

# 5G网络3.5 GHz+900 MHz 载波聚合组网方案部署策略研究

## Research on 3.5 GHz+900 MHz Carrier Aggregation Network Scheme and Deployment Strategy for 5G Network

何 明,韩纬禧,梁 鹏,吕 爽(中国联通广东分公司,广东 广州 510630)

He Ming,Han Weixi,Liang Peng,Lü Shuang(China Unicom Guangdong Branch,Guangzhou 510630,China)

### 摘 要:

分析了3.5 GHz+900 MHz载波聚合的网络配置及实现条件、上行增益和主辅载波策略,部署试点环境,对BBU共框/跨BBU/跨机房不同场景对比测试、拉网测试、室外覆盖室内CQT测试等进行了详细分析,并结合终端渗透和地理化分布分析,提出3.5 GHz+900 MHz载波聚合部署策略建议方案。

### 关键词:

5G;3.5 GHz+900 MHz;载波聚合;组网方案  
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.02.010  
文章编号:1007-3043(2025)02-0053-06  
中图分类号:TN929.5  
文献标识码:A  
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Abstract:

It analyzes the network configuration and implementation conditions, uplink gain and carrier strategy of 3.5 GHz+900 MHz carrier aggregation. By deploying test environment, it conducts detailed analysis on comparison test of the same BBU, cross-BBU, cross-equipment room, network ergodic test and outdoor coverage indoor CQT test, etc. Based on analysis of terminal penetration and geographical distribution, it proposes 3.5 GHz+900 MHz carrier aggregation deployment strategy suggestion.

### Keywords:

5G;3.5 GHz and 900 MHz; Carrier aggregation; Network scheme

**引用格式:**何明,韩纬禧,梁鹏,等. 5G网络3.5 GHz+900 MHz载波聚合组网方案部署策略研究[J]. 邮电设计技术,2025(2):53-58.

## 1 概述

近年来,为响应国家5G等新型基础设施建设和工信部“信号升格”等行动,提升5G城镇区域深度覆盖和农村区域广度覆盖,中国移动和中国广电大力推动700 MHz低频网建设,中国联通大力推动900 MHz低频网建设,中国电信2023年开始加速800 MHz低频网建设。当前各运营商的5G低频网已基本建成,但在城区等建筑密集的区域,仅仅依赖低频网难以显著提升用户感知,需要高低频协同组网,既发挥低频网的覆

盖优势,又发挥中频网的容量优势,同时通过载波聚合为用户提供更好的业务感知和体验。

业内针对5G上下行不平衡问题和如何弥补中高频上行受限进行了广泛的研究,其中包括对上行增强的方法、手段的研究,也有较多文献对比分析了双连接、上下行解耦和载波聚合等解决方案用于5G上行增强的优劣,认为载波聚合方案是5G网络上行覆盖增强的较优解决方案,载波聚合R15版本的关键技术有载波间SRS轮发、携带辅小区Scell切换和跨站载波聚合等,R16版本的关键技术定义了两载波的1Tx和2Tx上行通道切换功能,使得上行载波聚合也具备了TDM的能力,对产业链方面提出了载波聚合终端基带、射频

收稿日期:2025-01-10

芯片和射频前端器件的相关建议,在部署策略方面给出了高低频载波聚合驻留重选方案、主载波管理方案和移动性管理方案,但并未给出针对特定业务需求场景的部署策略<sup>[1-8]</sup>;其次是包含中国联通主流频段 3.5 GHz+2.1 GHz 载波聚合的效果分析和采用 SRS 权与 PMI 权自适应技术提升下行峰值速率的分析和测试验证,也包含中国移动主流频段 2.6 GHz+4.9 GHz 载波聚合分析和采用帧头不对齐、上下行时隙错开对于上行能力增强方案的分析与测试验证<sup>[4,9-11]</sup>;此外也包含对载波聚合终端自干扰分析和载波聚合高干扰场景相关研究,通过将干扰频段作为辅载波来规避干扰的影响以提升载波聚合效果<sup>[12-14]</sup>。

尽管业内关于载波聚合已进行大量研究,但相关研究和资料较少提及 3.5 GHz+900 MHz 载波聚合的方案可行性,此外当前的研究主要聚焦于网络方案本身,对终端的支持情况缺少深入分析,对载波聚合的规模部署难以给出有效可行的建议方案。

## 2 3.5 GHz+900 MHz 载波聚合方案研究

本章主要从网络配置及实现条件、上行增益分析和主辅载波策略 3 个方面对载波聚合方案进行研究。

### 2.1 网络配置及实现条件

从网络结构来看,3.5 GHz+900 MHz 载波聚合根据 3.5 GHz BBU 和 900 MHz BBU 部署位置的不同分为 BBU 共框、同机房跨 BBU 和不同机房跨 BBU 3 种类型,基于 eXn 站间交互以及资源精准协商机制,主载波小区所在的 gNodeB 可对 CA UE 的下行数据传输进行跨站分流,如满足如下 4 个条件,可基本等同 BBU 共框载波聚合效果。

a) 最大单向传输时延小于阈值。根据目前主设备厂家实现方式和能力的差异,高低频跨 BBU 之间的最大单向传输时延也略有差异,厂家 A 的建议阈值为 5 ms,厂家 B 的建议阈值为 4 ms,厂家 C 的建议阈值为 300  $\mu$ s。根据工程经验,同一传输环路的不同基站的最大单向传输时延必在阈值以内。

b) gNodeB 之间的时间差小于阈值。由于 3.5 GHz 基站为 TDD 制式,因此为实现载波聚合需确保各 BBU 之间的时间差小于阈值,建议值为 1.5  $\mu$ s。目前 5G 基站主要通过 GNSS 信号实现时间同步,根据实测数据,同一 GNSS 信号对不同基站的时间差在  $\pm 200$  ns 左右,远小于 1.5  $\mu$ s;2 个基站不同 GNSS 信号的时间差(如 A 基站通过 BDS 授时、B 基站通过 GPS 授时)也在  $\pm 100$  ns

以内,也远小于 1.5  $\mu$ s。因此基于 GNSS 信号实现时间同步授时的 gNodeB 之间的时间差均可满足需要。

c) Pcell 和 Scell 可通过接口传输数据和信令。厂家 A 和厂家 B 通过 eXn 接口实现载波聚合站点间的数据和信令传输,厂家 C 对于同机房跨 BBU 需要增加单独的光口直连,对于不同机房跨 BBU 需要跨机房的光路资源,有 2 种实现模式:一是传输网络具备二层交换的能力;二是增加二层交换聚合路由器。图 1 所示为同机房跨 BBU 需要增加单独的光口直连示意。图 2 所示为不同机房跨 BBU 需要增加二层交换机示意。

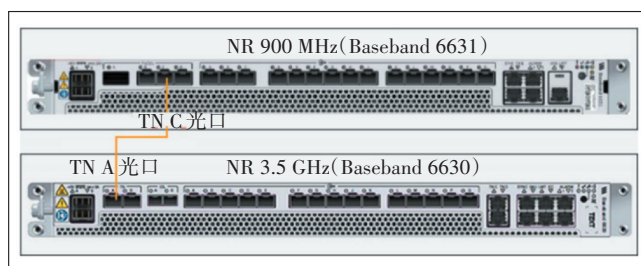


图 1 同机房跨 BBU 需要增加单独的光口直连示意

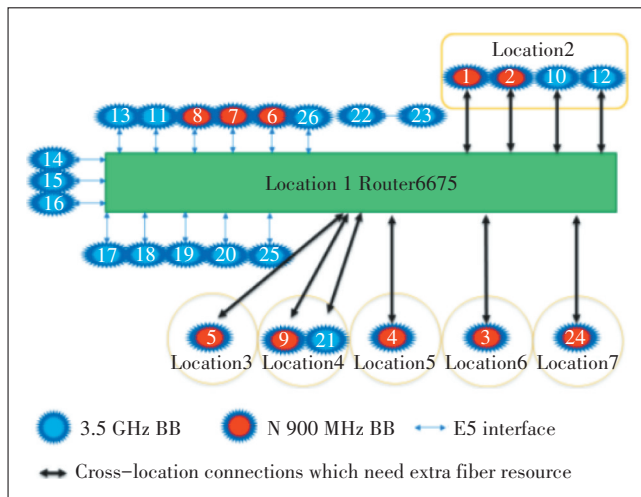


图 2 不同机房跨 BBU 需要增加二层交换机示意

d) 站点传输带宽大于载波聚合需求带宽。由于当前城区等建筑密集区域 5G 智能城域网的传输接入侧为 10GE,因此可满足 3.5 GHz+900 MHz 带宽需求,该要求基本不构成制约因素。

### 2.2 上行增益分析

#### 2.2.1 R15 版本上行特性

基于 R15 版本的上行高低频载波聚合功能,采用 FDD 1Tx+ TDD 1Tx 并发方式。即在 3.5 GHz 的上行时隙,3.5 GHz 上行单发加上 FDD 频段单发;在 3.5 GHz 的下行时隙,FDD 频段上行单发。R15 版本上行载波

聚合示意如图3所示。

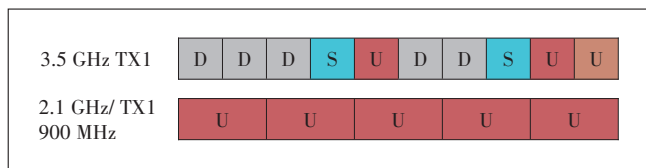


图3 R15版本上行载波聚合示意

由于900 MHz上行单发能力在小区近、中点要弱于3.5 GHz上行单发能力,因此在信号覆盖质量良好的小区近、中点区域,R15版本的高低频载波聚合小区上行吞吐率要低于单3.5 GHz小区上行吞吐率。

#### 2.2.2 R16版本上行特性

基于R16版本的上行高低频载波聚合功能,使用上行发送切换技术,采用FDD 1 Tx+ TDD 2 Tx分时传输方式。即在3.5 GHz的上行时隙,3.5 GHz上行双发,FDD频段不发送;在3.5 GHz的下行时隙,FDD频谱上行单发。该特性增加上行发送的时间,从而提升上行吞吐率。R16版本上行载波聚合示意如图4所示。

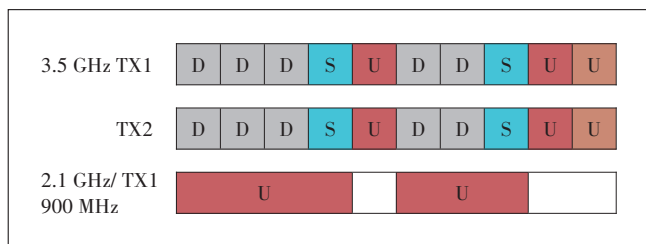


图4 R16版本上行载波聚合示意

### 2.3 主辅载波策略研究

为提升用户感知,在3.5 GHz+900 MHz高低频载波聚合时,尽可能选取3.5 GHz作为主载波。在主辅载波策略上,需综合考虑基于覆盖的切换和基于负荷的负载均衡,避免产生乒乓切换。

当主载波从3.5 GHz切换到900 MHz时,建议采用基于覆盖的切换,900 MHz采用保守驻留策略,保障用户优先驻留在3.5 GHz享受大带宽,通过A2+A5事件控制边缘用户选择上行最优覆盖小区。

当主载波从900 MHz切换回3.5 GHz时,建议中、近点用户采用基于频率优先级的切换,边缘用户基于覆盖切换或基于上行感知切换;因为900 MHz速率远低于3.5 GHz的高带宽速率,需尽快从低带宽的900 MHz回到3.5 GHz。高低频互操作策略示意如图5所示。

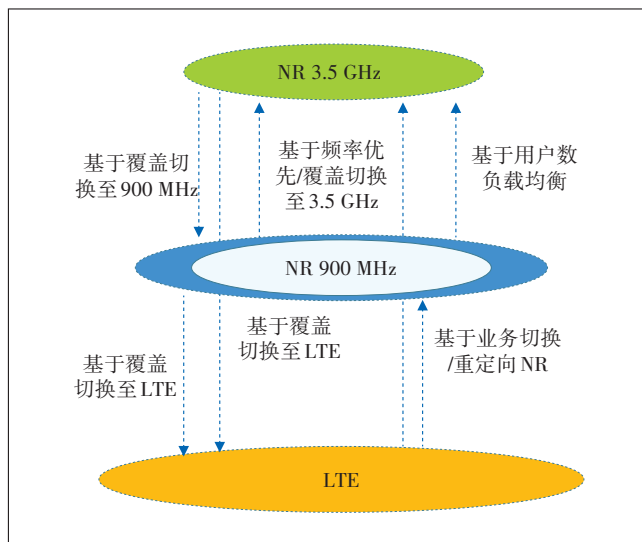


图5 高低频互操作策略示意

## 3 3.5 GHz+900 MHz 载波聚合试点测试

本章从3类不同场景对3.5 GHz+900 MHz载波聚合的效果进行测试验证,包括CA对比测试、区域拉网测试和室外覆盖室内CQT测试。在广东某城市选取3.5 GHz+900 MHz载波聚合试点区域,其中有66个NR3.5 GHz基站和37个NR900 MHz基站,绿色三叶草是3.5 GHz基站,蓝色圆点是900 MHz基站(见图6)。



图6 3.5 GHz+900 MHz载波聚合试点区域示意

### 3.1 BBU共框/跨BBU/跨机房不同场景载波聚合对比

在测试区域内选取BBU共框、同机房跨BBU和不同机房跨BBU 3种类型的载波聚合场景区域,分别选取对应的近、中、远点进行测试验证,其中近点选取



3.5 GHz SS-RSRP在-80 dBm左右的点,中点选取 3.5 GHz SS-RSRP在-100 dBm左右的点,远点选取 3.5 GHz SS-RSRP在-110 dBm左右的点。测试结果如表1所示。

表1 BBU共框/跨BBU/跨机房载波聚合对比测试结果

| 场景 | 测试类型     | SS-RSRP/<br>dBm | SS-SINR/<br>dB | NR PDCP<br>Throughput<br>DL/(Mbit/s) | 性能差异 |
|----|----------|-----------------|----------------|--------------------------------------|------|
| 近点 | BBU共框    | -81             | 12.13          | 336                                  | 基线   |
|    | 不同机房跨BBU | -78             | 14.39          | 345                                  | 3%   |
|    | 同机房跨BBU  | -80             | 12.79          | 330                                  | -2%  |
| 中点 | BBU共框    | -99             | 5.09           | 234                                  | 基线   |
|    | 不同机房跨BBU | -101            | 4.66           | 215                                  | -8%  |
|    | 同机房跨BBU  | -100            | 5.34           | 239                                  | 2%   |
| 远点 | BBU共框    | -110            | 2.73           | 138                                  | 基线   |
|    | 不同机房跨BBU | -109            | 2.01           | 121                                  | -12% |
|    | 同机房跨BBU  | -113            | 2.48           | 114                                  | -17% |

从表1可以看出,对于满足第2.1节中4个条件的不同类型载波聚合,近、中点测试结果基本相当,与BBU共框基本一致;而远点同机房跨BBU、不同机房跨BBU的结果相比BBU共框的效果略有下降。考虑到测试期间不同站点用户数、PRB利用率等的差异,实际测试结果与理论分析基本一致。

## 3.2 区域拉网测试结果

### 3.2.1 下行测试

在测试区域内进行拉网测试,下行载波聚合测试结果如表2所示。

从表2可以看出,下行载波聚合速率相比单3.5 GHz有10%~20%的提升,与理论分析结果基本一致。

表2 3.5 GHz+900 MHz 下行载波聚合对比测试结果

| 测试方式                     | SS-RSRP/<br>dBm | SS-SINR/<br>dB | NR PDCP<br>Throughput<br>DL/(Mbit/s) | NR PDCCH<br>DL Grant-<br>Count | NR PRB<br>Num DL/<br>slot |
|--------------------------|-----------------|----------------|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| 下行空载,占用NR3.5+NR900 CA    | -72             | 17             | 491                                  | 1 347                          | 234                       |
| 下行空载,锁NR3.5,关闭CA         | -72             | 17             | 419                                  | 1 345                          | 235                       |
| 下行空载,锁NR900,关闭CA         | -67             | 7              | 50                                   | 928                            | 51                        |
| 下行加载50%,占用NR3.5+NR900 CA | -71             | 16             | 311                                  | 1 307                          | 233                       |
| 下行加载50%,锁NR3.5,关闭CA      | -71             | 16             | 286                                  | 1 316                          | 233                       |
| 下行加载50%,锁NR900,关闭CA      | -68             | 6              | 13                                   | 841                            | 50                        |

### 3.2.2 上行测试

参考测试环境,分别设置R15版本能力和R16版本能力,上行载波聚合测试结果如表3所示。

表3 3.5 GHz+900 MHz 上行载波聚合对比测试结果

| 测试方式                      | UL MAC<br>Rate<br>(Pcell)/<br>(Mbit/s) | UL MAC<br>Rate<br>(Scell)/<br>(Mbit/s) | UL MAC<br>Rate(CA<br>Total)/<br>(Mbit/s) |
|---------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|
| 3.5 GHz+900 MHz R16 CA 近点 | 347.89                                 | 12.50                                  | 360.39                                   |
| 3.5 GHz+900 MHz R15 CA 近点 | 153.04                                 | 24.53                                  | 177.57                                   |
| 单3.5 GHz 近点               | 352.15                                 | -                                      | 352.15                                   |
| 单900 MHz 近点               | 31.29                                  | -                                      | 31.29                                    |
| 3.5 GHz+900 MHz R16 CA 中点 | 223.20                                 | 10.75                                  | 233.95                                   |
| 3.5 GHz+900 MHz R15 CA 中点 | 110.22                                 | 10.46                                  | 120.68                                   |
| 单3.5 GHz 中点               | 213.06                                 | -                                      | 213.06                                   |
| 单900 MHz 中点               | 21.36                                  | -                                      | 21.36                                    |
| 3.5 GHz+900 MHz R16 CA 远点 | 39.78                                  | 4.64                                   | 44.42                                    |
| 3.5 GHz+900 MHz R15 CA 远点 | 16.63                                  | 3.18                                   | 19.81                                    |
| 单3.5 GHz 远点               | 30.39                                  | -                                      | 30.39                                    |
| 单900 MHz 远点               | 5.25                                   | -                                      | 5.25                                     |

从表3可以看出,R16版本的上行载波聚合由于采取了上行发送切换技术,上行载波聚合速率优于上行单3.5 GHz速率;而R15版本的上行载波聚合采用FDD 1Tx+TDD 1Tx并发方式,本次测试近、中、远点的上行载波聚合速率均低于上行单3.5 GHz速率。整体上行测试结果与理论分析结果基本一致。

## 3.3 室外覆盖室内CQT测试结果

载波聚合比较广泛的应用场景是室外基站覆盖室内,提升室内深度覆盖的网络效果和用户感知,在本次测试区域搭建对应测试环境,通过CQT测试来评估室外覆盖室内效果。室外覆盖室内CQT测试区域示意如图7所示。其中点位1为网络近点,点位2为网络中点,点位3为网络远点,点位4为3.5 GHz脱网点,室外覆盖室内CQT上行和下行测试结果如表4和表5所示。

从表4可以看出,由于是R15版本上行,近点CA上行速率低于单3.5 GHz,中点和远点CA上行速率略高于单3.5 GHz,在3.5 GHz脱网的点位4,CA上行速率仍可维持约2 Mbit/s,通过高低频载波聚合提升了上行深度覆盖能力。从表5可以看出,近中远点CA下行速率均优于单3.5 GHz,在3.5 GHz脱网的点位4,CA下行速率仍可维持约3 Mbit/s,通过高低频载波聚合提升了下行速率和用户体验。

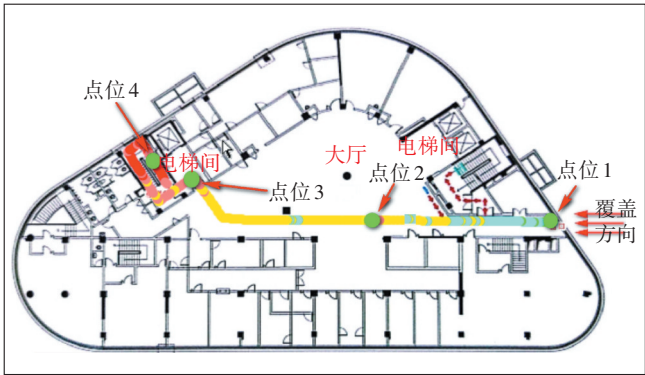


图7 室外覆盖室内CQT示意

表4 室外覆盖室内CQT上行载波聚合测试结果

| 制式      |         | 点位1<br>(近点)      |                                   | 点位2<br>(中点)      |                                   | 点位3<br>(远点)  |                                   | 点位4(3.5<br>GHz脱网点) |                                   |
|---------|---------|------------------|-----------------------------------|------------------|-----------------------------------|--------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
|         |         | RSR<br>P/<br>dBm | 上行<br>PDCP<br>速率/<br>(Mbit/<br>s) | RSR<br>P/<br>dBm | 上行<br>PDCP<br>速率/<br>(Mbit/<br>s) | RSRP<br>/dBm | 上行<br>PDCP<br>速率/<br>(Mbit/<br>s) | RSRP/<br>dBm       | 上行<br>PDCP<br>速率/<br>(Mbit<br>/s) |
| 900 MHz |         | -75              | 44.74                             | -98              | 19.93                             | -109         | 4.06                              | -117               | 1.20                              |
| 3.5 GHz |         | -86              | 287.10                            | -103             | 91.93                             | -114         | 15.24                             | -127               | -                                 |
| CA      | 900 MHz | -75              | 233.94                            | -97              | 108.49                            | -110         | 18.11                             | -119               | 1.95                              |
|         | 3.5 GHz | -86              | -                                 | -102             | -                                 | -115         | -                                 | -125               | -                                 |

表5 室外覆盖室内CQT下行载波聚合测试结果

| 制式      |         | 点位1<br>(近点)      |                                   | 点位2<br>(中点)      |                                   | 点位3<br>(远点)  |                                   | 点位4(3.5<br>GHz脱网点) |                                   |
|---------|---------|------------------|-----------------------------------|------------------|-----------------------------------|--------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
|         |         | RSR<br>P/<br>dBm | 下行<br>PDCP<br>速率/<br>(Mbit/<br>s) | RSR<br>P/<br>dBm | 下行<br>PDCP<br>速率/<br>(Mbit/<br>s) | RSRP<br>/dBm | 下行<br>PDCP<br>速率/<br>(Mbit/<br>s) | RSRP/<br>dBm       | 下行<br>PDCP<br>速率/<br>(Mbit<br>/s) |
| 900 MHz |         | -77              | 80.82                             | -95              | 39.96                             | -112         | 24.10                             | -117               | 2.90                              |
| 3.5 GHz |         | -87              | 884.67                            | -101             | 504.27                            | -115         | 74.10                             | -126               | -                                 |
| CA      | 900 MHz | -79              | 961.82                            | -95              | 537.39                            | -110         | 93.76                             | -118               | 2.76                              |
|         | 3.5 GHz | -86              | -                                 | -99              | -                                 | -114         | -                                 | -124               | -                                 |

4 3.5 GHz+900 MHz 载波聚合部署策略研究

终端支持率和分布范围是 3.5 GHz+900 MHz 载波聚合部署的重要制约因素,本章对支持 3.5 GHz+900 MHz 载波聚合的终端模组进行分析,并结合网络现状给出部署策略建议。

4.1 终端支持率及分布研究

根据《中国联通 5G 终端白皮书》的要求,2022 年 Q3 开始入网的 3 000 元以上的终端,必须具备 3.5 GHz+900 MHz 下行载波聚合的能力,2022 年 Q4 开始

入网的 3000 元以上的终端,必须具备 3.5 GHz+900 MHz 上行载波聚合和 SUL 的能力<sup>[15]</sup>。基于白皮书的要求,主流芯片厂家对 3.5 GHz+900 MHz 载波聚合能力的支持情况如表 6 所示。

表6 主流芯片厂家载波聚合能力的支持情况

| 主流芯片厂家 | 3.5 GHz+900 MHz CA                            |
|--------|-----------------------------------------------|
| 高通     | DL CA:X60/X65<br>UL CA/TDM CA:X65             |
| 海思     | DL CA:麒麟9000<br>UL CA/TDM CA:N/A              |
| 联发科    | DL CA:M70/80<br>UL CA:M70<br>UL CA/TDM CA:M80 |

将 2022 年 Q3/Q4 入网的 3000 元以上高端机进行分析,梳理了小米、华为等 15 个主流终端品牌,共有 128 款终端硬件支持 3.5 GHz+900 MHz CA,其中 15 款终端软硬件均支持 3.5 GHz+900 MHz CA,终端支持能力分析如表 7 所示。

将表 7 的终端分析导入数字化平台进行地理化呈现,按对应基站城区 600 m、县乡 1 000 m、农村 1 500 m

表7 主流终端厂家载波聚合支持能力

| 终端品牌   | 硬件支持<br>3.5 GHz+<br>900 MHz<br>CA | 软硬件支持<br>3.5<br>GHz+900<br>MHz CA | 硬件支持典型终端               | 软硬件支持典型终端     |
|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|---------------|
| 小米     | 11                                | 5                                 | 小米 12 pro              | Xiaomi 14 Pro |
| 红米     | 12                                | 4                                 | Redmi K70 Pro 5G 全网通版  | Note12 Turbo  |
| 荣耀     | 22                                | 2                                 | 荣耀 90 GT 5G 全网通版       | 荣耀 Magic6 Pro |
| OPPO   | 17                                | 2                                 | Reno9 Pro+ 5G 全网通版     | Find X7 Ultra |
| 华为     | 7                                 | 2                                 | HUAWEI nova 12 5G 全网通版 | Mate60 Pro    |
| IQOO   | 9                                 | -                                 | IQOO Neo9              | -             |
| 三星     | 9                                 | -                                 | SAMSUNG Galaxy S22     | -             |
| 一加     | 8                                 | -                                 | Ace 2 Pro 5G 全网通版      | -             |
| vivo   | 6                                 | -                                 | X90 Pro+               | -             |
| 努比亚    | 6                                 | -                                 | Z50S Ultra             | -             |
| 苹果     | 6                                 | -                                 | iPhone 15              | -             |
| Realme | 5                                 | -                                 | Realme GT Neo5 5G 全网通版 | -             |
| 红魔     | 4                                 | -                                 | 8S Pro                 | -             |
| 魅族     | 3                                 | -                                 | 21 5G 全网通版             | -             |
| 摩托罗拉   | 3                                 | -                                 | Z50S pro               | -             |
| 汇总     | 128                               | 15                                | -                      | -             |

进行渲染,某省联通硬件支持3.5 GHz+900 MHz CA的终端和软硬件均支持的终端分布如图8和图9所示。

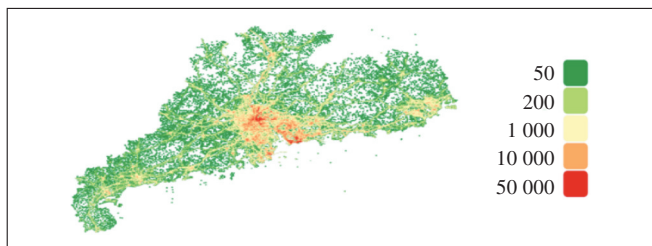


图8 硬件支持CA的终端分布示意

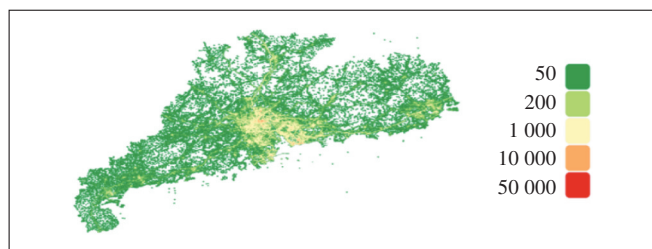


图9 软硬件均支持CA的终端分布示意

## 4.2 网络部署策略研究

从图9可以看出,硬件支持3.5 GHz+900 MHz载波聚合的终端存在一定比例,且聚焦于广东珠三角大湾区的城市区域,但由于软件未升级,即便网络部署载波聚合也无法提升这一部分终端的感知;软硬件均支持3.5 GHz+900 MHz载波聚合的终端的比例较低,且主要分布在广州、深圳、东莞、佛山等一线城市。

基于终端渗透率和分布情况,给出3.5 GHz+900 MHz载波聚合网络部署策略建议如下。

a) 在软硬件均支持3.5 GHz+900 MHz载波聚合的终端分布集中的一线城市城区,结合投诉聚集区域和5G切换至4G异系统切换比例聚焦的区域,待900 MHz重耕至NR并且支持R16版本上行增强能力后,开通3.5 GHz+900 MHz载波聚合功能,提升高端用户的网络感知。

b) 尽快明确其他地(市)900 MHz重耕至NR的时间表,推动产业链完成载波聚合的端网测试和软件版本更新,待软硬件均支持的NR终端渗透率提升后,再结合相关网络指标明确部署区域,开通3.5 GHz+900 MHz载波聚合功能。

## 5 结束语

本文结合载波聚合的网络配置及实现条件、试点测试结果和终端渗透率及地理化分布,提出了一种有

效端网协同的3.5 GHz+900 MHz载波聚合网络部署策略。

当前硬件支持3.5 GHz+900 MHz载波聚合的终端比例不高,软硬件均支持3.5 GHz+900 MHz载波聚合的终端的比例较低,为了使网络侧能够更好服务用户,需自上而下推动终端产业链加速软件版本的更新,使载波聚合技术能够更好地提升用户感知。

## 参考文献:

- [1] 龙青良,田元兵,李菲. 5G高低频协同上行增强技术研究[J]. 邮电设计技术,2023(3):6-9.
- [2] 王国祥,李常国. NR频段载波聚合研究与现网应用[J]. 山东通信技术,2022,42(4):6-10.
- [3] 李晓凤,戚文敏,李莉. 通过多频智选与站间CA提升NR用户上下行速率实验浅析[J]. 山东通信技术,2022,42(4):11-15.
- [4] 胡煜华,王鑫炎,李贝. 5G网络上行覆盖增强研究[J]. 电信科学,2021,37(7):134-141.
- [5] 刘英男,张涛,王伟. 5G NR载波聚合部署方案研究[J]. 邮电设计技术,2021(4):50-53.
- [6] 董文佳,宋丹,阮航. 5G终端载波聚合关键技术分析[C]//5G网络创新研讨会(2020)论文集. 北京:TD产业联盟,2020:82-86.
- [7] 肖婧婷,张国庭,杨明. 5G增强上行覆盖技术研究[J]. 广播与电视技术,2020,47(8):87-93.
- [8] 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.
- [9] 王磊,狄文远,赵栋,等. 5G网络2.6GHz+4.9GHz上行载波聚合组网方案研究[J]. 电信工程技术与标准化,2022,35(12):79-81.
- [10] 付斐,张国光,沈凌,等. 5G网络下的3.5GHz+2.1GHz站间CA载波聚合策略研究[J]. 江苏通信,2022,38(5):40-42,48.
- [11] 王伟,张涛,李福昌. 5G高低频协同组网方案研究[J]. 邮电设计技术,2021(3):42-45.
- [12] 秦洁,许乐飞,黄智瀛,等. 5G单下行辅载波技术研究[J]. 电信工程技术与标准化,2023,36(5):38-43.
- [13] 黄智瀛,白锡添. 5G载波聚合技术在干扰场景中的应用研究[J]. 广东通信技术,2022,42(5):73-75.
- [14] 崔明,李明. 5G SA网络CA终端自干扰分析及解决方案[J]. 中国新通信,2020,22(18):57-58.
- [15] 中国联合网络通信集团有限公司. 中国联通5G终端白皮书(第五版)[R/OL]. [2024-01-27]. <http://221.179.172.81/images/20211208/57851638936357117.pdf>.

## 作者简介:

何明,高级工程师,硕士,主要从事无线网络规划建设工作;韩伟禧,工程师,硕士,主要从事无线及宽带接入网络规划工作;梁鹏,工程师,学士,主要从事无线网络优化工作;吕爽,工程师,学士,主要从事无线网络规划工作。