

# 5G 高低频组网协同 机制与策略



## 5G High and Low Frequency Networking Cooperative Mechanism and Strategy

李福昌/LI Fuchang, 王伟/WANG Wei

(中国联合网络通信有限公司研究院, 中国 北京 100048)  
(The Research Institute of China Unicom, Beijing 100048, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202204002

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220722.1648.012.html>

网络出版日期: 2022-07-25

收稿日期: 2022-06-10

**摘要:** 提出一种综合考虑业务需求、用户体验、终端能力、空口能力、网络状态的协同机制。该机制利用智能化手段预测多层目标网络的用户体验预期, 实现用户与网络的最优匹配。该机制按照用户体验最优、网络效能最高的策略编排网络, 避免了传统的单一协同机制带来的诸多问题。用户体验与网络效能双优的高低频协同机制与策略对于未来高低频多层网络的有机融合有着重要的理论意义。

**关键词:** 5G; 高低频; 多层网络; 协同机制

**Abstract:** A collaborative mechanism that comprehensively considers business needs, user experience, terminal capability, air interface capability, and network status is proposed. This mechanism uses intelligent means to predict the user experience expectation of a multi-layer target network, and realize the optimal matching between users and the network. The network is arranged according to the strategy with the optimal user experience and the highest network efficiency, which avoids many problems brought by the traditional single collaboration mechanism. The high and low frequency coordination mechanism and strategy of realizing both user experience and network efficiency are of great theoretical significance for the future organic integration of high and low frequency multi-layer networks.

**Keywords:** 5G; high and low frequency; multi-layer network; collaborative mechanism

从 2019年6月6日中国5G牌照正式发放至今, 中国5G商用已满3年。中国坚持适度超前的原则, 积极稳妥地推进5G网络建设, 持续提升网络覆盖的深度和广度。截至目前, 中国累计建成并开通5G基站161.5万个, 已建成全球规模最大的5G网络。5G网络覆盖全国所有地市、县城城区和87%的乡镇镇区。5G移动电话用户总数超4.13亿。中国的5G建设已经进入了初步成熟期, 并向着后成熟期或完善期逐步演进。3.5 GHz和2.6 GHz是中国5G的首发和主力频段, 承担着覆盖中国乡镇以上区域的职责, 是5G流量的主要承载者。随着5G建设的不断深化, 用户对5G服务泛在性的需求也越来越强烈。运营商在积极筹建一个5G低频打底网, 为用户提供5G泛在性接入。国家也在积极推动能够提供大容量、高速率的毫米波频段的规划和使用, 组织开展毫米波设备性能测试, 为5G毫米波技术的商用做好准备。届时, 中国的5G网络将建设成为低、中、中高、高“四频同堂”的成熟网络。如何协同好这四大频段, 扬长避短, 各取所长, 是未来网络建设和运营的重点和难点<sup>[1-3]</sup>。

### 1 频段覆盖特性和设备能力对比

电磁波传播具有一些固有的特征。根据“光速=频率×波长”的原理, 频率越高, 其波长越短, 而波长越短的电磁波更容易被阻挡, 那么就越接近直线传播; 频率越低, 其波长越长, 它的绕射能力就会越强, 那么传播得会越远。第3代合作伙伴计划(3GPP)为了更好地评估系统设计的性能, 统一了0.5~100 GHz的传播模型, 定义了城区场景、郊区、街区和室内场景的传播模型。根据传播模型公式, 一方面, 空间损耗与频率成对数关系, 频率越高则空间损耗越大, 同时信号随着距离增加衰减得也越快; 另一方面, 频段越高, 可供分配的带宽也越大, 提供的峰值速率也会越大。表1是不同频段对应的峰值速率与覆盖距离<sup>[4]</sup>。

无线基站设备的射频模块和天线设计也会依据频段高低和带宽大小有所区别。由于半波振子的间距大, 低频设备在满足一定增益要求的前提下, 天线尺寸一般较大, 相应的通道数会相对较少。而高频设备由于波长小, 半波振子的间距小, 尺寸相应较小, 可以容纳更多的通道数<sup>[5-6]</sup>。

▼表1 各典型频段对应的峰值速率与覆盖距离

频段	频点	带宽/MHz	下行/上行峰值速率/(Mbit/s)	上行 1 Mbit/s 速率对应的覆盖距离/m
低频	900 MHz	10	112/56	760(室内)
中频	2.1 GHz	40	900/225	470(室内)
中高频	3.5 GHz	100	1 500/400	400(室内)
高频	28 GHz	400	2 400/800	440(室外)/ 不足百米(室内)

表2是不同频段典型设备类型对应的设备硬件性能参数。

## 2 高低频协同组网与频段定位

根据频段覆盖特性和不同频段的设备空口能力，我们需要建设高低频多层网络，以满足多场景多业务的覆盖需求。理想的网络拓扑是将低频网络建设成一个连续覆盖的底层网络。它可以作为一个“探针”，在实现用户泛在连接需求的同时，探知用户服务需求、位置需求和体验需求，再利用中频、中高频和高频来按需满足用户需求。中高频是为5G新分配的频段，也是运营商建设5G新空口(NR)的主力频段，覆盖中国乡镇以上区域；高频是待规划和分配的毫米波频段，未来主要用于分担5G容量和高流量区域的容量吸收；中频段是4G基础容量层，未来将按照业务发展情况适时进行重耕，并用于5G<sup>[7]</sup>。图1为高低频协同组网理想拓扑图。

根据以上频段定位，利用公共频点优先级和专用频点优

先级可以实现用户在Idle状态和Inactive状态的高低频选择。我们可将主力覆盖频段设置为最高优先级。对于在业务连接态的用户，可以基于服务小区和邻小区的接收信号强度或质量来进行用户迁移。当用户所在服务小区的信号变弱或质量变差而相邻小区的信号变强或质量变好时，该用户将被迁移至信号强度高或信道质量好的邻小区，以保证其获得最优网络服务。除此之外，也可以利用载波聚合功能来提升用户的速率体验和覆盖体验。载波聚合的主辅小区间可以更灵活地做负载均衡，以充分利用各载波的空闲资源，实现资源利用率最大化。当开启负载均衡时，终端无须在小区间做切换，只需做多载波调度或跨载波调度，即可减少由切换带来的信令开销，避免用户体验下降。当载波聚合功能用在频段间隔比较大的两个频段时，其价值更多体现在高低频协同上，既可以利用高频段的大带宽为用户提供高速率，又可以利用作为主载波的低频段的较强传播特性以扩大用户覆盖范围<sup>[8-9]</sup>。

▼表2 各频段典型设备硬件性能参数

频段	设备类型	通道数	天线最大增益	功率密度	下行用户峰值速率	上行用户峰值速率
低频	RRU+天线	4T4R	16 dBi	8 W/MHz	112 Mbit/s /10 MHz	56 Mbit/s /110 MHz
中频	RRU+天线	4T4R	17.5 dBi	8 W/MHz	900 Mbit/s /40 MHz	225 Mbit/s /40 MHz
中高频	AAU	64T64R(192 振子)	24.5 dBi	2 W/MHz	1.5 Mbit/s /100 MHz	0.4 Gbit/s /100 MHz
高频	AAU	4T4R(512 振子)	EIRP(最大增益+功率)=62 dBm/400 MHz		2.4 Gbit/s /400 MHz	0.8 Gbit/s /400 MHz

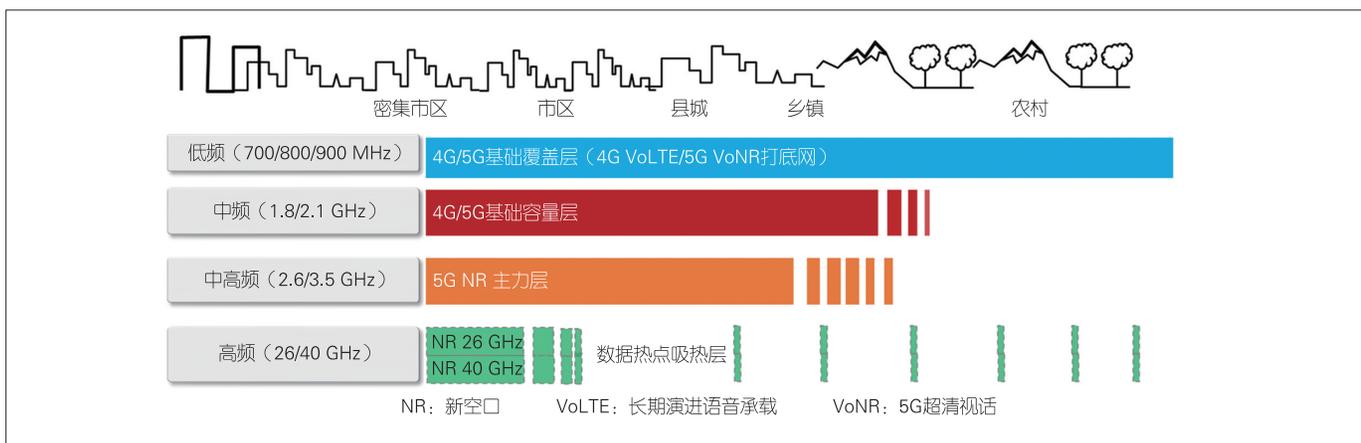
AAU:有源天线单元

EIRP:等效全向辐射功率

RRU:射频拉远单元

T:发射

R:接收



▲图1 高低频协同组网理想拓扑图

### 3 高低频协同机制与编排策略

传统的基于覆盖的单一协同机制给用户带来了诸多问题，如用户选择了信号好的频段但体验却变差了，小包业务在等待切换过程反而导致时延增大等。协同机制要利用好高低频多层网络中各层网络的优势，在满足不同用户、不同业务的不同需求的同时，实现网络效能的最优。协同机制的总体原则为用户体验最优、网络效能最高。协同机制既要满足用户的体验，也要考虑网络的耗能。

#### 3.1 基于终端能力和业务特征的分层策略

基于终端和业务的协同策略，我们可以基于频段的定位和不同用户属性（如VIP用户、固定无线接入用户）或不同业务属性（如语音业务、面向企业业务）来实现分层配置策略。一些面向企业的业务，其数据包小、持续时间短，可能刚切换小区或还未切换，业务就已经结束了。另外，小区切换过程中带来的用户面中断时延，反而不利于用户体验，因此对这些业务触发小区切换的意义不大。本文提出了按照用户属性和业务属性来制定不同的用户接入和移动性的策略<sup>[10-11]</sup>。

##### (1) 基于用户属性的分层策略

根据运营商需要的频率选择优先级（RFSP），为VIP用户迁移一个专用载频，以实现基于RFSP的专用频点优先级和切换参数配置。

##### (2) 基于终端能力的分层策略

根据终端上报的能力，包括终端支持的频段、收发天线数、上下行流数等参数，配置专用频点优先级和移动性参数，以保证用户在移动过程中体验不下降。

##### (3) 基于切片类型的分层策略

基于单个网络切片选择辅助信息（S-NSSAI）类型配置专用频点优先级和切换参数，将业务精准定位到规划的目标频段。

##### (4) 基于业务类型的分层策略

基于5G服务质量标识（5QI）的精细化切换参数配置，实现业务的精准分层策略，如可以实现语音与数据业务的分层策略配置。

##### (5) 基于业务量的分层策略

基于上行用户设备（UE）缓存状态报告（BSR）和下行分组数据汇聚协议（PDCP）缓存状态来识别大包业务，将大包业务迁移到中高频或高频大带宽的频点，提升用户体验。

##### (6) 基于移动速度的分层策略

基于频偏测量或者一定时间内的小区切换次数来识别

高/低速用户，将低速用户从专网迁出，实现专网专用，提升高铁用户感知。

#### 3.2 基于业务需求和网络能力的用户体验保持和提升策略

在明确终端能力和业务特性之后，我们还需要判断网络能力，才能实现业务与网络的精准匹配。关于网络能力，我们不仅要考虑频段空口能力，还要考虑网络负荷状态。网络负荷可以由无线资源控制（RRC）连接用户数以及PRB利用率来表征。我们也可以根据网络负荷情况，制定协同机制。例如，对于低负荷状态，如果两个载波的负荷都较低，应把用户集中到一个频层，这有利于5G基站设备的节能；对于中负荷状态，将两个载波的负荷维持在均衡状态，可以避免因单载波负荷过高而造成的用户体验下降，提升整体的资源利用率。但要想在用户体验不下降的前提下实现网络效能最优，不仅需要综合考虑业务特性和网络能力，还需要根据无线环境和网络能力来准确预测同一位置下不同频点和小区的用户体验。基站通过实时监控每个用户的业务体验，并结合人工智能对目标频网和小区进行体验预测，将用户快速迁移到最优的目标频网和小区。该策略涉及用户在源小区的触发机制和目标小区的体验预测两个关键机制。

##### (1) 用户体验的表征

下行用户体验可以通过下行速率、下行阻塞状态和下行信道质量等参数表征。

用户下行速率=每秒成功调度的下行数据量 ÷ 调度这些数据量所使用的时间。 (1)

用户下行阻塞状态有两个指标：待发送数据量的清缓存时长和待发送数据的首包等待时长。待发送数据量的清缓存时长如公式（2）所示：

清缓存时长=（RLC+PDCP缓存数据量）÷下行速率。 (2)

待发送数据的首包等待时长是指RLC和PDCP各自缓存队列中第一包数据到达时刻与当前时刻的间隔。

下行信道质量可以通过终端下行频谱效率、信干噪比（SINR）和参考信号接收质量（RSRQ）来衡量。

上行用户体验可以通过上行速率、上行阻塞状态和上行信道能力等参数表征。

用户上行速率=每秒成功调度的上行数据量 ÷ 调度这些数据量所使用的时间。 (3)

用户上行阻塞状态可以用发送数据量的缓存时长来表示，即上行待发送数据量与调度数据量的比值。

相对于下行信道能力的评估，上行信道能力的评估要复杂得多。原因在于每个物理资源块（PRB）的功率都相同，终端上行发射功率可以分配在1个或多个PRB上，这意味着

每个资源块 (RB) 的功率可以不同。终端可以通过调度更少的 PRB 来提高每个 RB 的 SINR, 那么上行的最佳速率就是选择最合适的调用 RB 数对应的上行速率。上行信道能力可以通过公式 (4) 来表示:

$$\text{上行信道能力} = \max_{1 \leq i \leq RB_{\text{total}}} [i \times \text{频谱效率}(\text{SINR}_i)] \quad (4)$$

其中,  $i$  为调用 RB 数,  $RB_{\text{total}}$  为信道带宽对应的最大 RB 数, 频谱效率是调用 RB 数为  $i$  时的信噪比所对应的频谱效率。

#### (2) 基于用户体验的频网选择触发机制

下行判决是指基站通过对终端“下行速率+下行阻塞状态+下行信道质量”的联合判决, 来评估用户下行体验。当终端下行速率低、下行数传调度发生阻塞、下行信道质量变差时, 用户下行体验就已变差, 这时需要触发用户频网选择机制。

上行判决是指基站通过对终端“上行阻塞状态+上行信道能力”的联合判决, 来评估用户的上行体验。当终端上行数传调度发生阻塞且上行信道质量变差时, 该用户上行体验变差, 这时需要触发用户频网选择机制。

#### (3) 基于体验预测的频网选择

传统目标小区的选择主要依赖于终端对目标频点或小区信号的测量, 因此无法准确判断目标小区的负荷状态和空口能力。这样可能会出现信号强度已经满足切换门限但目标小区的空口能力差或网络负荷较重的情况, 用户业务体验反而会变差。因此, 目标小区的用户体验要结合目标小区的空口能力、负荷信息以及信道状态来做综合判断。

小区空口能力 = (小区频谱效率 × 小区等效带宽) ÷ 小区 RRC 用户数, (5)

其中, 小区频谱效率为小区频谱效率的平均值, 小区等效带宽是根据小区总带宽、子载波间隔、下行时隙配比等因素归一化的结果, 小区 RRC 用户数是处于连接态的各类用户数的总和。

目标小区负荷信息则包括: 小区 RRC 用户数、小区上行 PRB 利用率、小区下行 PRB 利用率等。

目标小区信道质量信息包括上下行信号强度和信噪比等。目标小区信道质量信息可以利用无线指纹栅格知识库来获得, 它是基站对于其覆盖范围内无线环境的一种记忆, 不再以经纬度作为位置特征, 而是以终端上报的服务小区信号强度和相邻信号的强度来作为位置特征, 从而获取和预测对应位置信息下的信道质量信息。相比于位置信息, 信号信息更直接反映了信道质量。我们利用人工智能, 结合用户数据缓存状态、目标小区的信道质量、空口

能力及负荷信息来预测用户在多层网络中的业务体验, 然后基于用户体验不下降的原则来进行频网选择和用户迁移。

## 4 结束语

高低频多层组网是未来 5G 网络建设的趋势。面对日益丰富的终端业务和用户的差异化需求, 传统的依靠频点优先级和信号强度来进行频网选择的方案无法发挥高低频多层组网的优势。只有综合考虑空口能力、终端能力、网络状态、业务需求等多方面因素, 并利用智能化手段预测多层目标网络的用户体验预期, 才能实现用户与网络的最优匹配。

## 参考文献

- [1] 5G“发牌”三周年! 我国 5G 进入规模化应用关键期信息通信业跨越式增长 [EB/OL]. [2022-06-10]. <http://www.cwww.net.cn/article?id=563443>
- [2] 3GPP. Technical specification group radio access network; study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: TR 38.901v16.0.0 [S]. 2019
- [3] 3GPP. Technical specification group radio access network; NR; Physical layer procedures for control: TS 38.213v16.6.0 [S]. 2019
- [4] 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
- [5] 张忠皓, 李福昌, 延凯悦, 等. 5G 毫米波移动通信系统部署场景分析和建议 [J]. 邮电设计技术, 2019(8): 1-6. DOI: 10.12045/j.issn.1007-3043.2019.08.001
- [6] 袁满, 刘晓燕, 王科. 5G 多频段组网和优化策略研究 [J]. 电子技术应用, 2021, 47(10): 16-21. DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211784
- [7] 中国联通. 中国联通 5G 基站设备技术白皮书 [EB/OL]. [2022-06-10] <http://www.bomeimedia.com/China-unicom/index-02.1.html>
- [8] 王伟, 张涛. 基于人工智能的 TDD 灵活时隙研究 [J]. 信息通信技术, 2021, 15(5): 15-20
- [9] 中兴通讯. 中兴通讯无线智能编排网络白皮书 [EB/OL]. [2022-06-10]. [https://res-www.zte.com.cn/medias/zte/Files/newsolution/Wireless/RAN/white\\_paper/orchesration\\_CH.pdf](https://res-www.zte.com.cn/medias/zte/Files/newsolution/Wireless/RAN/white_paper/orchesration_CH.pdf)

## 作者简介



**李福昌**, 中国联通研究院无线技术研究中心总监, 教授级高级工程师, 国家知识产权局中国专利审查技术专家, 北京邮电大学兼职教授, 享受国务院政府特殊津贴; 主要从事移动通信及固网移动融合等专业的标准制定、测试验证、课题研究等工作; 发表论文 100 余篇, 出版专著 1 部, 授权国家发明专利 30 余项。



**王伟**, 中国联通研究院无线技术研究中心高级工程师; 主要从事移动通信的标准制定、测试验证、课题研究等工作; 研究方向包括 5G 无线设备硬件、5G 组网方案、5G-Advanced 功能演进等。