPC和多元重复累积（RA）码被认为是比较具有应用前途的多元码。除了码结构本身，从

多元域到星座映射也是多元码链路的重要组成部分，直接影响性能。比特映射技术，如辐射状星座相比传统的QAM更趋近高斯分布，可以将这些新的星座设计与信道编码、接收器的先进解调算法综合考虑，进行联合编码调制。

例如超奈奎斯特调制的性能更加逼近香农容量界，其设计关键在于降低序列解调的复杂度和滤波器，目前业界已经提出一些次优解调算法，与最优解调算法相比，性能差别不大，但复杂度可以成倍地降低。在链路编码中，包编码是一种实现起来相对简单的技术，它通过异或运算将多个子码块的信息比特联系起来，可有效增强信道编码的鲁棒性。

(2) 网络编码

网络编码技术主要包括码字设计和系统设计。码字设计的目标是设计协作传输的效率更高，与各个分支链路信道条件相匹配的信道编码；系统设计的内容包括用户配对、路由选择和资源调度等。网络编码是与部署场景密切相关的，具体方案需要针对某一种场景进行优化，例如，协作中继和节点双向传输两种场景对空口标准的影响程度就有所不同。

(3) 链路自适应

链路自适应的理论研究主要是设计具有多种候选码率和码长的码字。在无速率码方面，前向堆栈译码算法可以大大简化Spinal码（其中的一类Rateless码）的接收器实现。在码率兼容类型码方面，LDPC的进一步优化可以实现更灵活的码率自适应和码长。链路自适应的工程实现中，采用软ACK/NACK可以提高传输效率，在缺乏准确信道信息反馈的情形下，以“无级变速”的方式与快衰信道相匹配。

图15是16元码与二元LDPC码在AWGN信道下的链路仿真性能比较。在BER=1%的工作

点，多元码的增益在0.5 dB左右。

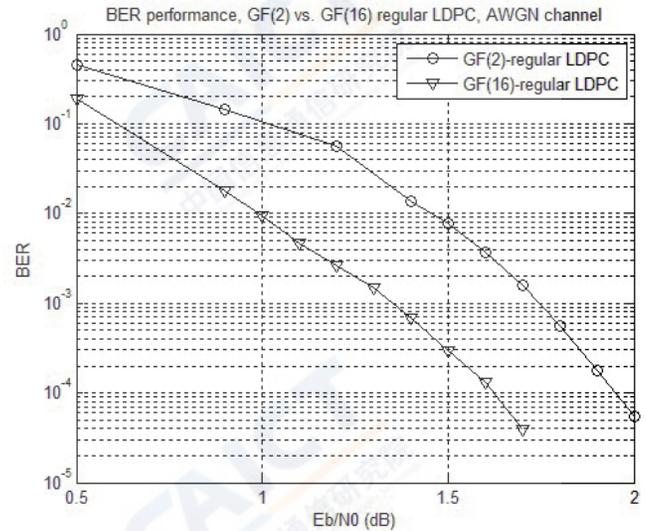


图15 16元码与二元LDPC码的链路性能比较

图16是APSK与QAM星座的链路仿真性能比较。在BER=0.01%的工作点，进一步优化的APSK(NE-APSK)相比QAM的性能增益在0.5~0.9 dB，调制阶数愈高，增益愈明显。

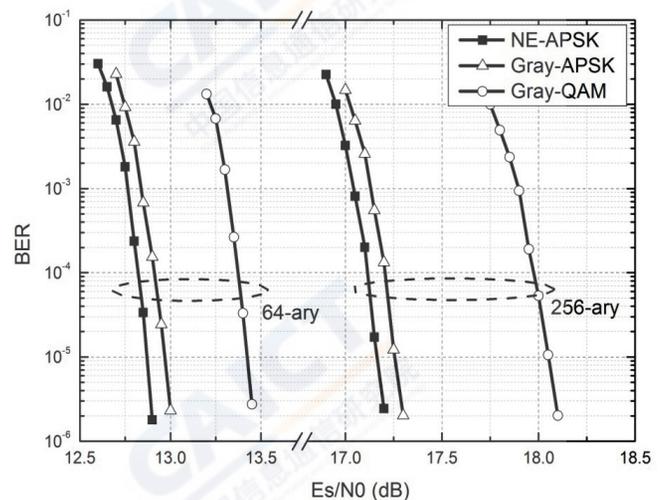


图16 APSK与QAM星座的链路性能比较

图17是含有中继的场景中，通过多个链路之间的网络编码以及合理的路由和用户配对，

系统仿真所得到的小区吞吐量的CDF曲线。

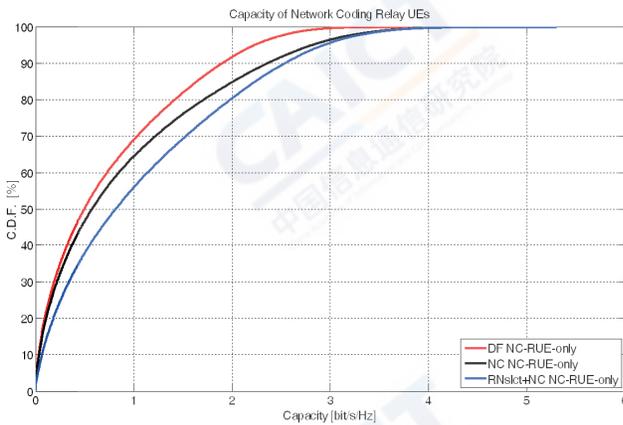


图17 网络编码和路由选择对系统吞吐量的增益

先进调制编码中的多种技术可以用于很多场景。多元LDPC码、新的比特映射技术和超奈奎斯特调制适合大带宽大数据传输，在高信噪比环境增益明显，较适于热点高容量场景。联合编码调制的旋转调制依靠多发射天线提高链路的鲁棒性，十分适合广域覆盖场景。网络编码可以加强多个节点之间传输的协作性，在超密集组网中将起到重要作用。

7. 终端直通技术

随着科技的发展，智能终端设备的种类日趋繁多，如手机、平板、可穿戴设备、智能电表、车辆等，这些设备可支持的无线通信能力也越来越强，除了传统的蜂窝通信（2G、3G、4G）之外，还可以借助于Wi-Fi、bluetooth、LTE-D2D等技术实现终端设备间的直接通信。而将两者协同融合，可以衍生出更多新的应用场景，并提升用户体验，如快速D2D应用于ITS

（Intelligent Transportation System，智能交通）的V2V/V2I（车车、车路）通信、多用户协作通信、数据共享网络、应用于物联网终端的低成本D2D等等。

VDC（Vehicle Direct Communication，车直接通信）：未来车联网不仅包括车与网络之间的远程通信，还包括车车、车路、车人（V2V、V2I、V2P，统称V2X）的频繁交互的短程通信。可利用广域蜂窝网提供车-网通信的远程通信服务；通过D2D增强的VDC方案提供短时延、短距离、高可靠的V2X通信，从而提供全面的车联网通信解决方案，VDC方案通过D2D与蜂窝网络的紧耦合，实现中心调度与分布式通信的完美结合，以满足V2X通信的苛刻需求。

终端协作通信：未来通信系统中，不仅网络侧可以相互协作，终端之间也可以相互协作。通过临近终端之间的短距离技术连接，终端之间可以协作互助，互相中转数据，这样就使得任一终端设备与基站间可有多条信道，当某一信道状况不好时，总可以选择其它更优的信道通信，从而进一步提升系统吞吐量，提高用户通信可靠性，带来更好的用户体验。

数据共享网络：在基站的控制/协助下，终端可自发组织建立起互相之间可直接进行数据传输的自组织网络，来进行数据业务的共享。通过终端间的直接数据转发，减轻网络侧负载，提升系统整体吞吐量。

低成本D2D：针对时延不敏感、成本敏感的物联网系统，可以采用分级接入的方式。这种系统中，物联网终端通过中继系统接入到蜂窝网络，通过物联网终端和中继终端之间的低成本D2D通信，降低物联网终端的成本，使得物联网更容易大规模普及应用。

关键问题及解决思路：

(1) V2X场景中，车车、车路、车人要频繁进行短距离广播通信，不断交互位置和速度等关键安全消息，以提升道路安全和交通效率。V2X安全消息对于时延和可靠性均有较高的要求，通常而言，安全消息的传播时延需要控制在100ms以下，可靠性方面需要确保较高的包递交率和包接收率。通过增强的D2D通信、基站统一协调和资源集中分配，可以减轻V2X消息在资源上的碰撞，进而提高消息传输的可靠性。另一方面，考虑到数据传输过程的时延要求，需要优化调度交互过程，减少终端与网络的交互复杂性。

(2) 多用户协作通信场景中，终端在网络的控制下，进行配对、建立协作关系等控制面操作。在通信过程中，任何一个终端对网络都是可管可控可清晰计费的。这需要在终端与网络的协议栈设计上，加入新的分流合并协议层，使得网络可以根据不同终端的信道质量，总是选择最佳信道，将数据传递给当时信道质

量最佳的终端，该终端再根据数据归属，将数据转发给目的终端。

(3) 数据共享网络场景中，在功率受限的前提下，终端间通信的传输距离较短，可利用网络编码的方法，通过合并多个链路的信息来提高等效信噪比。另外，考虑到终端可能一直处于移动中，与其它终端间的链路情况总是处于变动之中，一旦拓扑发生变化，终端需及时上报基站，在发生业务时，基站根据掌握的拓扑信息进行路径选择，以保证业务连续性。

(4) 低成本D2D场景中，进行低成本、低功耗的物联网终端和中继终端设计，通过低成本D2D连接模式，代替物联网终端直连蜂窝网络的模式，同时满足网络对物联网终端的可管可控可计费及安全需求，以满足物联网抄表、可穿戴等应用的普及推广。

8. 灵活双工

随着在线视频业务的增加，以及社交网络的推广，未来移动流量呈现出多变特性：上下行业务需求随时间、地点而变化，现有通信系统采用相对固定的频谱资源分配方式，无法满足不同小区变化的业务需求。灵活双工能够根据上下行业务变化情况动态分配上下行资源，有效提高系统资源利用率。灵活双工技术可以应用于低功率节点的小基站，也可以应用于低功率的中继节点。

灵活双工可以通过时域和频域的方案实现。在FDD时域方案中，每个小区可根据业务量需求将上行频带配置成不同的上下行时隙配比；在频域方案中，可以将上行频带配置为灵活频带以适应上下行非对称的业务需求，如图18所示。同样的，在TDD系统中，每个小区可以根据上下行业务量需求来决定用于上下行传输的时隙数目，实现方式与FDD中上行频段采用的时域方案类似。

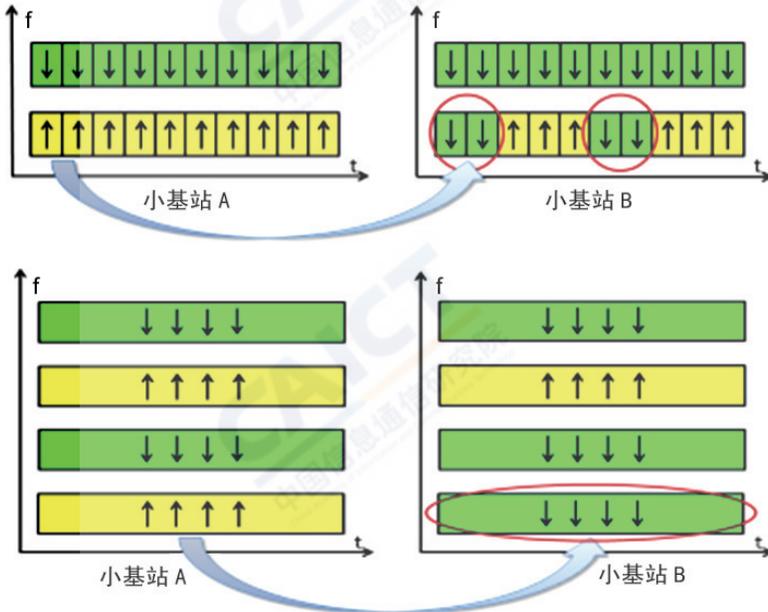


图18 时域及频域的灵活资源分配

灵活双工的主要技术难点在于不同通信设备上下行信号间的相互干扰问题。这是因为在LTE系统中，上行信号和下行信号在多址方式、子载波映射、参考信号谱图等多方面存在差异，不利于干扰识别和删除，因而，上下行信号格式的统一对灵活双工系统性能提升非常关键。对于现有的LTE系统，可以调整上行或下行信号实现统一格式，如采用载波搬移、调整解调参考信号谱图或静默等方式，再将不同小区的信号通过信道估计、干扰删除等手段进行分离，从而有效解调出有用信息。而未来的5G系统很可能采用新频段和新的多址方式等，上下行信号将进行全新的设计，可根据上下行信号对称性原则来设计5G的通信协议和系统，从而将上下行信号统一，那么上下行信号间干扰自然被转换为同向信号间干扰，再应用现有的干扰删除或干扰协调等手段处理干扰信号。上下行对称设计要求上行信号与下行信号在多方面保持一致性，包括子载波映射、参考信号正交性等方面的问题。

此外，为了抑制相邻小区上下行信号间的

互干扰，灵活双工将采用降低基站发射功率的方式，使基站的发射功率达到与移动终端对等的水平。未来宏站将承担更多用户管理与控制功能，小站将承载更多的业务流量，而且发射功率较低，更适合采用灵活双工。

图19和图20分别给出了密集小站部署场景下上行信号和下行信号的小区平均吞吐量。仿真中设置每个小区簇内有4个小站，其中，2个小站以上行业务为主、另2个小站以下行业务为主。结果对比了采用前面所述方法将异向信号干扰转换为同向信号干扰前后系统吞吐量变化情况。无IC表示由于未引入前述方法而导致无法删除异向干扰信号的情况，IC-1、IC-2分别表示删除异向干扰信号的数目为1、2。可以看出通过干扰删除辅助可有效消除异向信号带来的干扰，尤其是对上行仿真结果有很好的性能提升。另外，仿真结果表明删除2个异向干扰即可以得到较好的结果，这是因为各小区簇间存在一定距离，其他小区簇对本簇内小区的干扰较小，实际中可仅考虑处理本簇内其他小区的信号，而忽略其他小区簇的干扰，这有助于降低接收机的复杂度及计算量。

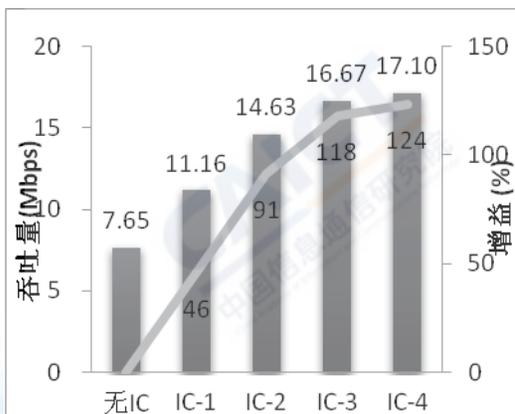


图19 小区上行吞吐量

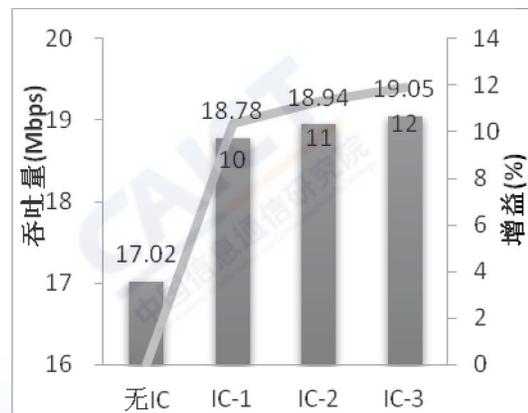


图20 小区下行吞吐量

虽然目前灵活双工可能受到频谱管理规则的限制，但如果能够通过技术手段控制灵活双工对其他系统的干扰，并且灵活双工技术所带来的增益被认可，未来申请规则的改变是可能的。因而，面对当前无线移动宽带业务对网络性能要求提升的挑战，进一步研究灵活双工技术的难点及应用场景，推进灵活双工技术成熟发展，促进产业升级是十分必要的。

灵活双工顺应了当前TDD&FDD融合的趋势，具有很好的业务适配性，不仅适用于5G，也适用于4G增强技术。同时，灵活双工的设计也可以应用于全双工系统，具有很好的前向兼容性。

9. 全双工

无线通信业务量爆炸式增长与频谱资源短缺之间的外在矛盾，驱动着无线通信理论与技术的内在变革。提升FDD与TDD的频谱效率，并消除其对频谱资源使用和管理方式的差异性，成为未来移动通信技术革新的目标之一。基于自干扰抑制理论和技术

的全双工技术成为实现这一目标的潜在解决方案。理论上讲，全双工可提升一倍的频谱效率。

全双工的主要研究内容分为两个方面：

(1) 全双工系统的自干扰抑制技术

从设备层面来看，全双工的核心问题是本地设备自己发射的同时同频信号（即自干扰）如何在本地接收机中进行有效抑制。涉及的通信理论与工程技术研究已在业界全面展开，目前形成了空域、射频域、数字域联合的自干扰抑制技术路线，20MHz带宽信号自干扰抑制能力超过了115dB。空域自干扰抑制主要依靠天线位置优化、空间零陷波束、高隔离度收发天线等技术手段实现空间自干扰的辐射隔离；射频域自干扰抑制的核心思想是构建与接收自干扰信号幅相反的对消信号，在射频模拟域完成抵消，达到抑制效果；数字域自干扰抑制针对残余的线性和非线性自干扰进一步进行重建消除。

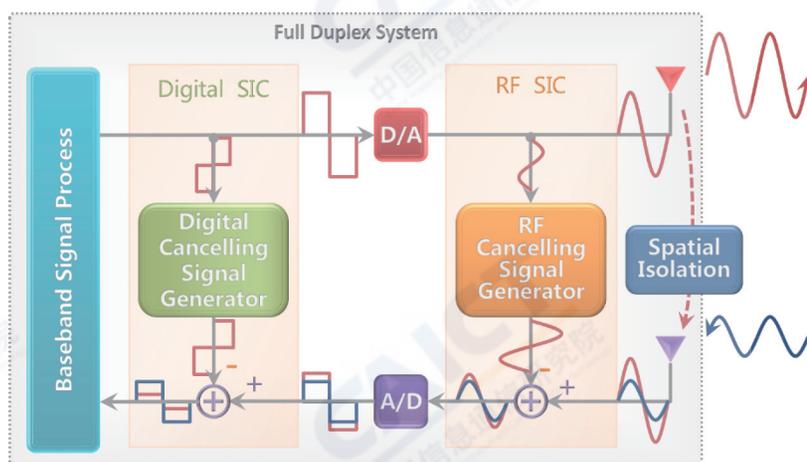


图21 全双工工作原理

(2) 全双工系统的组网技术

从组网层面来看，全双工释放了收发控制的自由度，改变了网络频谱使用的传统模式，将会带来网络上用户的多址方式、无线资源管理等技术的革新，需要与之匹配高效的网络体系架构。业界普遍关注和已经初步研究的方向包括：全双工基站与半双工终端混合组网的架构设计、终端互干扰协调策略、全双工网络资源管理、全双工LTE的帧结构等。

以全双工基站与FDD半双工终端组网为例：

用户1分配编号为*i*的频率对*f*₁和*f*₂，分别用于上下行；而用户2反向使用这对频点(上行用*f*₂，下行用*f*₁)，频率编号记为-*i*，若能避免反向频率复用可能造成的终端间干扰，则频谱使用效率比原来增加一倍。从基站侧来看，同时收发*f*₁和*f*₂上的信号，需要具备全双工自干扰抑制能力；从用户侧来看，以区域划分的方式来协调避免终端间干扰是一种可行的方法，图中以9对频点反向复用为例，将特定空间划分成9个区域，并为每个

区域分配了特定频率对；理论分析和仿真结果表明：随着用户数的增加，频率被反向复用的概率增加，全双工载波利用率相对半双工提升明显；此外，在干扰容限允许的条件下，空间大粒度区域划分(图中*P*代表了区域数量)更有利于全双工网络频谱效率的增加。

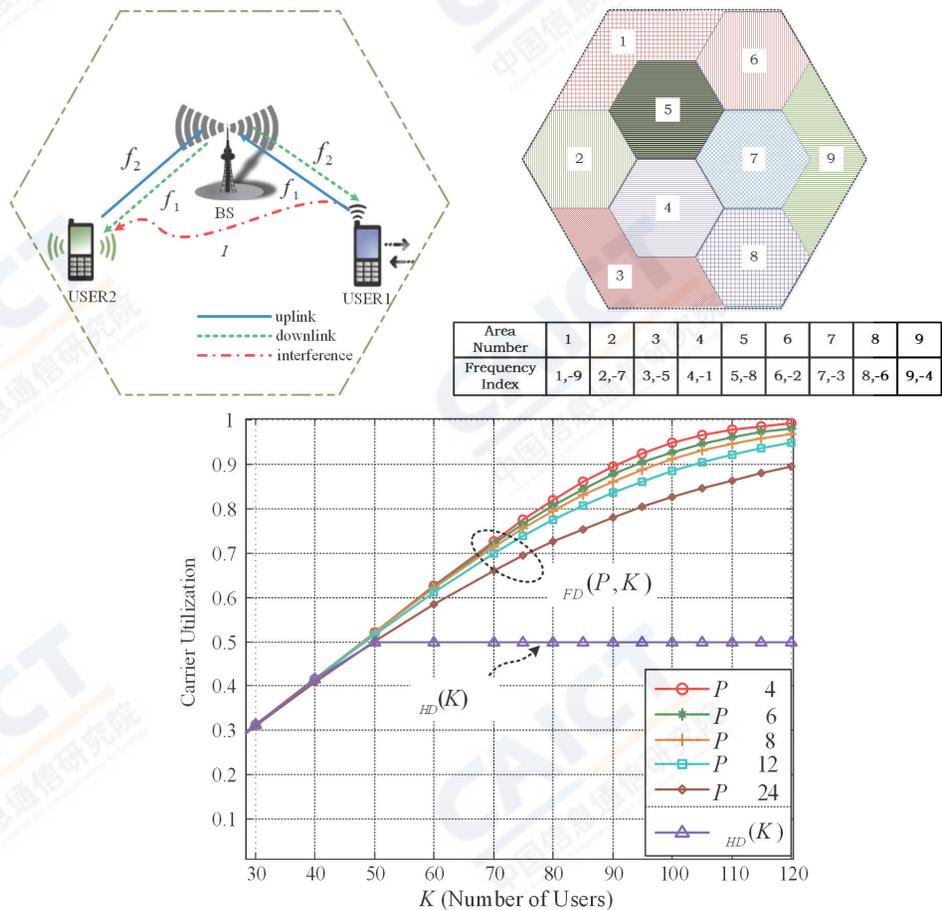


图22 性能仿真结果

全双工技术的实用化进程中，尚需解决的问题和技术挑战包括：大功率动态自干扰信号的抑制，多天线射频域自干扰抑制电路的小型化，全双工体制下的网络新架构与干扰消除机制，与FDD/TDD半双工体制的共存和演进路线等。

总的来看，全双工最大限度地提升了网络和设备收发设计的自由度，可消除FDD和TDD差异性，具备潜在的网络频谱效率提升能力，适合频谱紧缺和碎片化的多种通信场景，有望在室内低功率低速移动场景下率先使用，由于复杂度和应用条件不尽相同，各种场景的应用需求和技术突破需要逐阶段推进。

10. 频谱共享

为了满足5G超高流量和超高速率需求，除尽力争取更多IMT专用频谱外，还应进一步探索新的频谱使用方式，扩展IMT的可用频谱。在5G中，频谱共享技术具备横跨不同网络或系统的最优动态频谱配置和管理功能，以及智能自主接入网络和网络间切换的自适应功能，可实现高效、动态、灵活的频谱使用，以提升空口效率、系统覆盖层次和密度等，从而提高频谱综合利用效率。

在频谱共享技术中，重点场景包括运营商内RAT间的频谱共享、运营商间频谱共享、免授权频段的频谱共享、次级接入频谱共享等。其中：

- 运营商内RAT间频谱共享的目标频段可以是5G新增频段或现有IMT频段。共享频谱

的多RAT可以基于共站址宏站，也可以是宏站之间或宏站和小站之间。该场景可配合运营商现有的基础载波进行聚合使用。

- 运营商间频谱共享主要针对未发牌的IMT已规划频段。多个运营商可以对热点区域进行小站间的同覆盖，或者是小站与宏站间的同覆盖。
- 免授权频段的频谱共享针对2.4GHz和5GHz等频段，涉及到的站型主要为小站与目标频段上的WiFi之间共享，并且可以与宏站覆盖的低频载波联合部署。
- 次级接入频谱共享针对其它系统（如卫星、广播、雷达等）的授权频段，IMT系统站点经由数据库管理和授权，或者基于频谱感知技术占用频谱。

频谱共享技术中需要解决的关键问题及思路主要包括：

(1) 网络架构与接口

修改网络架构，以集中式架构为主，结合分布式架构，设计新增节点的接口和共享节点间的接口。在现有共享节点之上新增高级频谱管理节点，用于维护管理共享资源池、获取共享节点的需求申请、执行频谱分配决策。各共享节点进行测量和需求统计，并接收频谱分配结果，执行节点内的资源重配置。在架构中涉及数据库技术，如频谱地图生成与管理、注册鉴权、信道分配、学习机制等。

(2) 高层技术

研究频谱共享的高层技术，解决频谱共享导致的频谱资源动态变化和优先级网络共存问题。基于不同系统架构，研究对于所获取的大量零散频谱资源进行高效分析与管理、多共享节点间的频谱最优与公平协商、基于预测和代价分析等的频谱切换、接入控制、跨层设计等，并分析对现有的网络接入、业务流管理、移动性等流程的影响。

(3) 物理层技术

研究频谱共享的物理层技术，通过频谱检测等方式获得频谱使用状况，设计测量与反馈机制、信道和参考信号等，实现结果上报和频谱资源的配置与使用，研究基于主动干扰认知等方式的干扰管理，适应频谱共享带来的干扰环境变化。结合认知网络技术，分析可能的多址方式。

(4) 射频技术

对于射频技术，在多模多频芯片成为市场主流的情况下，分析面向未来的支持频谱共享技术的新型射频，能够支持更广的频率范围，在多通道同时工作时有效处理互干扰，能支持灵活带宽的射频，支持在相同频谱中接入不同系统时的灵活调制，以及通过多路检测或压缩感知等方式的宽频谱检测等功能，寻求射频参考结构与参数。

此外，还包括共享频谱的系统间共存、各场景下的组网方案设计、多系统整合带来的安全性技术问题等。

对于运营商间频谱共享的初步仿真，采用室内小小区密集组网场景，假设在3-6GHz频段，

选择180MHz连续带宽，用于多运营商共享。评估场景的拓扑为3GPP TR36.814的室内热点6层建筑dual stripe场景，业务模型为burst业务，包大小8Mbytes，包到达率0.5-2.5。所对比的频谱分配方案为独占式和共享式，其中独占是指3个运营商各独占使用60MHz带宽，共享是指3个运营商共享全部180MHz频谱，且用户选择签约运营商基站接入。

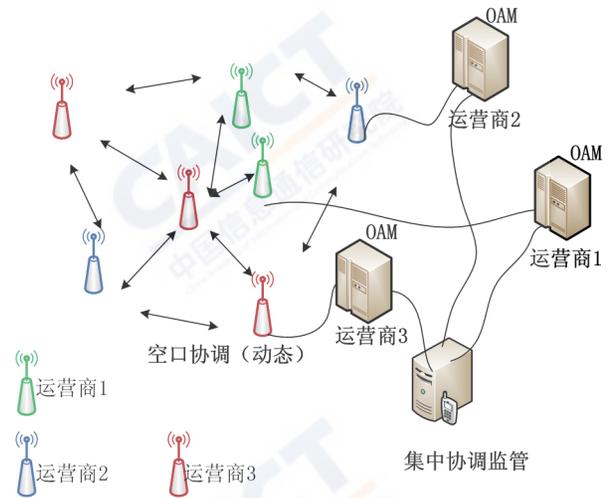


图23 评估场景拓扑示意图

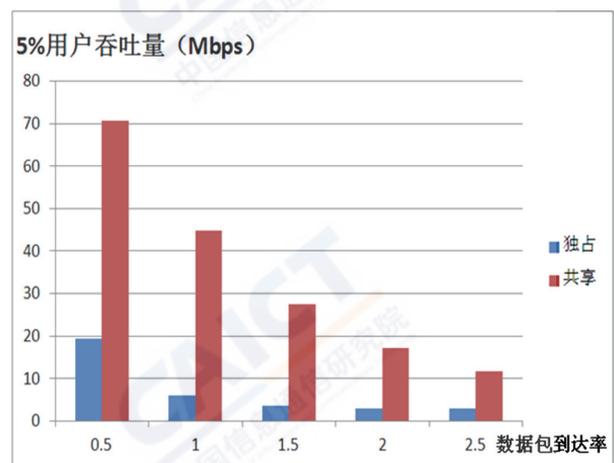


图24 性能仿真结果

从仿真结果来看，共享后的吞吐量远大于每个运营商独占频谱的吞吐量之和。尤其对于边缘

用户，大大增加了用户的可接入频谱，体验速率提升3-8倍。共享使用180MHz带宽，边缘用户体验速率在负载90%时仍然能够达到12Mbps。

频谱共享技术通过解决多种重点场景（运营商内、运营商间、免授权频段、次级接入）的系统架构、接口、空口技术、干扰管理等多项技术问题，能够推进新型的频谱管理理念，促进现有网络能力提升，兼容载波聚合、数据库、无线资源管理等无线技术。同时，能够充分结合其它5G关键技术，以动态网络频谱管理支撑超密集网络覆盖，可联合使用现有IMT频段和高频段来满足5G大频谱需求。从而，提升运营商总频谱资源使用效率，解决多RAT间和多小区间的负载均衡，

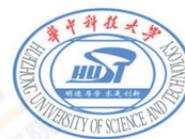
提升用户体验速率，缓解运营商频谱过饱和或过闲置，扩展IMT可用频谱，对5G在广域覆盖和热点覆盖场景的指标方面具有重大意义。频谱共享技术需要频谱管理政策的支持，制定新型使用规则、安全策略、经济模型等，并对基带算法与器件能力具有较高要求。从目前的研究趋势来看，频谱共享技术是5G的重要组成部分，具有很好的应用前景。

总结

5G将基于统一的空口技术框架，沿着5G新空口（包含低频和高频）及4G演进两条技术路线，依托新型多址、大规模天线、超密集组网和全频谱接入等核心技术，通过灵活的技术与参数配置，形成面向连续广域覆盖、热点大容量、低时延高可靠和低功耗大连接等场景的空口技术方案，从而全面满足2020年及未来的移动互联网和物联网发展需求。

IMT-2020(5G)推进组愿与全球5G相关组织、企业、科研机构 and 高校加强合作，共同推动5G无线技术架构尽快达成共识，促进5G标准及后续产业的发展。

主要贡献单位



CAICT
中国信息通信研究院

CAICT
中国信息通信研究院

CAICT
中国信息通信研究院

CAICT
中国信息通信研究院

CAICT
中国信息通信研究院

CAICT
中国信息通信研究院

IMT-2020

联系方式

电话: +86-10-62300182

邮箱: imt2020@catr.cn

COPYRIGHT © 2015 IMT-2020 (5G) PROMOTION GROUP.
ALL RIGHTS RESERVED.