



5G 演进：网络控制直放站

张楠^{1,2}, 栗子阳^{1,2}, 李儒岳^{1,2}, 曹伟^{1,2}

(1. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 广东 深圳 518055;
2. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 射频直放站在 2G、3G 和 4G 的部署均用于增强蜂窝网络的覆盖。虽然传统射频直放站提供了一种经济高效的方法用于扩展网络覆盖范围, 但其仅能依照固定配置对信号执行放大和转发操作, 无法依照网络调度和控制对该行为进行灵活调整。介绍了 5G 演进中的网络控制直放站, 作为对传统射频直放站的增强, 网络控制直放站具有从网络侧接收针对直放站控制信息的能力, 并依据此信息以更有效的方式执行其放大和转发操作, 包括实现信号在空间域的定向增强、直放站的动态使能和简化的网络集成。

关键词: 网络控制直放站; 直放站控制信息; 5G 演进

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi:10.11959/j.issn.1000-0801.2022047

5G-Advanced: network-controlled repeater

ZHANG Nan^{1,2}, LI Ziyang^{1,2}, LI Ruyue^{1,2}, CAO Wei^{1,2}

1. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China
2. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China

Abstract: Radio frequency (RF) repeaters have been deployed in 2G, 3G and 4G to improve the coverage of cellular system. While it is treated as a cost effective solution to extend the network coverage, conventional RF repeaters simply perform amplify-and-forward operation based on the set-up without the capability of doing flexible adjustments based on control and scheduling indication from network. An overview on the new study item in 5G-Advanced was given, i.e. network-controlled repeater. As an enhancement over conventional RF repeaters, network-controlled repeater will enable the repeater to receive and process repeater control information from the network and perform its amplify-and-forward operation in a more efficient manner including the directive forwarding of the signal, dynamic on-/off of transmissions and receptions, and simplified network integration.

Key words: network-controlled repeater, repeater control information, 5G-Advanced

0 引言

蜂窝网络的覆盖是运营商在系统部署和网络性能优化时关注的核心指标, 也是制约连续广域

高速数据服务的重要因素。尤其是由于频域资源的短缺, 通信系统所能使用的频段资源逐步向中高频拓展, 如新空口 (new radio, NR) 系统 FR1 频段的部署包含 3.5 GHz, 且大量使用 FR2 频段



的网络工作在 28 GHz、39 GHz，甚至可以达到 60 GHz^[1]。随着工作频段的提升，无线信道不可避免地会遭受更高的路径损耗，极易受到障碍物（如建筑物）的阻挡^[2]，并存在散射、绕射以及高穿透损耗等现象^[3-5]，因此覆盖性能面临与传统的无线系统相比更大的挑战。

为了增强 5G 的系统性能，业界针对覆盖问题引入了不同层次的增强。

从信号处理的角度，针对当前通信系统中的覆盖受限信道，通过 3GPP Release 17（简称 Rel-17）NR 覆盖增强课题的研究^[6]，确定了通过增加重复次数以及支持在多个时隙上的传输块处理等方式提升上行数据和控制信号的强度。有研究表明^[7]，不同的覆盖增强的方式可以对上行信号产生 0.7~3 dB 的增益。此外，3GPP Rel-17 增加了对跨物理上行共享信道（physical uplink shared channel，PUSCH）重复的解调参考信号（demodulation reference signal，DM-RS）绑定以及对动态物理上行链路控制信道（physical uplink control channel，PUCCH）重复因子指示信令的支持机制^[8]。

从网络拓扑设计的角度，工业界和学术界也对多类型传输节点进行了研究，以实现网络的密集部署，从而提升系统性能和移动运营商网络部署的灵活性。

- 早在 3GPP Rel-10 中，中继（relay）就被纳入了 3GPP 标准^[9]。在 Rel-10 中支持的中继对 UE 是非透明的，这些中继拥有自己的物理标识（physical ID），并向 UE 发送所有下行物理信道，从 UE 的视角在网络中部署的中继节点与常规 eNB（evolved NodeB）具有相同功能^[10]。
- 在 3GPP Rel-16/ Rel-17 中引入了集成接入和回传（integrated access and backhaul，IAB）^[1,11]，运营商利用其拥有的部分无线频段实现回传，减少了密集部署下的光纤需求。IAB 节点的功能与普通基站一致，

可以通过对接入和回程数据进行全协议栈处理，完成对网络拓扑的有效拓展。

- 文献[12]依照节点设备本身的复杂度以及转发节点包含的协议栈等级定义的不同类型中继器也在网络中有所部属，且在 3GPP Rel-17 中的研究主要集中在层 2/层 3 中继。具体来看，层 2 中继对接收的数据块进行解码和重新编码，由于这种附加的信号处理，层 2 中继无法同时接收和发送信号，转发信号存在一定的时延，而且层 2 中继无法利用业务流的服务质量（quality of service，QoS）区分其转发的优先级。层 2 中继的优势在于噪声和干扰不会被转发。层 3 中继是更高级别的中继，它在 IP 层转发用户面流量数据包，可以支持 QoS 调度、缓存管理、流量控制、增强切换等功能，可以认为是自回程的基站。相应地，层 3 中继的复杂度和成本也较高。
- 除了上述具备对用户数据进行处理并转发能力的节点，在 5G 应用下，工业界也对传统的射频直放站进行了研究。由于该类节点仅具备放大和转发其所接收到信道的能力，因此其实现复杂度和成本较低。基于这些特征，传统射频直放站在 2G、3G 和 4G 中均有部署，以改善常规蜂窝小区的整体覆盖。然而，传统的射频直放站不但会转发和放大信号，同样也会放大网络的干扰和噪声，针对该类直放站特征，学术界对其网络性能的影响展开了分析^[14-18]。

本文研究内容是在 3GPP Rel-18 中引入的网络控制直放站^[19]，作为对传统射频直放站的增强，具有从网络侧接收和处理直放站控制信息的能力。该机制允许网络控制直放站以更有效的方式执行其放大和转发信号操作，包括实现信号在空间域的定向增强、直放站的动态使能和简化的网络集成。

1 网络控制直放站总体分析

1.1 直放站的功能和结构

传统的直放站主要通过射频模块完成对信号的放大和转发操作，射频直放站结构如图 1 所示。主要组成部分包括收/发端天线功放（包括低噪声）和滤波器。在时分双工（time division duplex, TDD）模式下，直放站上下行链路的开关键控可以依照网络部署进行预先设置。此外，部分直放站也有进行收发信号移频的功能^[20]，可以进一步按实际传输需求进行收/发频点匹配，提升传输距离和降低干扰。

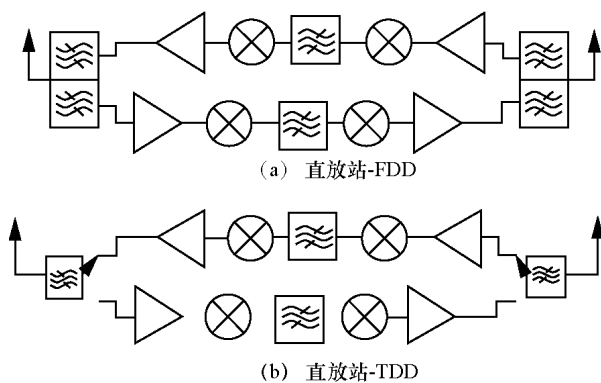


图 1 射频直放站结构

网络控制直放站，除了能够对网络内基站和用户的数据进行简单的放大转发外，也存在与网络之间的控制信息的交互。网络控制直放站结构如图 2 所示，网络控制直放站主要由两个功能模块——控制单元和转发单元组成，并通过控制链路（指网络控制直放站与基站进行通信的链路，该链路能够完成直放站与基站间的信息交互）和转发链路（指网络控制直放站对于基站/终端数据通过射频接收-放大-转发操作的链路，网络控制直放站对于该链路所承载内容不进行任何处理）完成相关功能。

- 控制单元：主要作用包括接收与解调基站下发的控制信息，并且根据控制信息调整转发单元的配置。控制单元可以按需生成

直放站对网络侧的传输信号。图 2 中，控制链路 1 为用于基站下发控制信息至网络控制直放站，而控制链路 2 则可用于传递控制单元发送至基站的上行信息，如随机接入信号和针对基站下发信息的反馈信号等。

- 转发单元：主要作用为依照相应的配置和指示信息完成对接收数据的放大转发操作。与传统直放站一样，该行为包含了两条不同方向的转发链路。图 2 中，转发链路 1 和转发链路 3 构成了一条完整的基站到 UE 的转发链路，而转发链路 2 和转发链路 4 构成了一条完整的 UE 到基站的转发链路。

在这两个模块的共同作用下，基站可以通过控制链路 1 下发的控制信息，以不同的控制粒度调整转发单元的配置和工作状态。例如，控制链路 1 的控制信息为转发链路 3 所需的波束信息时，网络控制直放站会据此调整转发单元的转发链路 3 所使用的波束实现精准的基站到特定用户的数据转发。

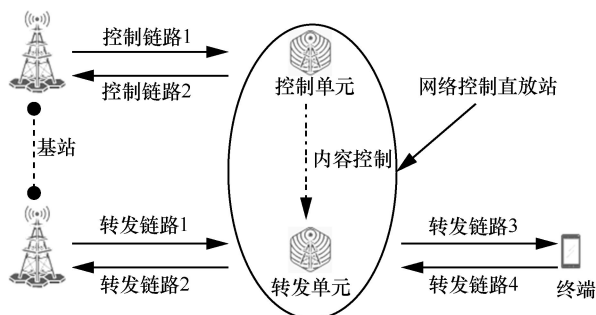


图 2 网络控制直放站结构

1.2 部署场景和假设

关于网络控制的直放站，业内针对其潜在部署场景进行了详细研究并确认其能够灵活适用于 FR1/FR2 频点下的室内外和室外覆盖室内（outdoor to indoor, O2I）场景。在后续研究评估中，考虑场景的典型性，会优先考虑 FR2 频段，



以及室外和 O2I 场景。与此同时,考虑直放站以轻量化协议栈为主要设计目标,因此重点关注单跳固定网络控制直放站部署方式。

此外,考虑目前 5G 网络建设和商用化日趋成熟,为了兼容网络现有终端,因此确定网络控制直放站相关的增强需对终端透明。在该假设下,作为对现有无线覆盖的拓展,直放站的部署和使用由运营商主导,通过与现有基站的耦合部署能够提供有效的网络性能增强,并能有效规避由第三方影响(如终端控制直放站模式)导致的网络拥塞的现象。

2 网络控制信息

2.1 网络侧控制信息

网络侧控制信息主要指网络通过图 2 所示控制链路向所关联直放站传输的用于控制直放站运行配置的波束信息、定时信息、TDD 上下行配置信息、开关信息、功控信息。

(1) 波束信息

多天线技术对无线通信网络的性能提升具有重大的作用,尤其是 5G 通信系统设计时,针对中高频通信的特点,创新性地引入了模拟波束成形和波束管理技术。该技术能够使传统通信链路在目标方向获得最大的天线和波束成形增益,并通过空间滤波特性降低干扰。直放站服务一干扰示意图如图 3 所示,传统射频直放站在多天线配置仅能基于网络勘测规划等方式对目标区域实现固定方向或者全向覆盖,提升盲点覆盖但易对其他用户产生干扰。

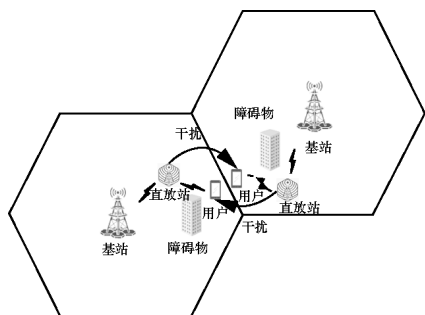


图 3 直放站服务一干扰示意图

在网络控制直放站研究中,进一步引入波束指示信息,以实现针对图 2 所示各链路(如转发链路)最佳波束的指示。通过初步的仿真验证,该特征的引入能够进一步强化直放站部署对网络性能的改善。

(2) 定时信息

传统的设备在通过无线方式接入网络时,需要通过接收检测同步信号等方式完成系统同步和定时信息获取。对网络控制直放站,除了为保障控制链路正常运行(如直放站接入、控制信息接收和上行反馈等)外,也需要研究是否需要额外基站指示信息以完成转发链路的正常维护和运行。

(3) TDD 上下行配置信息

TDD 上下行配置信息主要指示网络中所使用的帧结构信息,如上行、下行以及灵活帧的配置。图 1(b)中,在 TDD 系统中,为了准确完成基站一终端数据的双向转发,直放站系统必须能够准确获知网络 TDD 上下行配置信息。在传统的网络(如 4G)实现中,该项配置一般固定不变,在相应的直放站使用中,通过部署时预设置方式对该配置信息进行固化。在 5G 系统中,引入了对于该配置信息的指示更新机制,因此需要研究相应的机制保证直放站的适配使用,但该机制的必要性主要取决于现网中是否会使用动态 TDD 的配置特征。不同时变等级的更新方案也会对直放站本身的实现复杂度产生影响,在方案设计时需要综合考虑。

(4) 开关和功控信息

图 3 中,传统射频直放站在完成网规部署时无法根据目标服务区域内的用户业务、信道变化等对自身状态完成调整,可能引起不必要的干扰。本文针对网络控制直放站,讨论使能/关闭直放站的转发功能或功率水平的机制,以便降低由直放站部署而引入的干扰。

从直放站应用角度来看,开关和功控信息可以是控制一个或多个网络控制直放站的指示,也可以是对一个直放站的某一个或多个链路的控制。例

如, 为了避免对用户设备的干扰, 又不想影响用户设备到基站的信号强度, 仅对转发链路 3 进行关闭或降低功率, 保持转发链路 2 和链路 4 的开启和功控状态。需要强调的是, 由于网络控制直放站采用透明转发工作模式, 通过转发链路传递的数据(如物理信道)对网络控制直放站均是不可见的, 因此为了完成针对转发信道的功率调整, 现有协议中针对物理信道的功控机制需要增强。

2.2 信令承载

在网络控制直放站系统中, 对传输网络控制信息的信令承载设计主要依照直放站与基站交互功能的定义完成图 2 所示的控制链路的协议栈设计。在现有 5G 通信系统中, 为了完成基站与用户间的数据传输, 需要支持用户面和控制面的完整协议栈(包括无线资源控制(radio resource control, RRC)、介质访问控制(media access control, MAC)和物理层(physical layer, PHY)协议)。对直放站系统而言, 考虑其场景应用的灵活度(如单跳固定部署)、链路信道特征和业务数据量等特征, 并参考内部控制单元实现的复杂度, 其所需的信令配置设计存在进一步简化的空间。当图 2 所示的直放站内部控制单元仅具有有限通信功能, 在信令承载设计时, 可以侧重于采用 O&M(operation and management)完成特定信息的预配置(如配置特定资源位置), 或者简化现有配置信令架构(如裁剪冗余配置参数和功能)等。

3 直放站管理

在现有网络中, 考虑接入网络中的节点所具备的功能, 以及其对无线电接入网(radio access network, RAN)侧调度和核心网功能的影响, 需要采用不同程度的管理(包含识别和鉴权)。网络控制直放站除了具备传统直放站的转发功能外, 还引入了与基站交互的功能, 进而使能网络对直放站的控制。本文对网络控制直放站的管理过程进行研究。

3.1 直放站识别

由于网络控制直放站与传统用户具有不同的调度需求, 以及直放站引入对正常终端调度存在潜在影响, 因此在 RAN 侧(即基站侧)需要完成对直放站的识别。除了基于实现的方式外, 考虑直放站可能采用现有初始接入过程完成网络接入, 对直放站的识别可以在该过程完成, 以降低 RAN 侧对直放站的响应时延。例如, 随机接入机制流程如图 4 所示, 通过四步随机接入和两步随机接入过程完成 RAN 侧识别。

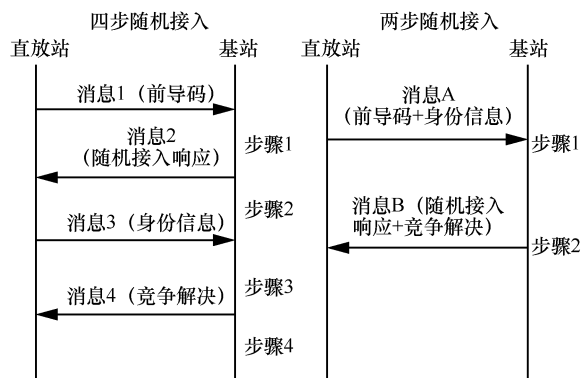


图 4 随机接入机制流程

具体来看, 四步随机接入过程的步骤 1 通过特定配置给网络控制直放站的随机接入时机和/或前导码, 由基站识别接入的设备是否为网络控制直放站。步骤 3 通过特定设计用于网络控制直放站的消息 3 的内容, 使基站识别接入设备。对于两步随机接入过程, 可以在步骤 1 中通过基站接收特定前导码和识别信息, 完成 RAN 侧对直放站的识别。

同时, 由于直放站对基站-用户双向数据的采用透明化转发, 并且直放站本身对网络侧收费等功能均无额外影响, 因此不需要在核心网侧进行识别。

3.2 直放站鉴权

传统的网络节点, 如 IAB、中继等, 需要支持灵活的拓扑调整(支持多跳和移动性)以及对所传输的数据完成不同层级的解调处理,



因此需要在核心网侧实现深度识别和鉴权过程。对直放站系统,考虑其有限的功能,与传统直放站类似,并不存在安全问题,所以不需要支持接入网级别的鉴权过程,相应的识别和鉴权功能均可以在 RAN 侧实现。

4 仿真与分析

引入网络侧控制信息后,新型直放站系统有望克服传统直放站部署引起的局部网络干扰恶化现象,进一步提升网络总体性能。本节在典型蜂窝网络部署模型下,对波束信息的作用进行分析。

4.1 仿真假设和布局

仿真布局示例如图 5 所示,为了在如图 5 (a) 所示的典型蜂窝网络中验证引入网络控制直放站的性能,本文仿真中除了原有基站层,还引入了如图 5 (b) 所示的直放站。其中,直放站建模由两个背靠背面板组成,分别模拟对基站侧的单元(虚线表示该单元法线方向)和用于服务用户的单元(实线表示该单元法线方向)。仿真中,直放站在各服务扇区中均匀分布,传统射频直放站在面向终端侧采用固定方向波束,而网络控制直放站,可以基于基站控制灵活改变其所使用的波束,采用与基站相同方式,对每个用户使用基于波束训练后的服务波束。系统仿真假设见表 1。

4.2 仿真结果及分析

基于前文所述仿真配置,本文评估了直放站部署不同密度的网络性能。下行 SINR CDF 分布如图 6 所示,相比于仅含有宏基站的部署,在引入传统射频直放站和网络控制直放站后,网络侧的信号干燥比(signal to interference and noise ratio, SINR)性能均有提升(尤其是在低 SINR 和中 SINR 区域),随着直放站数目增加,该增益进一步扩大。该结果表明,在 5G 系统尤其高频应用下,直放站系统能够有效弥补网络覆盖空洞。

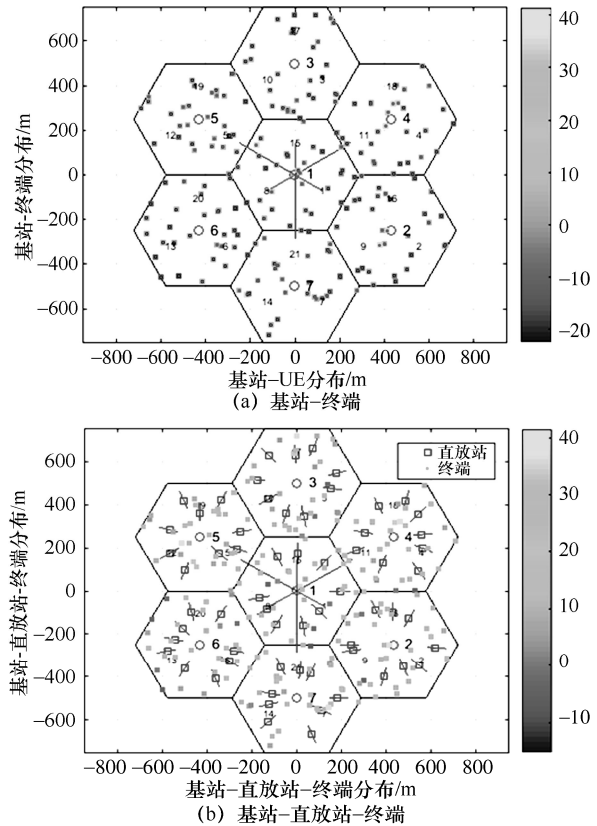


图 5 仿真布局示例

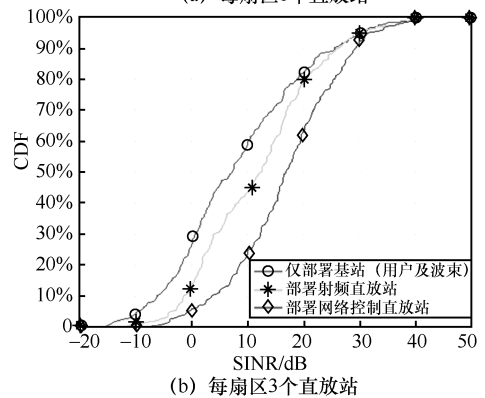
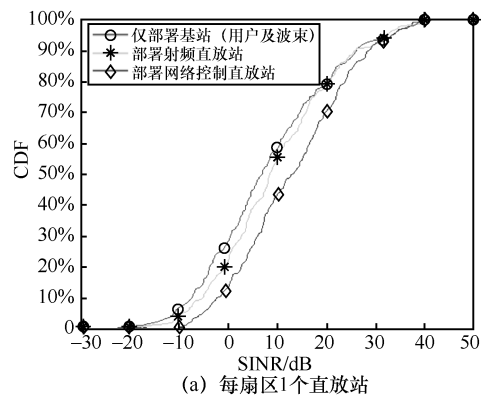


图 6 下行 SINR CDF 分布

表 1 系统仿真假设

参数	配置
布局	蜂窝宏基站 (ISD (intersite distance) = 500 m)
载波	30 GHz
信道	宏基站—用户: 5GCM UMa 宏基站—直放站: 5GCM UMa 直放站—用户: UMi-Street canyon
发射功率	宏基站: 40 dBm 直放站: 33 dBm 终端: 23 dBm
天线配置	宏基站: • 共 256 Tx/Rx 天线阵子, 结构为: $(M, N, P, M_g, N_g) = (4, 8, 2, 2, 2)$ • $(d_H, d_V) = (0.5, 0.5)\lambda$, $(d_{g,H}, d_{g,V}) = (4.0, 2.0)\lambda$ 直放站: • 共 128 Tx/Rx 天线阵子, 结构为: $(M, N, P, M_g, N_g) = (4, 8, 2, 1, 2)$ • $(d_H, d_V) = (0.5, 0.5)\lambda$, $(d_{g,H}, d_{g,V}) = (4.0, 2.0)\lambda$ 终端: • 共 32 Tx/Rx 天线阵子, 结构为: $(M, N, P, M_g, N_g) = (2, 4, 2, 1, 2)$, $d_H=d_V=0.5\lambda$ • $(M_g, N_g) = (1, 2)$; $\Theta_{mg,ng}=90^\circ$; $\Omega_{0,1}=\Omega_{0,0}+180^\circ$; $(d_{g,H}, d_{g,V})=(0,0)$
用户分布	室外均匀分布
业务类型	Full-buffer

注: M_g 指天线阵列一列所用子阵 (panel) 个数 N_g 指天线阵列一行所用子阵 (panel) 个数 $d_{g,H}$ 指子阵 (panel) 间水平间距; $d_{g,V}$ 指子阵 (panel) 间垂直间距; N : 指一个子阵中所含天线阵子的列数; M : 指一个子阵中单列所含同极化振子数; d_H 指天线振子间水平距离 d_V 指天线振子间垂直距离; P 表示极化, $P=1$ 天线阵列单极化 $P=2$ 天线阵列双极化; $(\Omega_{mg,ng}, \Theta_{mg,ng})$ 用来指示第 (mg, ng) 个天线子阵的朝向, 其中 $\Omega_{mg,ng}$ 是该子阵的方位角 (array bearing angle) $\Theta_{mg,ng}$ 是该子阵下倾角 (array downtilt angle)。

进一步, 对比基于传统直放站与网络控制直放站的结果可以看到, 随着引入基站指示的波束信息, 网络侧的 SINR 性能得到明显提升, 其增益值最大可提升 1.2 倍。与此同时, 可以看到在高 SINR 区域, 随着直放站数目的增强, 传统直放站系统的服务链路由于采用固定波束方向, 在对本小区用户进行服务的同时, 容易对该波束覆盖范围内位于其他小区中心的用户产生干扰, 使部分高 SINR 用户性能恶化。在网络控制直放站下, 通过对本小区目标终端服务侧波束的调整, 可以有效抑制波束指向不匹配以及旁瓣泄露等因素造成的干扰恶化, 有效地保障网络性能。

5 结束语

本文介绍了在 5G 演进中引入的网络控制直放站项目的研究内容和基本方向, 并对使能网络侧指示波束信息的新型直放站性能进行了评估。

结果表明, 在 5G 部署下, 直放站系统能够有效提升现有的网络性能, 并且相较于传统直放站, 新型直放站能有效结合基站指示信息, 针对性地优化转发链路的传输, 进一步提升接收信号质量并有效降低干扰。此外, 基于本文的成果和经验, 将为后续演进方向的智能超表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 的研究和标准化提供基础, 更好地发挥智能超表面的优势^[21-25]。

参考文献:

- [1] 3GPP. Study on supporting NR from 52.6 GHz to 71 GHz: TR 38.808[S]. 2021.
- [2] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100: TR 38.901[S]. 2020.
- [3] BAI T, HEATH R W. Coverage and rate analysis for millimeterwave cellular networks[Z]. 2015.
- [4] RAPPAPORT T S, HEATH R W J, DANIELS R C, et al. Millimeter wave wireless communications[Z]. 2014.
- [5] RAPPAPORT T S, XING Y C, KANHERE O, et al. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities



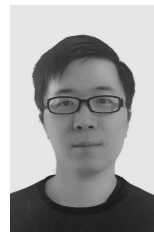
- and challenges for 6G and beyond[J]. IEEE Access, 2019 (7): 78729-78757.
- [6] 3GPP. Study on NR coverage enhancements: TR 38.830[S]. 2021.
- [7] LI N X, YIN H, ZHU J C, et al. Coverage enhancement for 5G NR networks: solutions, specification impact and performance analysis[C]//Proceedings of 2021 7th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 2244-2248.
- [8] EKUDDEN E. 5G evolution toward 5G advanced: An overview of 3GPP releases 17 and 18[Z]. 2021.
- [9] DAHLMAN E, PARKVALL S, SKOLD J. 4G LTE/LTE-advanced for mobile broadband[C]//Fundamentals of Molecular Evolution. New York: Academic Press, 2013.
- [10] 3GPP. Further advancements for eutra (physical layer aspects): TR 36.814[S]. 2010.
- [11] 3GPP. Study on integrated access and backhaul: TR 38.874[S]. 2019.
- [12] HUANG X, ULUPINAR F, AGASHE P, et al. LTE. relay architecture and its upper layer solutions[C]//Proceeding of 2010 IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM, [S.n.:s.l.], 2010.
- [13] 3GPP. NR repeater radio transmission and reception: TR 38.106[S]. 2021.
- [14] BAVAF A M R, XIA H H. Repeaters for CDMA systems[C]//Proceedings of VTC '98.48th IEEE Vehicular Technology Conference. Pathway to Global Wireless Revolution (Cat. No.98CH36151). Piscataway: IEEE Press, 1998: 1161-1165.
- [15] PARK S J, KIM W W, KWON B. An analysis of effect of wireless network by a repeater in CDMA system[C]//Proceedings of IEEE VTS 53rd Vehicular Technology Conference, Spring 2001. Proceedings (Cat. No.01CH37202). Piscataway: IEEE Press, 2001: 2781-2785.
- [16] GARCIA-LOZANO M, ALONSO L, CASADEVALL F, et al. Enhanced analysis of WCDMA networks with repeaters deployment[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(9): 3429-3439.
- [17] KANG Y Y, CHO J H. Capacity of MIMO wireless channel with full-duplex amplify-and-forward relay[C]//Proceedings of 2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2009: 117-121.
- [18] RIIHONEN T, WERNER S, WICHMAN R. Comparison of full-duplex and half-duplex modes with a fixed amplify-and-forward relay[C]//Proceedings of 2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-5.
- [19] 3GPP. New SI: study on nr network-controlled repeaters[S]. 2022.
- [20] MAIER S, SCHLESINGER H, TEMPL W, et al. Long distance and high bandwidth wireless link tests for a 39 GHz to 28 GHz 5G low-cost repeater[J]. 2018 IEEE 5G World Forum (5GWF), 2018: 338-342.

- [21] WU Q Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(1): 106-112.
- [22] LIU R Q, WU Q Q, DI RENZO M, et al. A path to smart radio environments: an industrial viewpoint on reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 25(9): 1-7.
- [23] ZTE. Support of reconfigurable intelligent surface for 5G Advanced: RP-210618[R]. 2021.
- [24] ZTE. Support of reconfigurable intelligent surface for 5G Advanced: RP-212385[R]. 2021.
- [25] 张磊, 陈晓晴, 郑熠宁, 等. 电磁超表面与信息超表面[J]. 电波科学学报, 2021(6): 817-828.
- ZHANG L, CHEN X Q, ZHENG Y N, et al. Electromagnetic metasurfaces and information metasurfaces[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021(6): 817-828.

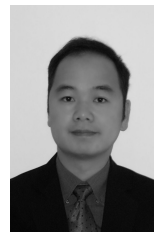
作者简介



张楠(1990—), 男, 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室研究员, 中兴通讯股份有限公司工程师, 主要研究方向为无线信道建模、NOMA、MIMO、NTN 通信网络、超材料及应用等。



栗子阳(1992—), 男, 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室研究员, 中兴通讯股份有限公司工程师, 主要研究方向为非正交多址接入、两步法随机接入、频谱共存共享技术等。



李儒岳(1977—), 男, 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室研究员, 中兴通讯股份有限公司无线标准预研总监、RAN 标准项目总经理, 主要研究方向为 MIMO、mmWave、RIS、AI/ML 等。



曹伟(1977—), 女, 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室研究员, 中兴通讯股份有限公司高级工程师、技术预研无线资深专家, 主要研究方向为无线通信中的物理层技术, 研究场景聚焦于非陆地通信网络、可配置智能表面等。