



5G 网络上行覆盖增强研究

胡煜华, 王鑫炎, 李贝

(中国联合网络通信有限公司浙江省分公司, 浙江 杭州 310051)

摘要: 当前 5G 网络频段多为高频段, 带宽资源丰富, 但路径损耗、穿透损耗较高, 上行覆盖相对较弱, 如果引入低频段资源进行上行传输, 高、低频载波协同有助于提升上行覆盖。结合频谱特性及行业现状, 分析 2.1 GHz 和 3.5 GHz 等频段的链路预算和覆盖性能, 比较上行覆盖增强的 3 种方案, 并对载波聚合方案的优势和限制进行了具体分析, 结果表明载波聚合方案是 5G 网络上行覆盖增强的优化解决方案。

关键词: 5G; 上行覆盖增强; 载波聚合

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021148

Research on uplink coverage enhancement of 5G network

HU Yuhua, WANG Xinyan, LI Bei

Zhejiang Branch of China United Network Communications Co., Ltd., Hangzhou 310051, China

Abstract: The 5G network frequency band is mostly high frequency band, which is rich in bandwidth resources, but the path loss and penetration loss are high, and the uplink coverage is relatively weak. If the low frequency band resources are introduced for uplink transmission, the cooperation of high and low frequency carriers will help to improve the uplink coverage. The link budget and coverage performance of 2.1 GHz and 3.5 GHz bands were analyzed, three uplink coverage enhancement schemes were compared, and the advantages and limitations of carrier aggregation scheme were analyzed. The result shows that carrier aggregation scheme is the optimal solution for 5G network uplink coverage enhancement.

Key words: 5G, uplink coverage enhancement, carrier aggregation

1 引言

作为新一代数字化基础设施, 5G 网络已进入大规模建设和商用阶段, 3.5 GHz 作为 5G 网络部署的主力频段, 相较于 3G/4G 网络普遍使用的 1.8 GHz、2.1 GHz 等频段, 带宽资源更加丰富, 但由于路径损耗、穿透损耗相对较高, 上下行覆盖差异明显, 上行覆盖受限。5G 网络在垂直行业

不断融合应用, 要求更高的上行速率和更低的时延, 采用单一的 3.5 GHz 频段部署单层网, 难以完全满足多元化业务发展、提升用户体验的需求。结合各频段频谱特性, 利用 2.1 GHz 等低频频段增强 5G 网络上行覆盖, 能够实现 5G 网络覆盖和性能的提升。

2 5G 频谱资源

频谱是移动通信领域的核心资源, 3GPP 标准

定义的5G NR (new radio) 频谱主要包括 sub-6 GHz (410~7 125 MHz) 和毫米波 (24 250~52 600 MHz), 分散在多个频段, 分为频分双工 (frequency division duplex, FDD)、时分双工 (time division duplex, TDD)、补充上行链路 (supplementary uplink, SUL) 等多种模式。目前商用 5G 网络主要使用了 TDD 模式 3.5 GHz、2.6 GHz 频段, 与 4G FDD 网络使用的 1.8 GHz、2.1 GHz 等频段相比, 有大带宽优势, 并且低路径损耗条件下单用户峰值速率明显高于 4G, 但是穿透损耗较高, 商用 5G 网络上下行时隙配比为 3:7、1:4 或 2:8, 上行可用时隙占比比较低, 存在上行带宽、上行覆盖、传输时延等方面的挑战。

2.1 TDD 模式上下行带宽结构

TDD 模式采用时分双工方式传输, 上行和下行使用相同频率, 国内 NR 3.5 GHz 频段上下行时隙配比为 3:7 (30%时隙用于上行, 70%时隙用于下行), 在下行时隙终端无法发射数据, 按照 100 MHz 频谱带宽, 用于上行的带宽只有 30 MHz, 只是 4G 单载波的 1.5 倍, 上行带宽相比 4G 网络优势并不明显。图 1 是 2.5 ms 双周期、5 ms 单周期两种典型 TDD NR 帧结构上行占比情况。

2.2 上下行链路预算

根据无线信号自由空间路径损耗公式可知, 频率越高, 空间传播损耗越大, 覆盖距离越短。NR 3.5 GHz 频段带宽大, 采用典型帧结构时, 下

行时隙占比高, 由于 TDD 最大支持 8 个 SSB (同步信号和 PBCH 块), 而 FDD 最大支持 4 个 SSB, NR TDD 3.5 GHz 阵面覆盖会比 NR FDD 2.1 GHz 阵面覆盖大 3 dB, 所以 NR TDD 3.5 GHz 下行覆盖距离与 NR FDD 2.1 GHz 下行覆盖距离基本相当, 但上行时隙占比低, 上行能力有限, 上行覆盖是采用 3.5 GHz 频率的瓶颈。以 2.6 GHz 为基准点, 分别计算 2.1 GHz 和 3.5 GHz 频段上行链路预算理论值, 预算结果表明, 以 NR TDD 2.6 GHz TDD 为基准, NR TDD 3.5 GHz 上行损耗高于基准 5.6 dB, NR FDD 2.1 GHz 上行损耗低于基准 3.2 dB。上行链路预算理论值见表 1。

链路预算理论值是自由空间的传播损耗, 在非自由空间的情况下, 虽然 5G 网络中引入了大规模 MIMO 等先进技术, 缩小与中低频段在传播损耗上的差异, 但 3.5 GHz 频段的覆盖能力仍弱于传统低频段。实际网络中考虑建筑物墙壁等的穿透损耗等, 低频段的覆盖优势更加明显。穿透损耗测试数据见表 2。

2.3 TDD 模式传输时延

TDD 模式下, 数据收发采用相同的频点, 基站与终端通过时间来区分上下行, 上下行数据需要等对应的上下行时隙到来才能被调度, 对于 NR TDD 3.5 GHz 频段上下行时隙配比双周期 3:7, 假设数据随机到达, 上行会增加等待 0~4 时隙, 平均等待 0.8 ms; 下行会增加等待 0~2 时隙, 平均等待 0.2 ms。

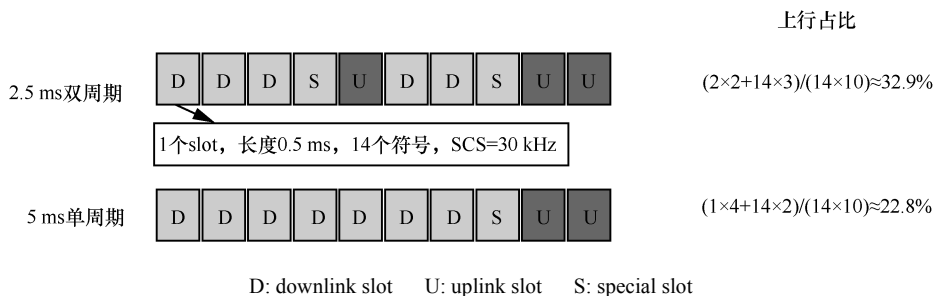


图 1 两种典型 TDD NR 帧结构上行占比情况



表 1 上行链路预算理论值 (单位 dB)

关键参数	5G NR TDD (sub-6 GHz)		5G NR FDD (sub-3 GHz)
	2.6 GHz 64T64R 160 W	3.5 GHz 64T64R 320 W	2.1 GHz 20Mbit/s 4T4R 4×20 W
穿透损耗	基准	3	-1
OTA+人体损耗	基准	0	0
馈线损耗	基准	0	0.5
UE 发射功率	基准	0	0
UE 噪声系数	基准	0	0
上行自由空间损耗	基准	2.6	-2.7
上行干扰余量	基准	0	0
上行总差异	基准	5.6	-3.2

表 2 穿透损耗测试数据 (单位 dB)

关键参数	5G NR TDD (sub-6 GHz)		5G NR FDD (sub-3 GHz)
	2.6 GHz 64T64R 160 W	3.5 GHz 64T64R 320 W	2.1 GHz 20 Mbit/s 4T4R 4×20 W
雨衰	基准	0	0
植被损耗	基准	0	0
砖墙穿透损耗	基准	1~3	-2~-1
混凝土墙穿透损耗	基准	2	-3
石膏板墙穿透损耗	基准	1~2	-1
玻璃墙穿透损耗	基准	1~2	-2~-1
薄木门穿透损耗	基准	2	-1

3 上行覆盖增强方案对比与仿真

为加快 5G NR 部署, 初期采用 4G 和 5G 共站策略, 但是由于频段高、上行时隙占比低, 使得 5G 的上行覆盖弱于 4G, 出现 5G 覆盖不连续的情况。为了解决 5G 在高频段部署时由于高路损带来的覆盖问题, 引入部分低频段资源进行上行传输, 通过高、低频载波协同提升上行覆盖能力。

3.1 上行覆盖增强方案

为增强上行覆盖, 补充上行链路 SUL、超级上行、载波聚合是目前利用多个频段协同组网的解决方案。

3.1.1 补充上行链路方案

补充上行链路 SUL 技术是一种单小区双上行链路技术, 补充一个处于低频段的上行链路来保证上行覆盖, 同一个小区内配置一个 DL 频段(NR 频段)和 2 个上行频段 (NR 频段+SUL 频段)。SUL 频段只有上行, 不能单独使用, 和 FDD-NR 频段的上行定义完全相同。

如图 2 所示, 下行数据在 NR TDD 3.5 GHz 传输, 下行没有 FDD 链路, 在上行覆盖良好时, 终端采用 NR 载波进行数据发送, 当超出 NR 上行载波覆盖时, 终端采用 SUL 载波发送上行数据。终端在 NR 和 SUL 之间动态选择上行链路, 同一个时刻终端只能选择其中的一条发送。

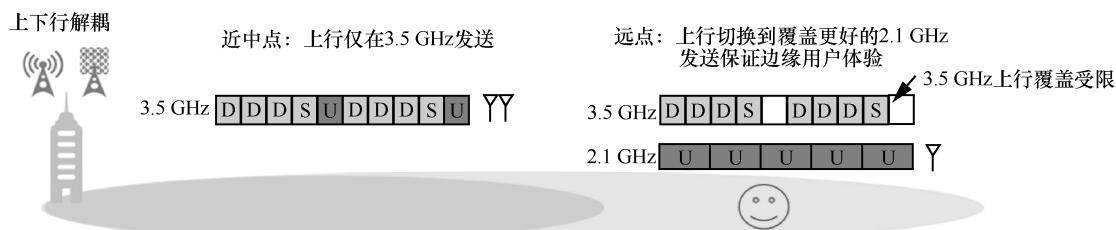


图2 补充上行链路技术原理

3.1.2 超级上行方案

超级上行利用 NR FDD 增强上行覆盖、体验及容量。FDD 频段低，覆盖能力强，频分双工方式传输无额外等待时延，但传输带宽较小；TDD 频段带宽大，上下行均使用成熟应用的 MIMO 技术，在相同的子载波间隔前提下，覆盖和时延方面比 FDD 弱。超级上行技术实现 FDD NR 和 TDD NR 上行轮发，如图 3 所示，在近中点，3.5 GHz NR 发送下行数据时刻，调度终端使用 FDD 上行频谱发送数据，实现 FDD 上行时隙和 TDD 上行在时域的互补，从而提升上行链路吞吐率；远点 3.5 GHz NR 上行受限，终端只使用 FDD 上行频谱发送数据。

3.1.3 载波聚合方案

载波聚合（carrier aggregation, CA）技术把不同频段或相同频段的频谱资源聚合起来使用提升资源利用率，即通过 FDD+TDD 载波聚合实现

时域+频域聚合、高频+低频聚合、吞吐率最大化，上下行均可利用两个频段选择性发送，平均时延降低，满足 2B 类业务低时延需求。如图 4 所示，载波聚合方案把 FDD 和 TDD 频谱在时域和频域上协同，终端在小区中心利用 FDD+TDD 频谱同时进行上下行传输，在小区边缘把上行切换到 FDD 提升上行覆盖，下行保持 FDD+TDD 聚合。5G 终端能力起步高，上行支持双发，具备上行跨频段载波聚合条件。

在协议支持方面，3GPP R15 规范已经支持 FDD 700 MHz（n28）、900 MHz（n8）、1.8 GHz（n3）与 TDD 3.5 GHz（n78）的载波聚合；3GPP R16 规范增加支持 FDD 850 MHz（n5）、2.1 GHz（n1）与 TDD 3.5 GHz（n78）的载波聚合。

3.2 上行覆盖增强方案对比分析

5G 商用对网络的性能提出了越来越高的要

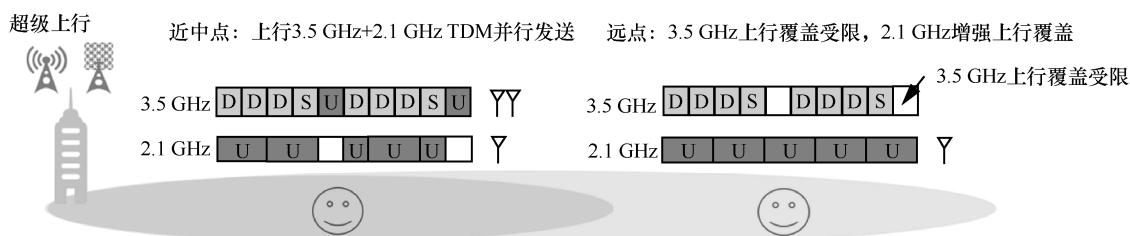


图3 超级上行技术原理

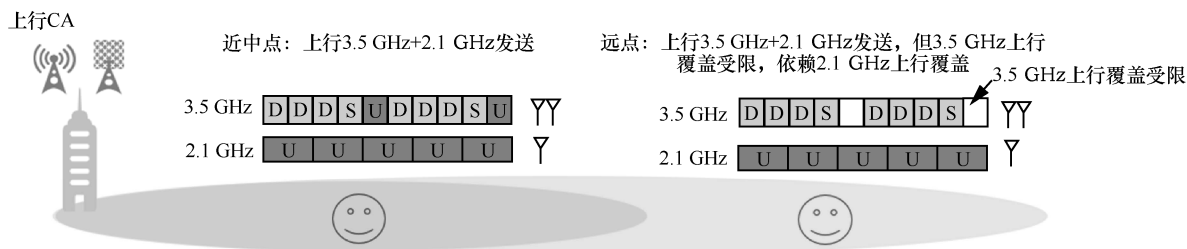


图4 载波聚合技术原理



求, 上行增强技术需要支持多个频段、多个站点之间的灵活调度和协同能力。补充上行链路(SUL)由于采用了 NR 和 SUL 频段之间的紧耦合能力, 要求 SUL 和 NR 组成同一个小区, 不支持跨站跨小区。超级上行需要 3.5 GHz 与 2.1 GHz 共扇区并严格共工参, 不支持跨站跨小区。CA 架构下, TDD 与 FDD 解耦, 可各自独立组网。CA 增强上行覆盖同时提升上、下行速率; 超级上行增强上行覆盖, 提升上行速率; 补充上行链路 SUL 载波只增强上行覆盖, CA 方案具有一定的优势。

3 种方案比较见表 3, 其中, 场景 A 是小区中心, 场景 B 是小区边缘。

3.3 仿真评估

通过 Atoll 软件进行 TDD 单载波与 FDD+TDD 载波聚合仿真实验, 仿真场景见表 4。

定义参考信号接收功率 (reference signal receiving power, RSRP) 强度 -75 dBm 为近点, 强度 -105 dBm 为远点, 峰值速率和覆盖半径仿真结果见表 5, 载波聚合对覆盖半径和上、下行速率均有明显提升。

表 3 3 种方案比较

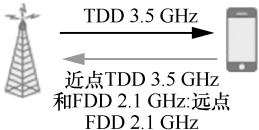
	超级上行	SUL	CA
技术方案			
UL MIMO	A: FDD 1 流 或 TDD 2 流 B: FDD 1 流	A: TDD 2 流 B: FDD 1 流	A: FDD 1 流 + TDD 2 流 B: FDD 1 流
DL MIMO	A: TDD 4 流 B: TDD 1~2 流	A: TDD 4 流 B: TDD 1~2 流	A: FDD 2 流 + TDD 4 流 B: FDD 1 流 + TDD 1~2 流
性能对比	上行覆盖增强; 上行峰值速率提升; 下行峰值速率不变; 不支持跨站跨小区	上行覆盖增强; 上行峰值速率不变; 下行峰值速率不变; 不支持跨站跨小区	上行覆盖增强; 上行峰值速率提升; 下行峰值速率提升; 支持跨站跨小区组网

表 4 仿真场景

NR 双工模式	TDD	FDD
中心频点	3 450.2 MHz	2 120MHz
带宽	100 MHz	20 MHz
HARQ	开启	开启
功率控制	开启	开启
自适应调制编码	开启	开启
时隙配比	7:3	1:1
CP 类型	Normal CP	Normal CP
上行调制方式	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM
下行调制方式	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM

表 5 仿真结果

项目		性能目标 (FDD 为主载波)	
		TDD 3.5 GHz	CA
下行峰值速率/(Mbit·s ⁻¹)	近点 (-75 dBm)	1 460	1 680
	远点 (-105 dBm)	270	345
上行峰值速率/(Mbit·s ⁻¹)	近点 (-75 dBm)	380	439
	远点 (-105 dBm)	31	41
上行覆盖半径/m	上行 1 Mbit/s	331	412
	上行 3 Mbit/s	249	310
	上行 5 Mbit/s	217	271

4 载波聚合方案优势和限制

上行增强技术需要支持多个频段、多个站点之间的灵活调度和协同能力。载波聚合能提升 5G 上行覆盖能力、降低时延、提升上下行容量。

4.1 扩展网络覆盖

在高路损场景，上行方向 FDD 覆盖距离好于 TDD，而在下行方向，TDD 载波的波束成形、大功率和大带宽优势可以继续维持服务，FDD 为 CA 主载波，可弥补 TDD 上行不足。终端同时连接 FDD 和 TDD 两个载波，在小区边缘上行传输切换到覆盖更好的 FDD 载波上，下行保持 TDD 载波大带宽。以 2.1 GHz 和 3.5 GHz 双载波为例，终端在 3.5 GHz 上行覆盖边缘时可切换到 2.1 GHz，上行传输时隙比单 3.5 GHz 增加 2.3 倍，而下行可用带宽比 2.1 GHz 多 2.5 倍。协同后产生“1+1>2”的收益。

4.2 提升网络容量

FDD+TDD 载波聚合上行采用轮发方式，在 TDD 上行时隙终端双发全部用于 TDD 2×2 MIMO 传输，而在 TDD 下行时隙切换到 FDD 进行上行传输，快速切换机制使上行方向保持 TDD 2×2 MIMO 能力，可用时隙提升到接近 100%。以 2.1 GHz 20 Mbit/s 和 3.5 GHz 100 Mbit/s 双载波为例，终端上行带宽可提升 23%，终端下行带

宽可提升 28%。如果 2.1 GHz 频段能够使用 50 Mbit/s 带宽，则上下行提升空间可进一步扩大到 58%和 71%，容量提升明显。

4.3 降低网络时延

终端可利用 FDD 和 TDD 两个载波选择性收发，随时都有可用的发射时隙，无须额外等待，能降低传输时延。如图 5 所示，以上行为例，3.5 GHz TDD 单载波的上行平均传输时延约为 2.2 ms，采用载波聚合技术后假设数据包随机到达，部分数据包（如 3.5 GHz 载波上第 1、2、5、6、10 时隙）到达后，不需要在 3.5 GHz 的上行时隙发送，而是转接到 2.1 GHz FDD 最近的上行时隙进行发送，普遍等待时延能减少 1~3 个时隙，平均可减少 0.7 ms，可降低到 1.5 ms，降幅达 31%。同等带宽条件下，时延和业务速率成反比，时延降低后端到端业务速率会得到提高，从而提升业务体验。

4.4 FDD+TDD 协作灵活

FDD 和 TDD 各自都能独立组网，载波有独立的上下行链路，能广播和支持终端直接接入，测量和功控等闭环操作完备，因此可应用于扇区间和站间，不要求 FDD 和 TDD 载波共站或者共工参，组网上有很大的灵活性。

如图 6 所示，每个终端都可以同时测量多个 FDD 和 TDD 邻区载波信号，每个 FDD 载波都可以与多个 TDD 载波同时进行载波聚合，每个 TDD

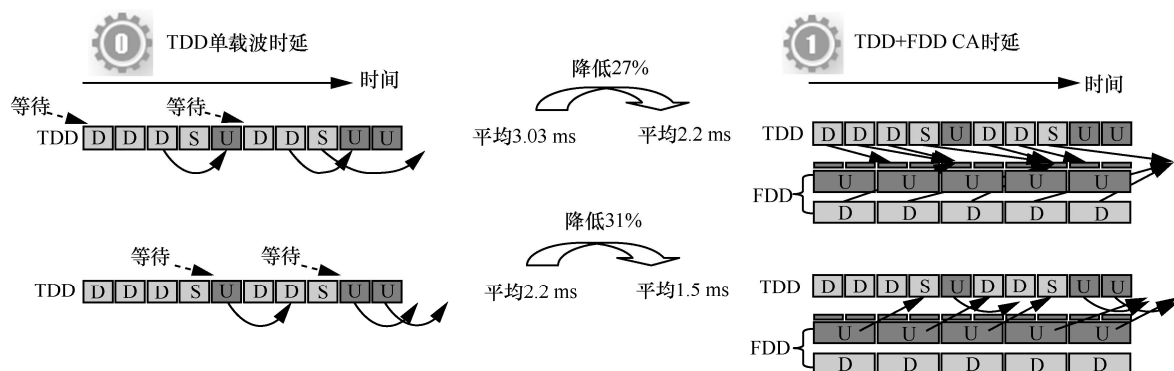


图5 TDD 单载波与 FDD+TDD 载波聚合时延对比

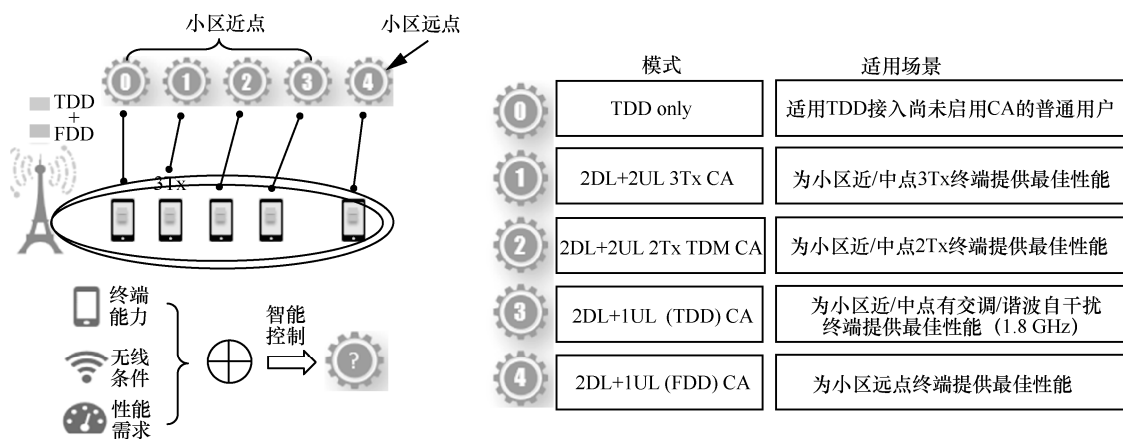


图6 载波聚合工作模式

载波也可与多个 FDD 载波同时进行载波聚合，每个聚合组合都是为特定终端动态建立的。基站可结合终端能力、无线条件和业务性能需求等，动态指示终端选择不同工作模式。

4.5 载波聚合方案的限制

2.1 GHz 频段目前主要用于 3G/4G 网络，需要加快 2.1 GHz 频率腾退，以 NR 为目标积极推进 2.1 GHz 重耕。对 FDD 和 TDD 不共站部署或者扇区覆盖不完全重叠的场景，FDD+TDD 载波聚合会对站间协同接口提出严格的传输时延要求。另外，载波聚合需要一定的触发条件。载波聚合中的辅载波添加/激活门限可以灵活配置，实际网络中根据需要进行合理配置来满足对应需求。在载波聚合场景下，对于辅载波引入了激活机制，载波聚合触发分以下两种情况。

(1) 根据信号测试强度触发。如辅载波测量

信号强度高于主载波一定强度。

(2) 根据业务需要配置触发。在主载波出现业务拥塞则会触发辅载波激活，拥塞判决相关门限可灵活配置。如非保证比特速率(non-guaranteed bit rate, NGBR)业务的聚合最大比特速率(aggregate maximum bit rate, AMBR)或者保证比特速率 GBR 未满足。

5 结束语

补充上行链路和超级上行为小区内上行增强技术，实现简单，无额外信令开销；载波聚合是小区间协调技术，涉及辅载波的测量、增删、切换等操作，灵活但是复杂度高，增加了额外信令开销，但能同时解决 5G 上下行覆盖问题，并提高边缘用户速率，具备演进性。当前正在促进 3.5 GHz 200/300 Mbit/s、2.1 GHz 2×50 Mbit/s

产业链成熟, 频率充分共享, 发挥 3.5 GHz 容量优势、2.1 GHz 覆盖优势, 高低频协同、多种设备形态组合, 构造分层网络。同时立足 4G/5G 共存、协同发展, 利用动态频谱共享技术, 加速 4G 频谱资源向 5G 重耕。随着现有频段逐步重耕, 5G 可获得的频段更丰富, 多频段载波聚合和协同组网将会得到更加广泛的应用, 提供更好的用户体验。

参考文献:

- [1] 袁弋非, 王欣晖, 赵孝武. 5G 部署场景和潜在技术研究[J]. 移动通信, 2017, 41(6): 39-45.
YUAN Y F, WANG X H, ZHAO X W. Research on deployment scenarios and enabling techniques for 5G[J]. Mobile Communications, 2017, 41(6): 39-45.
- [2] 张海涛. 基于中继的 5G 无线网覆盖增强方案研究[J]. 移动通信, 2019, 43(6): 31-35.
ZHANG H T. Research on relay-based 5G wireless network coverage enhancement scheme[J]. Mobile Communications, 2019, 43(6): 31-35.
- [3] 李培. 5G 载波聚合和双连接及提前测量上报技术研究[J]. 邮电设计技术, 2020(3): 23-27.
LI P. Research on 5G carrier aggregation, double connection and early measurement report technology[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(3): 23-27.
- [4] 王志勤, 徐菲. 关于 5G 组网技术路线的分析与建议[J]. 电信科学, 2019, 35(7): 3-7.
WANG Z Q, XU F. Analysis and suggestion on 5G networking technology route[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(7): 3-7.
- [5] 马洪源, 肖子玉, 卜忠贵, 等. 面向 5G 的核心网演进[J]. 电信科学, 2019, 35(9): 135-143.
MA H Y, XIAO Z Y, BU Z G, et al. Evolution of core network oriented to 5G[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(9): 135-143.
- [6] 魏垚, 熊尚坤. 5G eMBB 空口时延分析与增强技术研究[J]. 移动通信, 2019, 43(9): 42-46.
WEI Y, XIONG S K. Analysis on 5G eMBB uu interface latency and study on enhancement technique[J]. Mobile Communications, 2019, 43(9): 42-46.

[作者简介]



胡煜华 (1973—), 男, 中国联合网络通信有限公司浙江省分公司高级工程师, 主要研究方向为无线网络规划建设。



王鑫炎 (1985—), 男, 中国联合网络通信有限公司浙江省分公司工程师, 主要研究方向为无线网络规划优化。



李贝 (1983—), 女, 中国联合网络通信有限公司浙江省分公司高级工程师, 主要研究方向为无线网络规划优化。