

# 5G 高低频协作组网场景下小区范围动态扩展优化技术

## Dynamic Cell Range Expansion Optimization for 5G Multi-Frequency Cooperative Networks

方思赛/FANG Sisai<sup>1</sup>  
魏品帅/WEI Pinshuai<sup>2</sup>  
刘聪/LIU Cong<sup>3</sup>

(1. 北京邮电大学, 北京 100876;  
2. 中华人民共和国公安部科技信息化局,  
北京 100142;  
3. 中国移动通信有限公司研究院, 北京  
100053)

(1. Beijing University of Posts and  
Telecommunications, Beijing 100876, China;  
2. Science and Technology Information  
Bureau of the Ministry of Public Security  
of the People's Republic of China, Beijing  
100142, China;  
3. China Mobile Research Institute, Beijing  
100053, China)

随着移动通信技术的革新和数据业务的快速增长, 用户对带宽资源的需求也在逐渐增长, 5G 因此应运而生。根据目前的规划, 5G 将以低频段 (3 ~ 6 GHz 频段) 部署宏小区覆盖<sup>[1]</sup>, 而以高频段 (24 GHz 以上频段) 进行小小区部署以提高热点速率。相比于高频段, 低频段部署时网络的覆盖范围大, 但是其可用频带较窄。高频段因其衰落快从而导致覆盖范围小, 但是其可用频带非常宽, 高达数百兆赫兹<sup>[2-3]</sup>。这也使得 5G 将面临高低频协同组网的部署场景。

在 5G 高低频协同组网部署场景下, 如果用户基于传统的参考信号接

收稿日期: 2018-03-15

网络出版日期: 2018-05-14

基金项目: 国家科技重大专项 (2017ZX03001012); 北京市自然科学基金 (L172033); 国家自然科学基金 (61471068); 111 基地 (B16006)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 03-0010-05

**摘要:** 针对 5G 高低频协作组网部署场景, 提出了一种针对该场景的小区范围扩展优化技术, 目标是匹配高低频协作组网时高频小小区与低频宏小区的不同资源分配方式。该技术可以提高 5G 高低频协作组网时的系统吞吐量和能量效率。与传统基于参考信号接收功率 (RSRP) 的小区范围扩展不同, 基于参考信号接收速率 (RSRR) 的新型小区范围扩展技术, 可以有效提高系统吞吐量和能量效率。

**关键词:** 高低频协作组网; 小区范围扩展; RSRP; RSRR; 系统吞吐量; 能量效率

**Abstract:** In this paper, a new dynamic cell range expansion optimization technology for 5G multi-frequency cooperative networks is proposed, aiming at matching different resource allocation methods between macro cell with low frequency and small cell with high frequency. This technology can improve the network throughput and energy efficiency. The reference signal received rate (RSRR)-based cell range expansion (CRE) technology which is different from traditional reference signal received power (RSRP)-based CRE is proposed. The simulation results show that under 5G multi-frequency cooperative networks, the proposed RSRR-based CRE has better performance over traditional RSRP-based CRE in system throughput and energy efficiency.

**Keywords:** multi-frequency cooperative networks; CRE; RSRP; RSRR; system throughput; energy efficiency

收功率 (RSRP) 准则进行接入, 由于高频小小区发射功率受限, 会出现小小区覆盖范围过小, 其充足的频带资源无法得到充分利用, 从而导致高频段资源无法得到充分利用的问题。一种有效的解决方案即是对小小区进行覆盖范围扩展, 使其可以接纳更多的用户从而能够解决高频段带宽资源过剩的问题<sup>[4-5]</sup>。文献[6-7]证明了小区范围扩展技术能提升整体网络能量效率; 文献[8]中, 作者提出了一种异构网下增强型自适应控制小

区范围扩展技术; 文献[9]中, 作者说明了传统同频组网下执行小区范围扩展技术的缺点为: 扩展小区的小区边缘用户因其距离干扰基站很近所以信道条件非常差, 而高低频协作组网场景恰好可以避免这个问题。

传统的小区范围扩展技术是在大多都基于 RSRP 下执行的<sup>[10-12]</sup>, 也就是通过给用户的接收功率添加偏置值使其从一个小区迁移到另一个小区。RSRP 准则是根据用户的接收功率来判决用户选择接入小区, 但是由

于在 5G 高低频协作组网下低频宏小区和高频小小区存在带宽资源不对等的情况,会出现用户接收来自小小区的功率较宏小区小,但是小小区提供的带宽比宏小区大,最终导致接入小小区的数据速率反而比宏小区大的情况,所以传统的基于 RSRP 的小区范围扩展方案可能不再适用。本文提出了一种基于参考信号接收速率(RSRR)的小区范围扩展的优化方案,在传统 RSRP 准则接入的基础上对小区范围进行扩展,旨在通过基于 RSRR 的小区范围扩展方案将原来处于高频小小区边缘的用户从低频宏小区迁移到高频小小区,进而充分利用高频段的大带宽优势,为用户提供更高的数据速率。与传统的基于 RSRP 的小区范围扩展方案相比,基于 RSRR 的小区范围扩展方案使得高频小小区边缘用户的吞吐量有明显提升,同时可以使网络在能量效率指标上有较大提升。

## 1 系统模型

针对 5G 高低频协作组网的部署场景,我们提出部署的基站类型包括采用 4G 技术的低频宏小区基站和 5G 技术的高频小小区基站。参照第 3 代合作伙伴计划(3GPP) TR36.872 标准规定:宏小区基站以传统蜂窝状分布,小小区基站是随机分布在宏小区基站覆盖范围内的,并且两个小小区基站之间的距离大于 105 m,其中宏小区基站与小小区基站的数目比为固定值。

系统中的用户分为 2 类:第 1 类为静止用户,以特定半径和数量随机分布在小小区基站附近;第 2 类为移动用户,以特定数量随机分布在宏小区基站覆盖范围内。第 1 类用户可能接入低频宏小区或高频小小区,但由于小小区覆盖范围较小,所以处于移动状态的第 2 类用户为了避免频繁切换,仅接入宏小区基站。其中,宏小区基站和小小区基站都以各自的固定功率发射给每个用户,并且同

时考虑了根据 RSRP 准则进行接入和根据 RSRR 准则进行接入的情况。5G 高低频协作组网的部署场景基于控制平面与数据平面分离的双连接技术<sup>[13]</sup>,控制平面由宏小区基站负责维护,而数据平面则存在于宏小区基站和小小区基站。5G 高低频协作组网示意图如图 1 所示。

## 2 5G 高低频协作组网场景下小区范围扩展优化方案

### 2.1 传统的基于 RSRP 的小区范围扩展方案

4G 长期演进(LTE)/LTE-Advanced 及其演进系统中的小区接入过程基于下行链路接收信号强度(DL-RSS),接收信号主要取于发送端和接收端之间的距离,即:

$$RSS_i(|x-y|) = \gamma_i P_i G_i A_i |x-y|^{-\alpha_i} \quad (1)$$

其中,  $i=m,s$  分别表示低频宏小区和高频小小区,  $x$  和  $y$  分别表示发送端和接收端的位置,  $| \cdot |$  是  $x$  和  $y$  之间的欧几里得距离,  $P_i$  为基站端的发射功率,  $G_i$  为天线增益,  $A_i$  为衰落常

量,  $\alpha_i$  为衰落因子,  $\gamma_i$  表示小区选择偏置值(CSO),本文只对高频小小区范围进行扩展,因此令  $\gamma_m=1$ 。若基站向所有用户发射时采用相同功率,则可以推导得到接入高频小小区的用户的范围,由  $RSS_m|x-y| = RSS_s|x-y|$  可以得到:

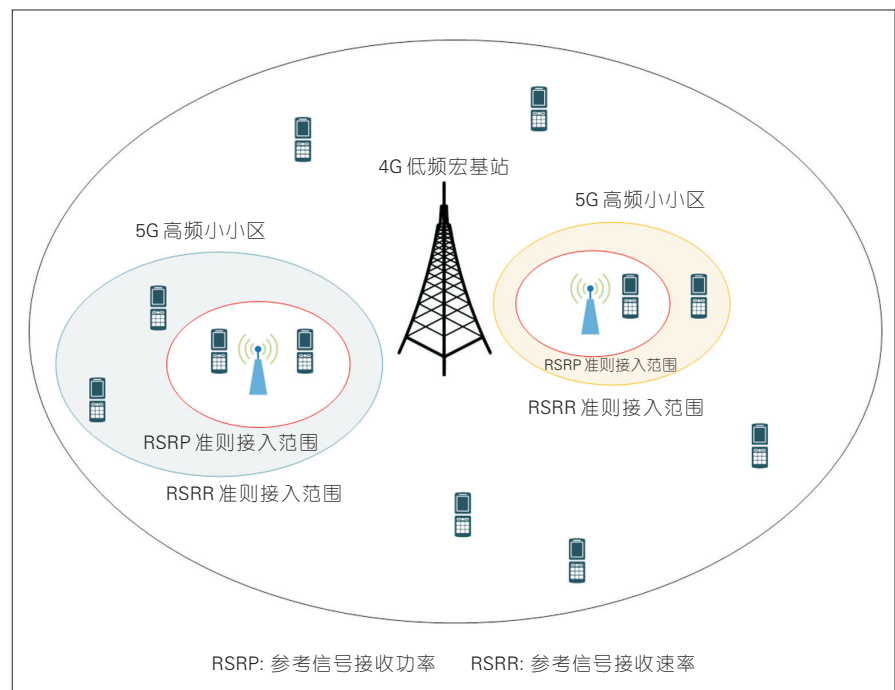
$$\begin{aligned} P_m G_m A_m (x^2+y^2)^{-\frac{\alpha_m}{2}} &= \gamma_s P_s G_s A_s [(x-r_i)^2+y^2]^{-\frac{\alpha_s}{2}} \\ \Rightarrow \frac{\gamma_s P_s G_s A_s}{P_m G_m A_m} (x^2+y^2)^{\frac{\alpha_m}{2}} &= [(x-r_i)^2+y^2]^{\frac{\alpha_s}{2}} \quad (2) \\ \Rightarrow \left( \frac{\gamma_s P_s G_s A_s}{P_m G_m A_m} \right)^{\frac{2}{\alpha_m}} (x^2+y^2)^{\frac{\alpha_m}{\alpha_m}} &= (x-r_i)^2+y^2 \end{aligned}$$

令  $\alpha_m \approx \alpha_s = \alpha$ , 可以将式(2)近似为:  $\hat{P}(x^2+y^2) = (x-r_i)^2+y^2$ , 其中  $\hat{P} = \left( \frac{\gamma_s P_s G_s A_s}{P_m G_m A_m} \right)^{\frac{2}{\alpha}}$ , 又因为  $\hat{P}$  远小于 1, 因此可将式(2)化简得到:

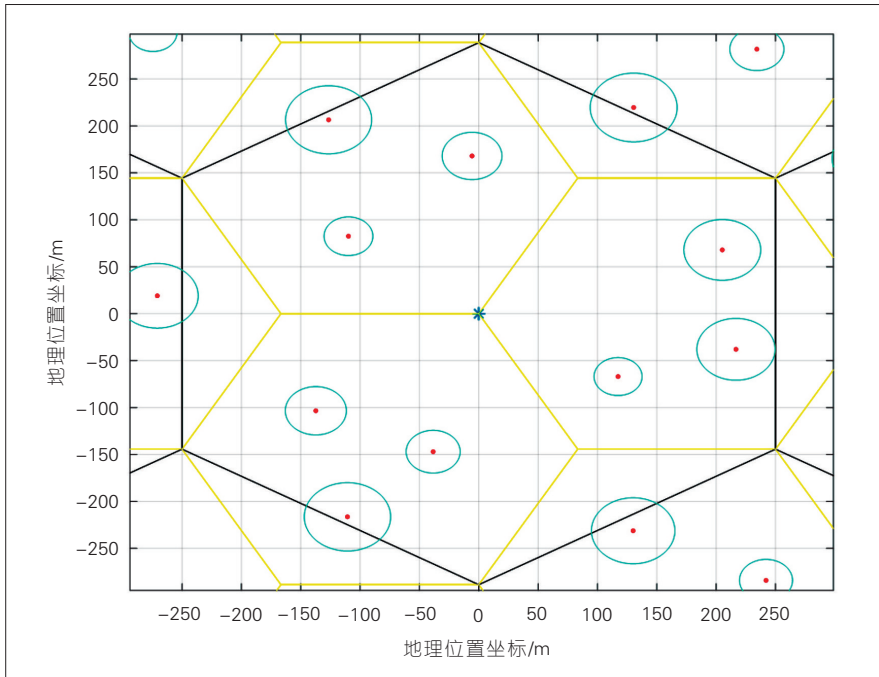
$$\left( x - \frac{r_i}{1-\hat{P}} \right)^2 + y^2 = \frac{r_i^2 \hat{P}}{(1-\hat{P})^2} \quad (3)$$

也就是说,高频小小区的覆盖范围是以小基站  $i$  为圆心,半径  $R_i \approx \sqrt{\hat{P}} r_i$  的圆。

如图 2 所示,其中星号为宏小区



▲ 图 1 5G 高低频协作组网示意



▲图2 5G 高低频协作组网场景下高频小小区覆盖范围

基站,红色点为小小区基站,浅蓝色圆形为小小区覆盖范围。可以看出:距离基站越近的小小区的覆盖范围越小。由公式可以推出:在功率均分的情况下,5G 高低频协同组网场景下的小小区基站覆盖范围是以小小区基站为中心的圆,小小区的覆盖范围会随着小区选择偏置值的增大而增大。

### 2.2 基于RSRR的小区范围扩展优化方案

扩展范围内的用户的信干噪比(SINR)条件会比较差,但是通过高频段较大可用带宽的弥补,该类用户接入高频小小区的吞吐量相比接入低频宏小区会有所提升,通过小区范围扩展技术能够提升网络性能。传统的基于RSRP的小区范围扩展技术只考虑用户的接收功率,不考虑来自其他用户的干扰。随着用户设备的增多,干扰情况也变得更加复杂,因此5G 高低频协作组网下基于RSRR的小区范围扩展技术可能不再适用。5G 高频小小区将使用的大规模多进多出(MIMO)技术能对用户的定

位更加精确,因此我们此处假设基站了解所有用户的信道条件。基于此,我们提出了一种基于RSRR的小区范围扩展方案。

用户接收到来自低频宏小区和

高频小小区的数据速率分别如下:

$$R_m = B_m \log_2 \left( 1 + \frac{P_m G_m A_m |x - y_i|^{\alpha_m}}{\sum_{j=1, j \neq i}^M P_m G_m A_m |x - y_j|^{\alpha_m} + N_m} \right)$$

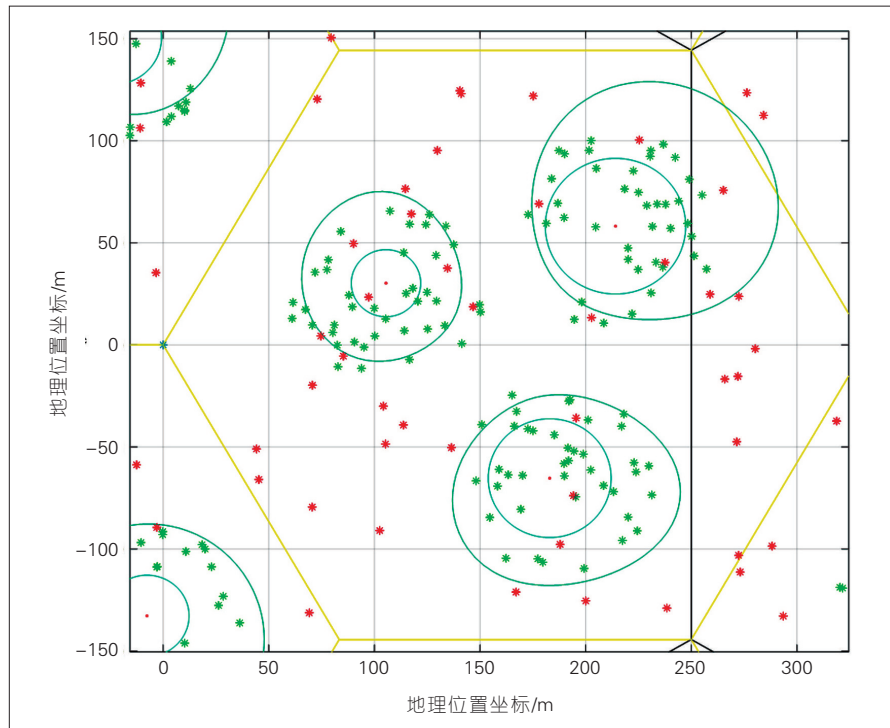
$$R_s = B_s \log_2 \left( 1 + \frac{P_s G_s A_s |x - y_i|^{\alpha_s}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N P_s G_s A_s |x - y_j|^{\alpha_s} + N_s} \right)$$

令  $R_m = R_s$ , 可以得到式(4):

$$B_m \log_2 \left( 1 + \frac{P_m G_m A_m |x - y_i|^{\alpha_m}}{\sum_{j=1, j \neq i}^M P_m G_m A_m |x - y_j|^{\alpha_m} + N_m} \right) = B_s \log_2 \left( 1 + \frac{P_s G_s A_s |x - y_i|^{\alpha_s}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N P_s G_s A_s |x - y_j|^{\alpha_s} + N_s} \right) \quad (4)$$

根据式(4),我们可以得到用户接收到来自低频宏小区和高频小小区数据速率相等的轨迹,每个特定的高频小小区都有其特定的轨迹。如图3所示,其中绿色的点为静止用户,红色的点为移动用户,圆形为基于RSRP接入的高频小小区的覆盖范围,圆形外的闭合轨迹为基于RSRR接入的高频小小区的覆盖范围。

通过对小区范围进行扩展,小小区能够服务更多用户。小小区扩展



▲图3 5G 高低频协作组网场景下的等RSRR轨迹

区域的用户分为2类:第1类用户是更接近干扰基站,第2类是远离干扰基站。与传统基于RSRP的小区范围扩展技术不同,基于RSRR的小区范围扩展技术能够考虑每个用户的SINR条件,从而决定是否将用户从宏小区迁移到小小区。基于RSRR的小区范围扩展优化方案具体实施方式为:对小区和用户建模,划分出接收功率相等和接收速率相等的区域,如果用户处于这两个区域之间,那么由宏小区基站控制将这两个区域之间的用户从宏小区迁移到小小区中。

### 3 性能评估及仿真结果

我们参照3GPP TR 36.872标准搭建系统级仿真平台,低频宏小区信道模型参考标准TR 36.814,高频小小区信道模型参考论文<sup>[4]</sup>。宏小区是以传统蜂窝网络状分布,小小区以固定数量在宏小区覆盖范围内随机分布。用户分布分为2类:第1类为静止用户,以特定半径和数量随机分布在小小区基站附近;第2类为移动用户,以特定数量随机分布在宏小区基站覆盖范围内,具体的仿真参数如表1所示。

我们对吞吐量性能进行仿真,循环次数为100次,CDF曲线如图4所示,其中横坐标为吞吐量,纵坐标为概率。CSO=0的曲线表示基于RSRP接入下的所有用户吞吐量情况,可以看出5G高低频协作组网下用户的数据速率存在较大差异。这是由于低频宏小区和高频小小区带宽不对等造成的,但随着CSO的增大,这种差异会逐渐缩小,但是仍然存在。基于RSRR的小区范围扩展方案相比基于RSRP的小区范围扩展方案有更好的性能,用户间的数据速率差异不大。

另外,不同偏置值能不同程度地影响网络性能,我们对不同偏置值下的吞吐量和能量效率性能分别进行仿真,功率偏置值取值分别为0,2,4,6 dB,仿真结果如图5所示。图中横坐标CSO表示功率偏置值,纵坐标

为吞吐量。其中,当偏置值开始增加时,基于RSRP的小区范围扩展方案的吞吐量逐渐增加,随着偏置值继续增大,吞吐量的增长变缓慢。基于RSRR的小区范围扩展方案下的吞吐量相比基于RSRP的小区范围扩展方

案有明显提升。

基于RSRP的小区范围扩展方案与基于RSRR的小区范围扩展的能量效率对比如图6所示,其中横坐标CSO表示功率偏置值,取值分别为0,2,4,6 dB,纵坐标为能量效率。因为

▼表1 仿真及测试参数

	宏小区	小小区
载波频率/ GHz	2	28
发射功率/ dBm	46	30
天线增益/ dBi	14	49
路损模型(R in km)	128.1+37.6lgR	184.4+41lgR
路损因子	3.76	4.1
带宽/ MHz	10	100
部署比例	1	9
用户分布/个	60	40

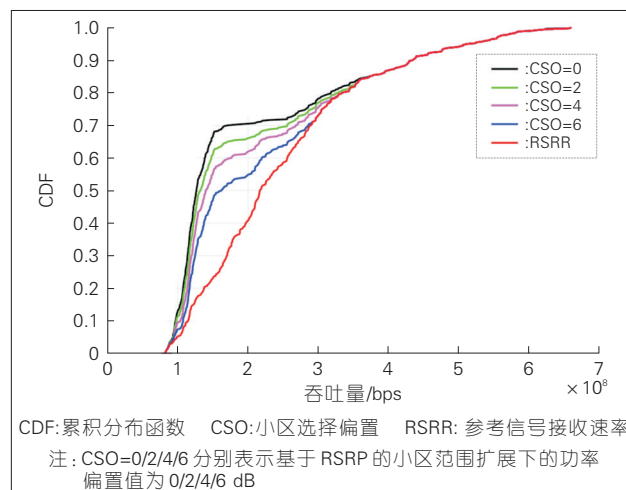


图4 基于RSRP和基于RSRR的CRE优化方案接入用户的吞吐量CDF曲线

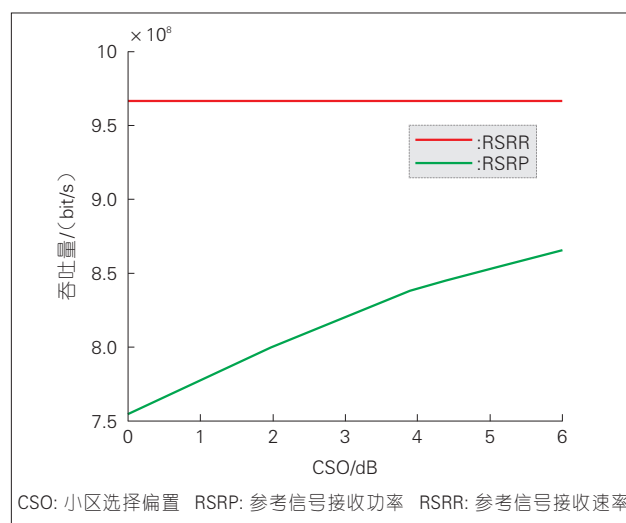


图5 基于RSRP和基于RSRR的CRE优化方案下的吞吐量对比图

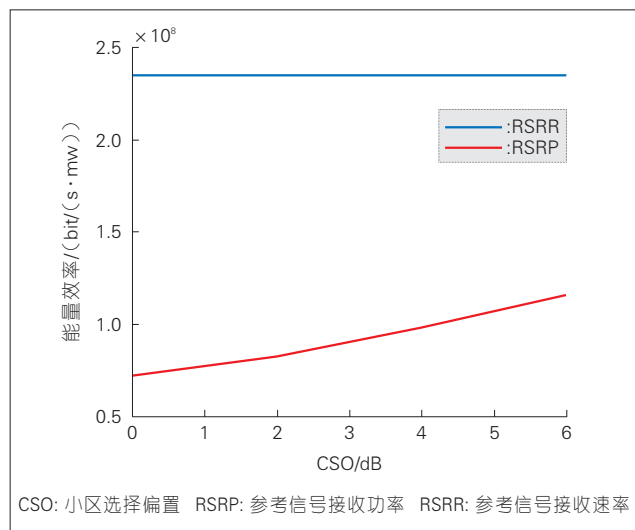


图6  
基于RSRP和基于RSRR的CRE优化方案下的能量效率对比图

高频小小区的发射功率较小,但由于其带宽资源丰富,则可以为用户提供较高的数据速率,因此基于RSRR的小区范围扩展方案能够使得原本根据RSRP方案无法接入小小区的用户也能接入小小区。对于用户而言,数据速率上不会有下降,而基站的总发射功率下降,因此能使得能量效率有较大提升。

#### 4 结束语

小区范围扩展技术在之前的研究中大多数是以减轻宏小区负载为目的,而且小区边缘用户的信道条件比较差。针对5G高低频协作组网场景,使用小区范围扩展技术没有同频组网边缘用户受到强干扰的缺点,而且由于5G高频小小区频率资源充足能够容纳大量用户。因此,小区范围扩展技术在5G高低频协作组网下能使网络性能得到更大提升。文章中,我们提出了一种基于RSRR的小区范围扩展方案,分析了该方案相比传统基于RSRP的小区范围扩展方案的优势,并且仿真验证了所提方案相比传统方案在吞吐量和能量效率上有所提升。

#### 致谢

本文在撰写过程中得到北京邮电大学移动互联网安全技术国家工

程实验室索光霁、许晓东的大力支持,在此表示感谢!

#### 参考文献

- [1] SEMIARI O, SAAD W, DAW Z, et al. Matching Theory for Backhaul Management in Small Cell Networks with mmWave Capabilities[C]//International Conference on Communications (ICC). USA: IEEE, 2015: 3460–3465. DOI:10.1109/ICC.2015.7248860
- [2] MUHAMMAD N A, CHEN H, BAO W, et al. Multi-Cell Coordination via Disjoint Clustering in Dense Millimeter Wave Cellular Networks[C]//International Conference on Communications (ICC). USA: IEEE, 2017:1–6. DOI:10.1109/ICC.2017.7997441
- [3] DESTINO G. System Analysis and Design of mmW Mobile Backhaul Transceiver at 28 GHz[C]//European Conference on Networks and Communications (EuCNC). USA: IEEE, 2017:1–5. DOI:10.1109/EuCNC.2017.7980768
- [4] NAGANUMA N, NAKAZAWA S, SUYAMA S, et al. Adaptive Control CRE Technique for eICIC in HetNet[C]//International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). USA: IEEE, 2016:4–6. DOI:10.1109/ICUFN.2016.7536967
- [5] ZHANG Y. Energy Efficiency Analysis of Heterogeneous Cellular Networks with Extra Cell Range Expansion [J]. IEEE ACCESS, 2017, (5):11003–11014. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2713814
- [6] JIANG J, PENG M, LI L, et al. Energy-Efficient Resource Allocation in Heterogeneous Networks with Cell Range Expansion [J]. IET Networks, 2015, 4(4):209–219. DOI:10.1049/iet-net.2014.0003
- [7] ZHOU L, XIAO L, LI J, et al. Path Loss Model Based on Cluster at 28 GHz in the Office and Corridor Environments[C]//Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). USA: IEEE, 2016:1–5. DOI:10.1109/VTCFall.2016.7881148
- [8] NAKAZAWA S, NAGANUMA N, OTSUKA H. Enhanced Adaptive Control CRE in Heterogeneous Networks[C]//Consumer Communications & Networking Conference

(CCNC). USA: IEEE, 2017:645–646. DOI:10.1109/CCNC.2017.7983206

- [9] BHUVANESHWARI P T V, INDU S, SHIFANA N L, et al. An Analysis on Cell Range Expansion in 4G LTE Networks[C]//International Conference on Signal Processing, Communication and Networking (ICSCN). USA: IEEE, 2015:1–6. DOI:10.1109/ICSCN.2015.7219824
- [10] 谭志远,陈磊,李曦,等.异构蜂窝网络中用户非均匀分布的CRE和eICIC优化[J].北京邮电大学学报,2017,2(40):11–15
- [11] YANG K, WANG P, HONG X, et al. Joint Downlink and Uplink Network Performance Analysis with CRE in Heterogeneous Wireless Network[C]//Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). USA:IEEE, 2015:1659–1663. DOI:10.1109/PIMRC.2015.7343565
- [12] JIANG H. System Utility Optimization of Cell Range Expansion in Heterogeneous Cellular Networks[C]//International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). USA:IEEE, 2016: 412–417. DOI:10.1109/ICCSN.2016.7586694
- [13] MIDDLETON R H, WIGREN T, LAU K, et al. Data Flow Delay Equalization for Feedback Control Applications Using 5G Wireless Dual Connectivity[C]//Vehicular Technology Conference (VTC Spring). USA:IEEE, 2017: 1–7. DOI:10.1109/VTCSpring.2017.8108608
- [14] MACCARTNEY G R, RAPPAPORT T S, SUN S, et al. Indoor Office Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models at 28 and 73 GHz for Ultra-Dense 5G Wireless Networks [J]. IEEE Access, 2015,(3):2388–2424. DOI:10.1109/ACCESS.2015.2486778

#### 作者简介



方思赛,北京邮电大学移动互联网安全技术国家工程实验室硕士研究生在读;主要研究方向为高低频组网小区范围扩展技术和高低频组网下部部署密度优化技术。



魏品帅,中华人民共和国公安部科技信息化局调研员、副处长;主要研究领域为计算机算法研究;组织参与公安部项目近10项;已发表论文2篇。



刘聪,中国移动通信有限公司研究院副主任研究员;主要研究领域为蜂窝物联网、家庭物联网和工业互联网;获得4项科研成果奖;已发表论文10余篇。