

异构大规模分布式网络设计与性能评估



Heterogeneous Large-Scale Distributed Network Design and Performance Evaluation

叶新泉/YE Xinquan^{1,2}, 卢光延/LU Guangyan^{1,2},
陈艺翥/CHEN Yijian^{1,2}

(1. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057;
2. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 中国 深圳 518055)
(1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;
2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202401013

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240306.1159.002.html>

网络出版日期: 2024-02-27

收稿日期: 2024-01-15

摘要: 提出了一种面向6G的异构大规模分布式网络 (Het-LDN)。该网络由大量异构的分布式无线节点构成, 具有低成本、低功耗、高性能、易部署和易扩展等特征, 满足未来无线通信的各项需求, 包括实现极致的蜂窝系统容量, 保证超高可行性传输, 支持海量用户同时接入和取得一致性的用户体验。介绍了分层的分布式网络结构与多链路协同传输方案, 并通过仿真实验展示了用户吞吐量的性能优势。认为该网络可成为面向6G的具备强竞争力的商业化解决方案。

关键词: 异构大规模分布式网络; 无线前传; 节点选型; 传输设计; 性能评估

Abstract: A 6G-oriented heterogeneous large-scale distributed network (Het-LDN) is proposed. It consists of a large number of heterogeneous distributed wireless nodes with low-cost, low-power, high-performance, easy-to-deploy, and easy-to-scalable features, which meets the various requirements of future wireless communications, including realizing extreme cellular system capacity, guaranteeing ultra-high feasibility transmission, supporting massive users' simultaneous access, and acquiring consistent user experience. Hierarchical distributed network structure and multi-link cooperative transmission scheme are presented. Simulation experiments demonstrate its performance advantages in terms of user throughput. It is believed that this network can be a highly competitive commercial solution for 6G.

Keywords: heterogeneous large-scale distributed network; wireless fronthaul; node selection; transmission design; performance evaluation

引用格式: 叶新泉, 卢光延, 陈艺翥. 异构大规模分布式网络设计与性能评估 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(1): 74-81. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401013

Citation: YE X Q, LU G Y, CHEN Y J. Heterogeneous large-scale distributed network design and performance evaluation [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(1): 74-81. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401013

未来的接入网络需要成倍地提升容量, 增加服务用户数目, 并满足针对不同用户的服务质量 (QoS), 这对空域自由度提出了更高要求。在多项无线通信技术中, 最具有前景的候选技术为超大规模分布式多输入多输出 (MIMO)。该技术通过部署大量的分布式接入节点来构建大规模分布式网络 (LDN), 从而实现大量用户的接入和传输。近年来, 该技术已引起业界的重点关注^[1-7]。

LDN是大规模MIMO和分布式MIMO的有机结合, 具备极高宏分集增益和干扰抑制等优点: 1) LDN通过大规模分布式节点的部署, 缩短通信距离, 提供更为均匀的无线信道增益, 带来更为一致且高效的通信体验; 2) LDN通过多

节点的联合信号处理与相干传输, 可以有效地降低多用户 (MU) 干扰, 提高系统传输速率; 3) LDN提供多条冗余的传输链路, 满足可靠性与灵活性的传输需求, 有助于实现以用户为中心的协作网络设计。因此, 该网络在机场、火车站、体育馆、智慧工厂等场景有着广阔的应用前景^[8]。为了实现通信系统性能与部署成本的良好折中, 异构网 (HetNet) 被提出^[8]。该网络可由多种不同能力的基站 (宏基站、微基站、皮基站、飞基站等) 构成, 通过优化的宏微混合组网策略, 在满足特定的网络覆盖需求的前提下, 降低网络的部署成本。此外, HetNet在中心基站整体的协调控制下采用先进的干扰管理方案, 既能保证小区的整体

容量，又能提高小区边缘用户的传输速率，改善用户的整体服务体验。

尽管LDN的性能优势显著，但其不同空间位置的同构站点之间只能通过有线光纤建立连接。有线连接不仅对部署的地理空间环境提出较高要求，而且其大规模同构站点和光纤的部署将会导致不可接受的成本。此外，LDN也会面临着前传与回传容量受限等问题^[4]。虽然HetNet对于上述情况具备一定的弥补特性，但仍需要考虑复杂的多站点干扰管理和资源分配等方案。另外，较高的运营成本和较低的灵活性也是另一制约HetNet大规模应用的重要原因^[9]。因此，本文中，我们将突破LDN和HetNet的限制因素，在接入网侧考虑由两种不同能力的网络节点组成异构大规模分布式网络Het-LDN，并继承上述网络的优势。具体地，第1类网络节点为LDN中的接入点（AP），它与处理单元一同实现宏基站功能；第2类网络节点为具备无线前传能力的各类中继节点（RN），它的大规模部署可扩大网络的覆盖范围，提升容量和数据传输速率。

Het-LDN采用大量低成本RN代替传统LDN中的部分AP，以实现性能与成本的有效平衡，其具体的特征与优势如下：

- 利用大规模分布式节点联合相干传输，保证热点地区的极致容量需求；
- 提供多条不同的有效传输链路，实现超高可靠性的传输目标；
- 采用动态协作传输方案，避免频繁小区切换，保障一致性体验；
- 使用无线前传替代有线前传，显著降低部署难度；
- 支持灵活的网络参数配置，并根据实际环境与业务需求的变化，按需扩展网络节点；
- 通过异构节点的混合组网，在性能、成本、功耗和复杂度之间取得有效平衡。

为此，可综合考虑两类网络节点选型并联合优化传输算法，构成一套完整的低成本、低功耗、高性能、易部署和易扩展的一体化无线通信解决方案。

1 Het-LDN 系统模型

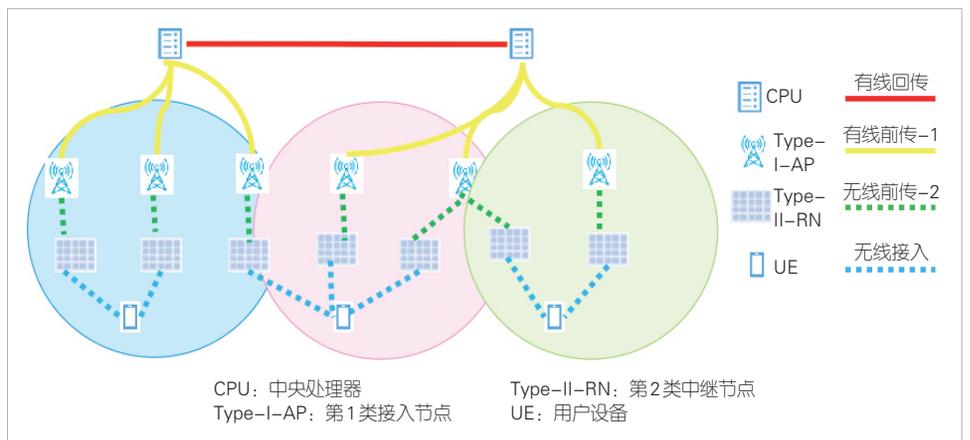
1.1 系统架构与节点选型

Het-LDN 系统架构如图 1 所

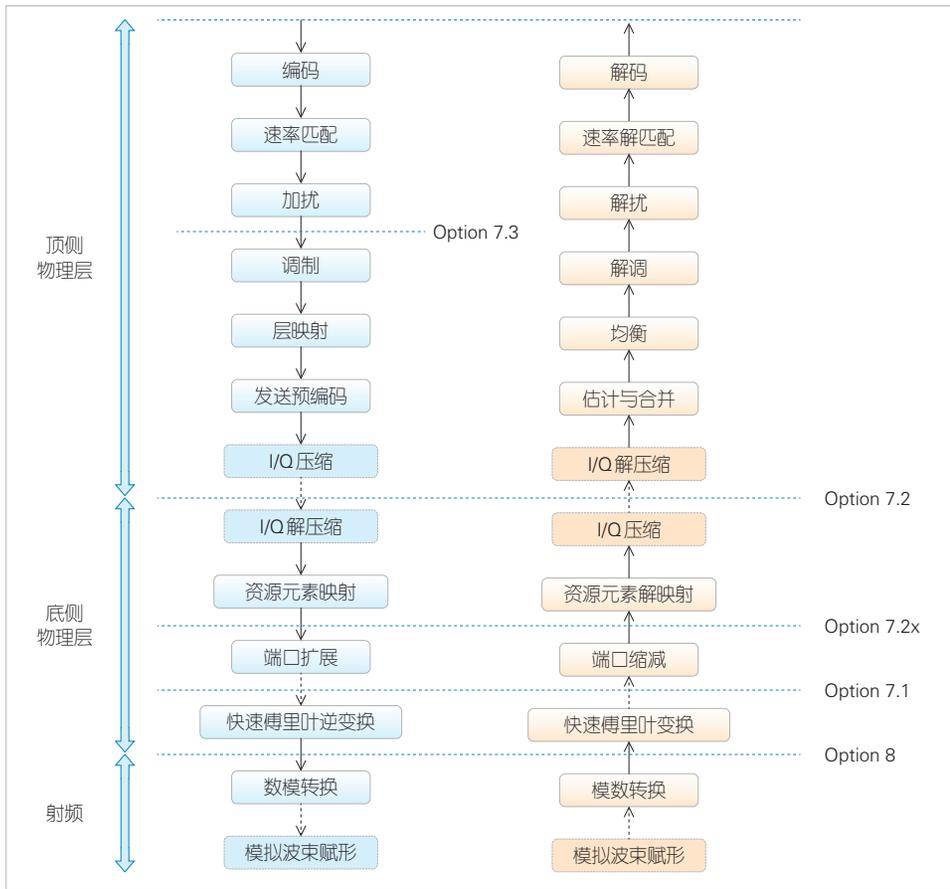
示。Het-LDN 系统由中央处理器（CPU）、Type-I-AP、Type-II-RN 和用户设备（UE）4 类不同的网络节点组成。其中，CPU、Type-I-AP 和 Type-II-RN 至少分别实现 High 物理层（PHY）+ 媒体接入控制（MAC）功能、Low PHY + 射频（RF）功能，以及 RF 功能。不同的 CPU 之间通过有线回传通信（红色实线代表有线回传），CPU 与其所管辖的 Type-I-AP 之间通过有线前传通信（黄色实线代表有线前传-1）。特别地，Type-I-AP 与 Type-II-RN 之间通过无线前传通信（绿色虚线代表无线前传-2）。此外，Type-II-RN 与 UE 还通过无线接入链路通信（蓝色虚线代表无线接入）。

Het-LDN 系统中两类不同网络节点的选型需要综合考虑前传、成本、性能和功耗等多种因素。CPU 与 Type-I-AP 之间的有线前传容量主要由 CPU 最大容量限制、单链路信道质量和并行链路数等因素共同决定。选择合适的 Type-I-AP 在一定程度上可以缓解前传容量受限的问题，且同时在性能、复杂度及成本之间取得有效平衡。Type-II-RN 节点选型则直接影响 Het-LDN 系统的整体性能、成本和功耗。相应地，Type-II-RN 也有多种候选方案。下面我们分别给出 Type-I-AP 与 Type-II-RN 的节点选型过程。

首先考虑 Type-I-AP。根据无线接入网络（RAN）侧所能实现的功能，我们可将现有的接入网功能分离类型分成 Option 8、Option 7.1、Option 7.2x、Option 7.2 和 Option 7.3^[10-11]，不同的接入网功能分离类型如图 2 所示。为了方便起见，上述不同功能分离类型所对应的 Type-I-AP 分别记作 Type-I-1-AP、Type-I-2-AP、Type-I-3-AP、Type-I-4-AP 和 Type-I-5-AP。不同类型的 Type-I-AP 的最显著区别是功能分离的位置，并由此导致前传容量、硬件成本、处理能力、实现复杂度和可扩展性等方面的差异。首先，从前传容量的角度出发，我们可以了解到：越靠近 RF 侧，系统对前



▲图1 Het-LDN系统架构示意图



▲图2 不同接入网功能分离类型示意图

传的要求就越高（如 Type-I-1-AP）；反之，越远离 PHY，系统对前传要求的就越低（如 Type-I-5-AP）。其次，从硬件成本、处理能力和复杂度等方面出发，我们可以发现：Type-I-1-AP 与其他类型的 Type-I-AP 相比，缺少了数字信号处理器（DSP）。因此，Type-I-1-AP 最具备成本优势，但是其只有 RF 功能而不具备快速傅里叶变换（FFT）功能；Type-I-3-AP、Type-I-4-AP 和 Type-I-5-AP 在 AP 侧即可实现本地预编码功能；Type-I-AP 的处理能力与实现复杂度呈正相关关系，如 Type-I-5-AP 的处理能力最强，但其实现复杂度也最高。此外，如果 AP 侧能实现本地预编码，则其具备很好的可扩展性（如 Type-I-3-AP）。根据上述分析，我们可以发现不同类型的 Type-I AP 特征差异显著，其主要特

▼表1 不同候选 Type-I-AP 特征对比

特征	Type-I-1-AP (Option 8)	Type-I-2-AP (Option 7.1)	Type-I-3-AP (Option 7.2x)	Type-I-4-AP (Option 7.2)	Type-I-5-AP (Option 7.3)
功能	射频	射频、快速傅里叶变换	射频、快速傅里叶变换	射频、快速傅里叶变换、第二级预编码、资源元素映射	射频、快速傅里叶变换、第一级和第二级预编码、资源元素映射
容量制约因素	天线端口数	天线端口数	传输层数	传输层数	传输层数
预编码执行侧	CPU	CPU	AP/CPU/AP+CPU	AP/CPU/AP+CPU	AP/CPU/AP+CPU

AP: 接入点 CPU: 中央处理器

征对比可参考表1。进一步地，从表1中候选 Type-I-AP 的各项特征，我们可以得出如下关系：

- 前传容量：Type-I-5-AP < Type-I-4-AP < Type-I-3-AP < Type-I-2-AP < Type-I-1-AP；
- 硬件成本：Type-I-2-AP = Type-I-3-AP = Type-I-4-AP = Type-I-5-AP > Type-I-1-AP；
- 处理能力：Type-I-5-AP > Type-I-4-AP > Type-I-3-AP > Type-I-2-AP > Type-I-1-AP；
- 实现复杂度：Type-I-1-AP < Type-I-2-AP < Type-I-3-AP < Type-I-4-AP < Type-I-5-AP；
- 可扩展性：Type-I-3-AP = Type-I-4-AP = Type-I-5-AP > Type-I-1-AP > Type-I-2-AP。

因此，综合考虑上述前传容量、硬件成本、处理能力、实现复杂度和可扩展性等因素，本文中，我们将 Het-LDN 系统中的 Type-I-AP 优选为 Type-I-3-AP

(Option 7.2x)，下文简称为 AP。

接下来，我们考虑 Type-II-RN。有线前传不仅对部署环境有一定的要求，还将额外增加部署成本。因此，使用无线前传代替有线前传则可以避免上述的不利因素。最早支持无线前传的 RN 节点包括放大转发（AF）中继和解码转发（DF）中继^[12-13]。其中，前者仅能对接收信号进行直接放大，而后者不仅能对接收信号进行放大，还可以进行编解码处理。网络控制中继器（NCR）^[14]是在不增加过多成本的前提下，以 AF 中继为基础，引入额外网络侧的控制信息，使其具备一定的波束控制能力，从而实现更好的覆盖效果。智能超表面（RIS）^[15]由特定的电磁单元组成，通过施加控制信号来实现对空间电磁波的动态调控，从而主动调整无线环

境。进而，根据是否具有功放可将RIS分成被动RIS和主动RIS。为了方便对比不同类型的Type-II-RN特征，我们将AF中继、DF中继、NCR、被动RIS和主动RIS分别记作Type-II-1-RN、Type-II-2-RN、Type-II-3-RN、Type-II-4-RN和Type-II-5-RN。不同的候选Type-II-RN特征对比见表2。进一步地，对比表2中候选Type-II-RN的各项特征，我们可以发现如下关系：

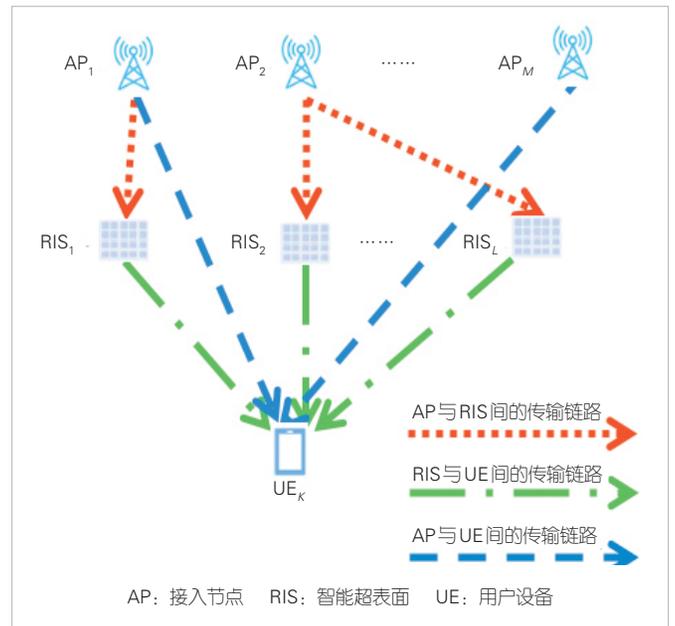
- 硬件成本：Type-II-4-RN<Type-II-5-RN<Type-II-1-RN<Type-II-3-RN<Type-II-2-RN；
- 时延：Type-II-4-RN=Type-II-5-RN<Type-II-1-RN=Type-II-4-RN<Type-II-2-RN；
- 性能：Type-II-2-RN>Type-II-5-RN>Type-II-4-RN>Type-II-3-RN>Type-II-1-RN；
- 功耗：Type-II-4-RN<Type-II-5-RN<Type-II-3-RN<Type-II-1-RN<Type-II-2-RN；
- 实现复杂度，Type-II-4-RN=Type-II-5-RN<Type-II-1-RN<Type-II-3-RN<Type-II-2-RN。

因此，综合考虑上述硬件成本、时延、性能、功耗和实现复杂度等因素，我们将Het-LDN系统中的Type-II-RN优选为Type-II-4-RN（被动RIS）或Type-II-5-RN（主动RIS），下文简称为RIS。

1.2 传输模型

在Het-LDN系统中，每个UE可由一个或多个AP或RIS为其服务，同一时刻一个RIS只能服务一个UE，而一个AP可以同时服务一个或多个RIS。图3给出一种多AP-多RIS的协作传输模型，其中， M 个AP和 L 个RIS分别通过 N_{cd} 个直射路径和 N_{cf} 个反射路径联合为 UE_k 服务。 UE_k 的接收信号模型和干扰信号模型分别如公式（1）和公式（2）所示。其中， x_k 和 x_u 分别是 AP_m 为 UE_k 和 AP_l 为 UE_u 服务时的发送信号， y_k 和 z 为 UE_k 的全部接收信号和全部干扰加噪声信号， z 由 I_1 和 I_2 两部分组成， I_1 为恒定外部干扰（含底噪）， I_2 为

除 UE_k 外其他用户产生的干扰，其数学模型如公式（3）所示， H_{RU_i} 、 Φ_{RU_i} 和 p_{RU_i} 分别是 UE_k 的第 i 条反射径上RIS与UE之间的信道参数、RIS的调相参数和RIS的调幅参数， H_{AR_i} 、 W_{AR_i} 和 p_{AR_i} 分别是 UE_k 的第 i 条反射径上AP与RIS之间的信道参数、AP的预编码参数和AP的功放参数， H_j 、 W_j 和 p_j 分别是 UE_k 的第 j 条直射径上AP与UE之间的信道参数、AP的预编码参数和AP的功放参数， $H_{RU_{a,k}}$ 、 $\Phi_{RU_{a,k}}$ 和 $p_{RU_{a,k}}$ 分别是 UE_u 的第 a 条反射径上 RIS_{aj} 与 UE_k 之间的信道参数、 RIS_{aj} 为 UE_u 服务时的调相参数和调幅参数， $H_{AR_{a,k}}$ 、 $W_{AR_{a,k}}$ 和 $p_{AR_{a,k}}$ 分别是 UE_u 的第 a 条反射径上服务的 AP_{aj} 与RIS之间的信道参数、 AP_{aj} 的预编码参数和功放参数， $H_{AR_{a,k}}$ 是 UE_u 的第 a 条反射径上的服务 AP_{aj} 与 UE_k 之间的信道参数， $H_{b,k}$ 、 W_b 和 p_b 分别是 UE_u 的第 b 条直射径上的服务 AP_{bi} 与 UE_k 之间的信道参数、 AP_{bi} 为 UE_u 服务的预编码参数和功放参数， $N_{cf,u}$ 和 $N_{cd,u}$ 分别是 UE_u 的反射路径数和直射路径数， K 为



▲图3 Het-LDN传输模型示意图

▼表2 不同候选Type-II-RN特征对比

特征	Type-II-1-RN (AF Relay)	Type-II-2-RN (DF Relay)	Type-II-3-RN (NCR)	Type-II-4-RN (被动RIS)	Type-II-5-RN (主动RIS)
功能	只信号放大	可信号放大、可移相、可编解码	可信号放大、受限移相、无编解码	无信号放大、可移相、无编解码	可信号放大、可移相、无编解码
延迟	低	高	低	无	无
功耗	中	较高	中	最低	低
成本	中	较高	中	最低	低

AF: 放大转发
DF: 解码转发

NCR: 网络控制中继器
RIS: 智能超表面

RN: 中继节点

覆盖区域内的所有的 UE 总数。

$$y_k = H_{RU,i} \Phi_{RU,i} P_{RU,i} H_{AR,i} W_{AR,i} P_{AR,i} x_k + \sum_{j=1}^{N_{cd}} H_j W_j P_j x_k + z, \quad (1)$$

$$z = I_1 + I_2, \quad (2)$$

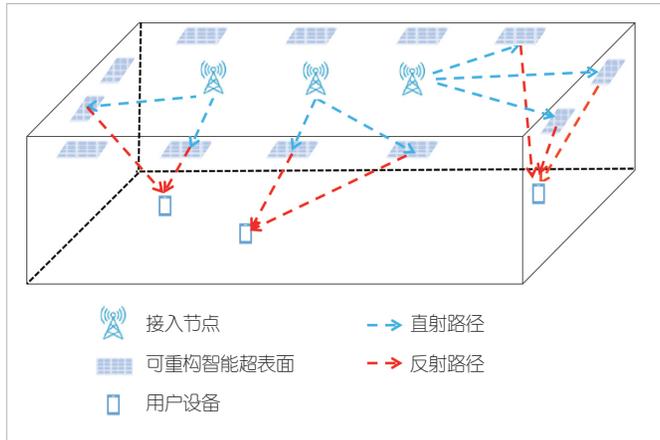
$$I_2 = \sum_{u \neq k}^K \left(\sum_{a=1}^{N_{cf,u}} \left(H_{RU,a,k} \Phi_{RU,a} P_{RU,a} H_{AR,a} W_{AR,a} P_{AR,a} x_u + \right) + \sum_{b=1}^{N_{cd,u}} H_{b,k} W_b P_b x_u \right) \quad (3)$$

2 实验及结果分析

本节中我们基于所搭建的系统级仿真平台，对上述 Het-LDN 系统进行性能评估，其主要包括 Het-LDN 与 LDN 的性能比较和不同参数配置下 Het-LDN 的性能评估。下面我们将给出仿真场景与配置。

2.1 场景与配置

本文中，我们确定 Het-LDN 系统中网络节点的部署策略是评估 Het-LDN 系统级仿真性能的前提。为了降低仿真复杂度，提高系统运行效率，本文的 Het-LDN 系统中暂不考虑 CPU，仅考虑 AP、被动 RIS 和 UE 3 类网络节点的部署，并假定 AP 与 RIS 部署时均只有一层网络结构，且同一层的不同网络节点完全同构。Het-LDN 部署示意如图 4 所示。其中，所有网络节点均限定在一个长方体内（如室内办公室、智慧工厂等），AP 部署在天花板上且沿着天花板中心等间隔分布，RIS 沿着四周墙壁等间隔分布，而 UE 在 2D 空间随机分布。同一类网络节点高度均相同，且有 AP 高度 > RIS 高度 > UE 高度。由于 Het-LDN 的主要应用场景为室内环境，因此 Het-LDN 的主要仿真参数将参考文献[16]中的参数配置，如天线模型、路损模型、视距传播路径概率、穿透损耗和快



▲图 4 Het-LDN 部署示意图

衰模型。另外，考虑到业界尚无广泛统一的 RIS 信道模型，在此我们仅将 RIS 替代为均匀平面阵列（UPA）并进行信道建模。Het-LDN 的详细仿真参数见表 3。下面我们将给出具体性能评估并进行分析。

▼表 3 Het-LDN 仿真参数表

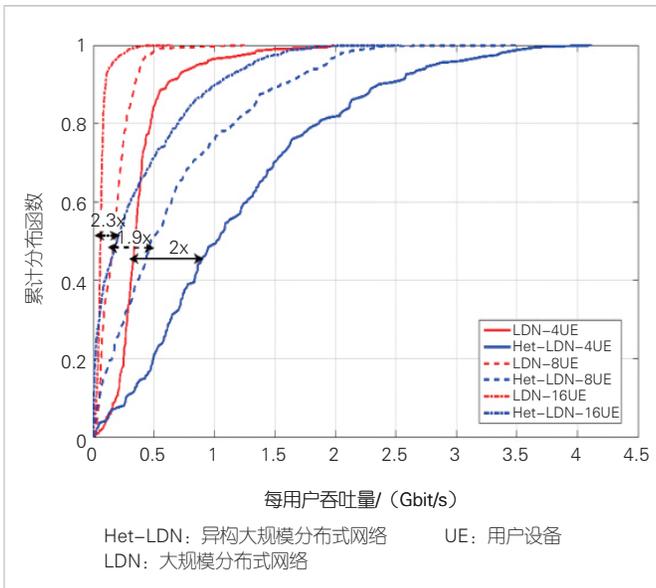
参数	数值
AP 数目	4
RIS 数目	12、24、36、48
UE 数目	4、6、8、10、16
AP 天线数	32
RIS 天线数	512
UE 天线数	4
AP 最大发射功率	23 dBm
AP 高度	6 m
RIS 高度	3 m
UE 高度	1.5 m
天线阵子间距	$\lambda/2$
载波频率	2 GHz
带宽	100 MHz
噪声加外部干扰功率	-120 dBm
区域大小	200 m × 50 m × 6 m
信道模型	3GPP InH

AP: 接入节点 RIS: 智能超表面 UE: 用户设备

2.2 Het-LDN 与 LDN 的性能比较

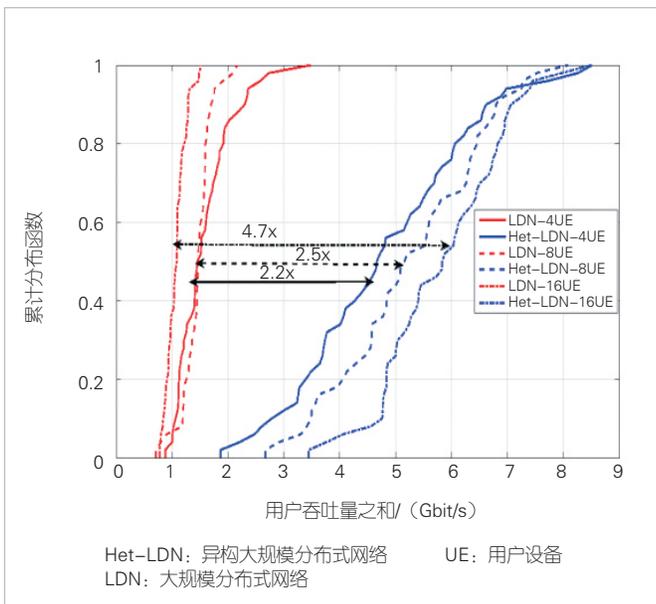
在评估不同参数配置下 Het-LDN 的性能之前，我们首先需要对比 Het-LDN 与 LDN 的性能差异，从仿真实验的角度验证 Het-LDN 相对于 LDN 是否具备优越性。本小节中，Het-LDN 与 LDN 的主要差异体现在网络节点的部署上，即 Het-LDN 相对于 LDN 增加了一层 RIS 节点集合，相对应地，LDN 将缺省 RIS 相关参数，而其余的参数在上述两种场景中均相同。具体而言，Het-LDN 场景中的 RIS 数目为 36，UE 数目为 4、8、16，其余仿真参数见表 3。此外，Het-LDN 与 LDN 均采用相同的传输策略，即两种场景均根据长期的信道参数确定协作集且最大协作集规模（协作 RIS 数目或协作 AP 数目）为 2；AP 侧均采用奇异值分解（SVD）预编码^[17]；AP 侧均根据服务 UE 或 RIS 数目等比例分配功率；AP 侧均根据反馈的信道状态信息自适应调整传输层数^[18]；RIS 侧可利用信号传播路径的角度信息和 RIS 面板配置信息确定调相参数^[19]。

图 5 给出了在不同 UE 数目下 Het-LDN 与 LDN 的每用户吞吐量的累计分布函数（CDF）曲线。由于系统增加了 RIS



▲图5 不同UE数目下Het-LDN与LDN的每用户吞吐量的累计分布函数(CDF)曲线

并提供级联的无线通信链路，当UE数目为4时，Het-LDN与LDN相比，中值用户吞吐量提升了2倍；在UE数目为8时，Het-LDN与LDN相比，中值用户吞吐量提升1.9倍；在UE数目为16时，Het-LDN与LDN相比，中值用户吞吐量提升2.3倍。图6为不同UE数目下Het-LDN与LDN的所有用户吞吐量之和的CDF曲线。可以发现，在UE数目为4时，Het-LDN与LDN相比，用户吞吐量之和的中值速率提升2.2倍；在UE数目为8时，Het-LDN与LDN相比，用户吞吐量之和的中值速率提升2.5倍；在UE数目为16时，Het-LDN

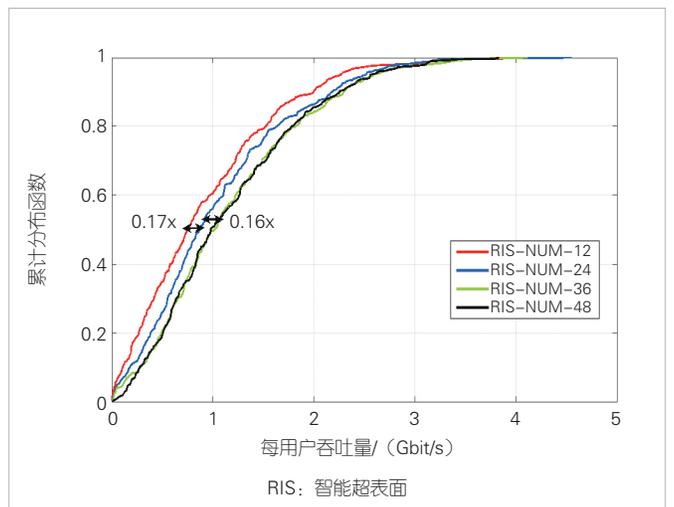


▲图6 不同UE数目下Het-LDN与LDN的所有用户吞吐量之和的累计分布函数(CDF)曲线

与LDN相比，用户吞吐量之和的中值速率提升4.7倍。此外，我们还可以看到，随着UE数目的增加，Het-LDN的吞吐量之和持续上升。这表明此系统可支持更多的UE进行同时传输，而LDN的吞吐量变化趋势则相反。上述的结果均表明Het-LDN的性能显著优于LDN。

2.3 不同参数配置下Het-LDN的性能评估

考虑到不同的参数配置会影响Het-LDN系统的性能。本小节中，我们主要评估RIS数目、UE数目和预编码方案对整体性能的影响。首先需要注意的是，在分析不同RIS数目对Het-LDN系统的影响时，不同仿真实例的仿真参数除了RIS数目外其他的参数均相同。于是，本部分的仿真中假设固定的AP数目为4，UE数目为4，RIS数目为12、24、36、48，其余的仿真参数见表3。由于系统采用RIS以等间隔分布的方式在四周墙壁上部署的策略，因此，当RIS数目增加时，每一面墙壁上RIS的增加数目按照RIS总体数目增长的比例而增加。图7给出了不同RIS数目下Het-LDN的每用户吞吐量的CDF曲线。可以发现，当RIS数目分别从12增加到24、从24增加到36时，中值用户的吞吐量分别提升17%和16%；而当RIS数目从36到48时，中值用户的吞吐量无明显变化。出现上述现象的原因是：当RIS数目小于36时，每一面墙壁上的RIS不够密集，则存在某些UE无法选择出到其他UE干扰较小的RIS的情况，因此，增加RIS的数目可减少上述情况的出现，从而保证系统获得更优的性能；而当RIS数目大于36时，每一面墙壁上的RIS密度足够，可以保证每个UE能选择出到其他UE干扰较小且对其他UE干扰较小的RIS，系统整体性能达到饱和，此时



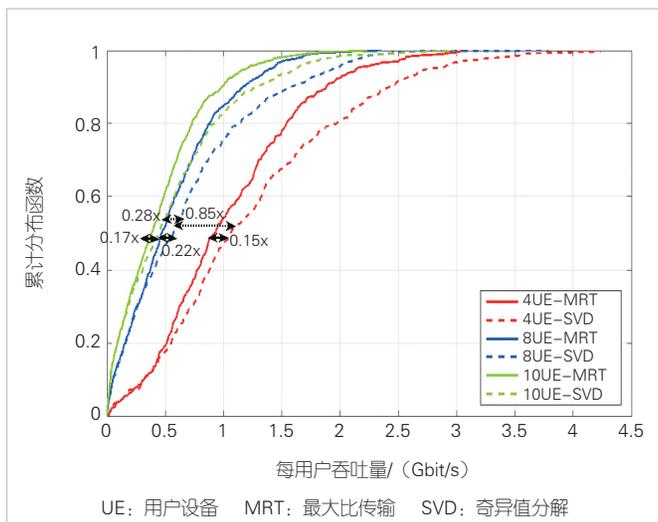
▲图7 不同RIS数目下Het-LDN的每用户吞吐量的累计分布函数(CDF)曲线

继续增加 RIS 数目，对 Het-LDN 的整体性能提升作用将不明显。

此外，UE 数目和预编码方案也会影响 Het-LDN 的性能。本部分中不同的仿真用例除了 UE 数目的参数不同，其他的参数均相同。其中，RIS 数目为 32，其余的参数见表 3。图 8 为不同 UE 数目和不同预编码方案下 Het-LDN 的每用户吞吐量的 CDF 曲线。可以发现，当采用 SVD 预编码方案且 UE 数目从 10 降低到 8 时，中值用户的吞吐量提升 28%；而当 UE 数目从 8 降低到 4 时，中值用户的吞吐量则能提升 85%。产生上述现象的原因是：随着可调度 UE 数目的减小，多用户传输造成的用户间干扰降低，Het-LDN 系统的性能随之提升。当采用最大比传输 (MRT)^[20] 预编码方案时，可调度 UE 的数目与 Het-LDN 系统的性能之间也呈现出类似的规律。此外，在 UE 数目分别是 10、8 和 4 的情况下，比较 SVD 和 MRT 两种预编码对 Het-LDN 性能的影响时，SVD 预编码相对于 MRT 预编码，其中值用户的吞吐量分别提升 17%、22% 和 15%。这是由于 MRT 预编码仅考虑增强有用接收信号的功率，并没有考虑处理 MU 干扰，而 SVD 预编码则考虑了有用信号和干扰信号之间的平衡，因此，SVD 预编码的性能优于 MRT 预编码。

3 结束语

随着信息技术的不断发展，各种智能设备的能力越来越强，各类网络节点的部署越来越密，服务质量的要求越来越高。因此面向未来的网络部署将面临着成本、能效、性能、复杂度和可扩展性等诸多挑战，由多类不同功能的网络节点组成的 Het-LDN 可以有效应对上述的问题。两类不同功能



▲图 8 不同 UE 数目和不同预编码方案下 Het-LDN 的每用户吞吐量的累积分布函数(CDF)曲线

的网络节点有不同的候选方案，需要综合考虑硬件成本、实现复杂度、功耗和可扩展性等多种不同因素确定最终节点的选型。本文中，我们通过详细分析确定 Type-I-AP 和 Type-II-RN 分别优选 Option 7.2x AP 和 RIS。此外，还通过系统级仿真实验进一步验证 Het-LDN 的性能。实验结果表明：Het-LDN 相对传统的 LDN 有着显著的性能优势；Het-LDN 中 RIS 数目对系统性能的影响存在限制，当 RIS 数目增加到一定程度时，继续增加 RIS 数目对系统性能提升没有贡献；Het-LDN 中使用 SVD 预编码性能优于 MRT 预编码。

致谢

感谢中兴通讯股份有限公司禹宏康、王云璐和张淑娟等对本研究的帮助！

参考文献

- [1] Ericsson. Radio stripes: re-thinking mobile networks (2019) [EB/OL]. [2024-01-12]. <https://www.ericsson.com/en/blog/2019/2/radio-stripes>
- [2] NGO H Q, ASHIKHMIN A, YANG H, et al. Cell-Free Massive MIMO: uniformly great service for everyone [C]//Proceedings of IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2015: 201-205. DOI: 10.1109/spawc.2015.7227028
- [3] INTERDONATO G, BJORSON E, NGO H Q, et al. Ubiquitous cell-free massive MIMO communications [EB/OL]. (2018-04-10) [2024-01-12]. <https://arxiv.org/abs/1804.03421>
- [4] BASHAR M, CUMANAN K, BURR A G, et al. Cell-free massive MIMO with limited backhaul [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2018. DOI: 10.1109/icc.2018.8422865
- [5] BJORNSON E, SANGUINETTI L. Scalable cell-free massive MIMO systems [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(7): 4247-4261. DOI: 10.1109/tcomm.2020.2987311
- [6] WEI C, XU K, XIA X C, et al. User-centric access point selection in cell-free massive MIMO systems: a game-theoretic approach [J]. IEEE communications letters, 2022, 26(9): 2225-2229. DOI: 10.1109/lcomm.2022.3186350
- [7] LARSSON E G, VIEIRA J. Phase calibration of distributed antenna arrays [J]. IEEE communications letters, 2023, 27(6): 1619-1623. DOI: 10.1109/lcomm.2023.3266836
- [8] KHANDEKAR A, BHUSHAN N, TINGFANG J, et al. LTE-advanced: Heterogeneous networks [C]//2010 European Wireless Conference (EW). IEEE: 978-982. DOI: 10.1109/EW.2010.5483516
- [9] HU R Q, QIAN Y. An energy efficient and spectrum efficient wireless heterogeneous network framework for 5G systems [J]. IEEE communications magazine, 2014, 52(5): 94-101. DOI: 10.1109/mcom.2014.6815898
- [10] 3GPP TR 38.801. Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces (Release 14): 3GPP TR 38.801 [S]. 2017
- [11] O-RAN Alliance. Control, user and synchronization plane Specification: O-RANWG4.CUS.0-v10.00 [S]. 2022

- [12] MIKIO I, HIDEAKII T, SATOSHI N. Relay technology in LTE-Advanced [J]. NTT DOCOMO technical journal, 2011, 12(2): 29-36
- [13] 3GPP. Study on integrated access and backhaul (Release 16): 3GPP TR 38.874 [S]. 2018
- [14] 3GPP. Study on NR network-controlled repeaters (Release 18): 3GPP [S]. 2022
- [15] ZHANG Z J, DAI L L. Reconfigurable intelligent surfaces for 6G: nine fundamental issues and one critical problem [J]. Tsinghua science and technology, 2023, 28(5): 929-939. DOI: 10.26599/tst.2023.9010001
- [16] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 17): 3GPP TR 38.901 [S]. 2022
- [17] ZHANG D, PAN P, YOU R N, et al. SVD-based low-complexity hybrid precoding for millimeter-wave MIMO systems [J]. IEEE communications letters, 2018, 22(10): 2176-2179. DOI: 10.1109/lcomm.2018.2865731
- [18] SRINIVASAN R. IEEE 802.16m evaluation methodology document: IEEE 802.16m-08/004r2 [R]. 2008
- [19] GU Q, WU D, SU X, et al. System-level Simulation of RIS assisted Wireless Communications System [C]//Proceedings of GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2022: 1540-1545. DOI: 10.1109/globecom48099.2022.10000700
- [20] HAO L, ZHAO H, HU F L, et al. Energy efficient power allocation algorithm for downlink massive MIMO with MRT precoding [C]//Proceedings of IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall). IEEE, 2013: 1-5. DOI: 10.1109/vtcfall.2013.6692185

作者简介



叶新泉，中兴通信股份有限公司技术预研工程师；主要从事无线通信系统的物理层预研工作，主要研究方向为分布式多天线技术、可重构智能表面等；申请专利10余项。



卢光延，中兴通信股份有限公司技术预研工程师；主要从事无线通信系统的物理层预研工作，主要研究方向包括可重构智能表面、分布式多天线技术等；发表论文7篇。



陈艺骝，中兴通讯股份有限公司技术预研资深专家、青年领军人才、深圳市地方级领军人才；主要研究领域为6G技术预研；发表论文10篇，获授权专利50项。