

B5G 高铁网络演进方案研究



Research on Evolution of B5G High-Speed Railway Networks

孙普/Sun Pu

(中国电信股份有限公司河南分公司, 中国 郑州 450016)
(China Telecom Henan Branch, Zhengzhou 450016, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202604013

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20241212.1527.006>

网络出版日期: 2024-12-13

收稿日期: 2024-10-15

摘要: 快速增长的高铁业务规模给高铁网络容量及用户感知带来了巨大的挑战, 高铁场景下需要考虑以用户为中心进一步提升高铁用户业务感知和体验。提出了 B5G 演进的高铁无蜂窝组网方案。该方案采用无蜂窝网络架构, 解决切换、重叠干扰等带来的用户感知下降问题, 构建以用户为中心的网络, 保障了高铁用户体验。

关键词: 高铁; 5G; 无蜂窝; 用户感知

Abstract: The rapidly growing service requirements of high-speed railway users have brought huge challenges to the high-speed railway network capacity and user experience. In the high-speed railway scenario, user-centered services need to be considered to further improve the user experience of high-speed railway users. A cell-free networking solution for high-speed railways in the B5G evolution is proposed, which uses the cell-free network architecture to solve the problem of decreased user experience caused by handover and overlapping interference, build a user-centered network, and ensure high-speed railway user experience.

Keywords: high-speed train; B5G; cell-free; user experience

引用格式: 孙普. B5G 高铁网络演进方案研究 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(4): 88-94. DOI: 10.12142/ZTETJ.202604013

Citation: Sun P. Research on evolution of B5G high-speed railway networks [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(4): 88-94. DOI: 10.12142/ZTETJ.202604013

当前, 中国 4G 网络已全面覆盖城乡地区, 5G 网络覆盖正逐步从“市市通”向“县县通”延伸, 并持续向乡镇、行政村等纵深推进。5G 网络建设进入后半程, 正由规模建设转向精准规划, 聚焦重点场景的网络覆盖及“补盲”“补热”工作。2024 年 1 月, 工业和信息化部、国家发展改革委等 11 部门联合印发《关于开展“信号升格”专项行动的通知》(简称《专项行动》), 提出重点场景网络建设要求, 加快推进移动网络深度覆盖, 提升网络质量, 优化用户感知。运营商已将重点场景覆盖达标率纳入重点关注指标。《专项行动》提出, 到 2024 年底, 超过 8 万个重点场所实现移动网络深度覆盖, 25 000 km 铁路、350 000 km 公路和 150 条地铁线路实现移动网络连续覆盖。其中, 高铁 5G 网络覆盖已成为当前无线网络覆盖的关注重点。

2023 年, 国家铁路完成旅客发送量 36.8 亿人次, 高峰日发送旅客突破 2 000 万人次, 全年及高峰日发送量均创历史新高。高铁业务规模的快速增长, 给高铁网络容量及用户感知带来巨大挑战。本文针对 5G 网络建设后期高铁网络面临的挑战开展研究, 并提出一种高铁无蜂窝组网方案, 旨在

突破小区边界约束, 尽可能保障高铁用户的稳态业务感知, 提升用户体验。

1 高铁 5G 网络面临的挑战

网络建设初期, 高铁网络普遍面临三大挑战: 车体穿透损耗大、多普勒频偏、高速移动带来的频繁切换^[1]。对此, 可通过多样化的设备选型、不同频段组合及软件增强功能等方式进行优化。随着高铁网络建设不断完善, 用户需求持续提升, 现阶段高铁 5G 网络面临新的挑战: 一方面, 高价值用户数量增加对网络性能提出了更高要求; 另一方面, 视频类业务时长占比提升也对用户感知保障提出了新的诉求。

1.1 高铁场景高价值用户不断增多

高铁已成为中国重要的铁路运输方式之一。截至 2023 年底, 中国铁路营业里程已达 154 000 km, 其中高铁里程超过三分之一, 达到 37 000 km。铁路网络的不断扩展, 为国家交通运输体系的完善提供了有力支撑。伴随经济快速发展, 高铁日益成为公务、商务等高价值人群的出行首选。铁路移动通信网络的持续完善, 提供了连续的网络服务, 为出

行途中处理工作、保持联络提供了重要保障。根据中国某运营商的相关统计数据（如表1所示），高铁用户的每用户月均流量（DOU）约为全网用户的2倍，高铁场景的感知与体验保障已成为运营商的关注重点^[2]。

由上述统计可以看出，高铁用户多为高DOU、高每用户每月平均收入（ARPU）值用户，用户价值高，品牌影响大。因此，在高铁场景下需持续提升用户体验，保障用户感知。

1.2 高铁5G网络用户体验仍有提升空间

根据中国某省份运营商高铁数据业务类型分析（见表2）可知，视频类业务的用户时长占比最高。其中，视频直播类业务时长占比达36.85%，视频点播类业务时长占比为10.75%。整体来看，视频类业务在高铁用户使用中的合计占比接近50%。

随着移动互联网的快速发展，高铁场景下的用户业务类型日益丰富。其中，视频通话、视频直播类业务已成为移动通信的主流应用。面向未来，多样化的业务类型和不断增长的业务负荷，将对网络性能及用户感知提出更高要求。

1.3 大容量和稳态感知对高铁组网方案提出新要求

在传统的4G和5G高铁网络覆盖中，高铁沿线的射频拉远单元（RRU）仍按照独立小区或合并小区的方式进行组网，如图1所示。网络覆盖仍以RRU单节点独立处理为主，当用户终端在高铁沿线移动时，仍会发生频繁的小区切换。

随着容量需求的不断增长，采用U6G与高频针对高铁场景进行覆盖的研究日益增多。3GPP R18进一步讨论了高频在高铁场景中的应用。采用U6G与高频进行高铁覆盖时，站间距可能进一步缩小，多站点间的协作将更具意义。此外，面向未来的高铁网络还需考虑进一步减少小区间切换，可引入无小区边界的无蜂窝网络架构，从而为用户提供更加稳定的感知体验。

1.4 高铁场景无线终端频繁切换导致感知下降明显

高铁无线覆盖网络具有典型的线性组网特征，高铁列车沿固定线路运行，沿途5G站点分布在高铁线路两侧。按列车运行速度300 km/h、单个物理站点覆盖约300 m估算，列车通过一个站点的时间约为4 s，这意味着高铁上的终端大约每4 s发生一次小区间切换。小区间切

表1 用户DOU、ARPU对比

指标	京雄高铁	京张高铁	全网
DOU/GB	22	20	11
ARPU/元	44	37	28

ARPU：每用户每月平均收入 DOU：每用户月均流量

表2 高铁用户主要业务分类及使用时长占比

业务分类	高铁用户时长占比/%
视频直播(抖音、快手)	36.85
即时通信(微信、QQ)	34.10
网页浏览(网页、今日头条、微博)	10.36
视频点播(腾讯视频、哔哩哔哩)	10.75
购物(淘宝、京东)	7.95

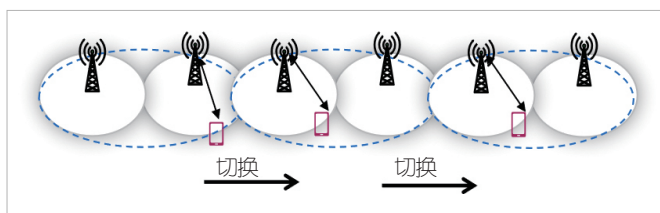


图1 传统高铁组网方案

换会造成数十毫秒的业务短时中断，而切换前后的业务准备阶段，更会导致业务速率明显下降。

高铁沿线终端的频繁切换会显著影响用户体验。在高铁场景下，对比无蜂窝（切换次数减少85%）与较多切换两种场景下的下行业务速率。结果表明，较多切换时终端下行业务平均速率下降约25%，如图2所示。由此可见，通过无蜂窝网络架构减少小区切换次数，能够有效改善业务体验。

2 无蜂窝技术概述

当前移动通信组网普遍采用蜂窝组网方案，该方式可按

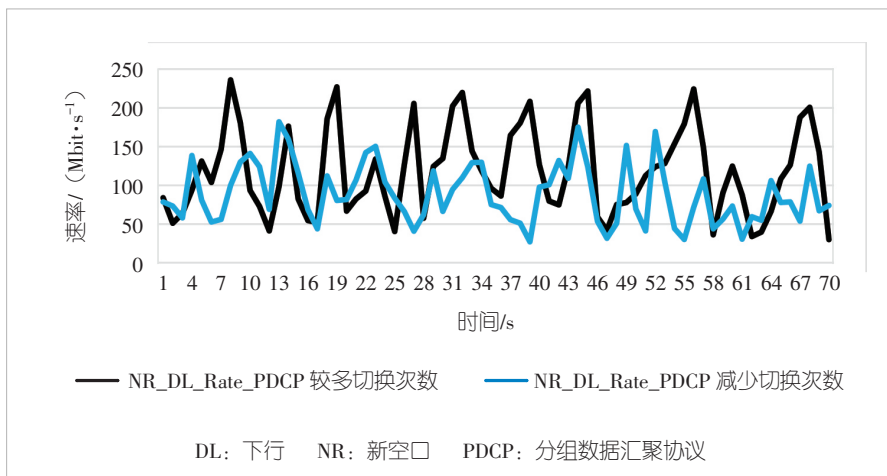


图2 无蜂窝减少切换次数和较多切换次数的下行业务速率对比

需实现局部区域覆盖，具备较强的可扩展性。蜂窝组网具有明确的小区边界划分，用户在小区间移动时需要切换，从而造成业务的短时中断。在同频组网场景下，小区边界的存在还会带来重叠干扰，进一步导致边缘用户性能下降。

6G 对更高频段、更高速率及更高可靠性提出了要求，在多天技术演进方面也明确了超大规模多输入多输出 (MIMO) 的发展方向。传统蜂窝组网方案难以有效保障小区边缘的可靠性，在构建以用户为中心的网络方面亦存在诸多局限。无蜂窝技术^[3-5]已被列为面向 6G 的关键技术之一，该技术不仅能够真正实现以用户为中心的网络架构，为边缘用户提供更加可靠的性能保障，还可通过分布式天线面构建超大规模 MIMO 系统。

无蜂窝技术的核心在于打破传统小区边界，为移动用户提供稳定的体验，同时还可通过多收发节点 (TRP) 间的协作构建大规模 MIMO 系统^[6-9]。

无蜂窝网络的典型组网架构由一个中央处理单元 (CPU) 连接大量无线接入点 (AP) 构成，如图 3 所示。其中，CPU 负责所有节点的信道状态评估、资源分配及数据收发决策，AP 则主要承担射频前端处理。AP 通常配置较少的天线数，多个 AP 可联合构成大规模天线系统为同一用户提供服务，也可通过空分方式为不同用户分别提供服务。该架构真正实现了以用户为中心的网络形态^[10]，突破了传统蜂窝网络以小区为边界的局限性，有助于缓解切换和重叠干扰等因素导致的用户感知下降问题。

当前无蜂窝技术的研究多聚焦于宏覆盖典型场景，如城区商圈、大型体育场馆等，而对高铁等特殊场景的关注相对较少。然而，从打破小区边界的初衷出发，高铁场景对无蜂

窝技术的需求实际上更为迫切。

3 高铁无蜂窝组网方案研究

本文将介绍面向高铁场景的无蜂窝组网方案。该方案有别于传统蜂窝网络架构，能够实现以用户为中心的网络形态，突破传统独立小区的边界限制，通过无蜂窝化组网有效缓解切换、重叠干扰等因素导致的用户感知下降问题，从而显著提升高铁用户的业务体验。

3.1 高铁无蜂窝组网方案

高铁场景中的信号发射单元通常采用铁路两侧交错分布的部署方式，以保证车厢两侧用户的覆盖均衡，避免单侧弱覆盖问题。随着 5G-A 与 6G 的持续演进，U6G 与高频段在高铁场景中的应用愈发受到关注。一方面，收发节点的部署间距可能进一步缩小；另一方面，如何突破传统小区边界，联合多个 AP 为用户提供连续服务，使得无蜂窝组网在高铁场景中的研究价值日益凸显。

无蜂窝网络的网络架构可以很好地解决高铁在发射站点间频繁切换的问题。高铁无蜂窝网络可以采用 Radio Stripes 的模式，其中的 CPU 作为集中点，连接 L 个 AP 条带，每个条带上的 AP 采用级联的方式，如图 4 所示。

L 个 AP 按照一定顺序在条带上依次部署，形成一种空间上离散串行的 AP 分布结构。各 AP 通过链式 (条带式) 结构完成顺序连接，并在同一管道 (条带) 内统一实现前向回传与供电^[11]。场景内的用户可与一个或多个 AP 进行通信，从而实现无蜂窝式的通信方式。

需要注意的是，现有单条带模式存在一定缺陷：当条带上某处发生断裂导致通信中断时，其后端所有 AP 均将停止工作，带来较大的不稳定性，系统鲁棒性较低。对此，一种直接的改进方式是采用更多条带 (可选用更小规模)，用户可与一个或多个条带上的 AP 进行通信，从而获得更高的鲁棒性与灵活性。另一种方案是采用环形组网模式，将条带两

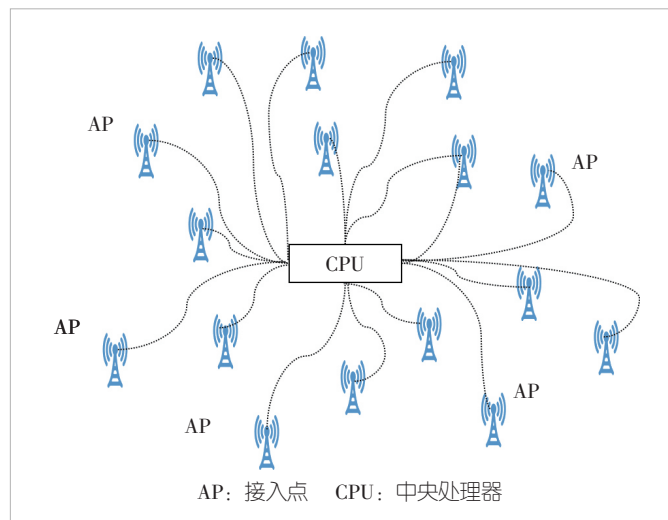


图3 无蜂窝典型组网示意图

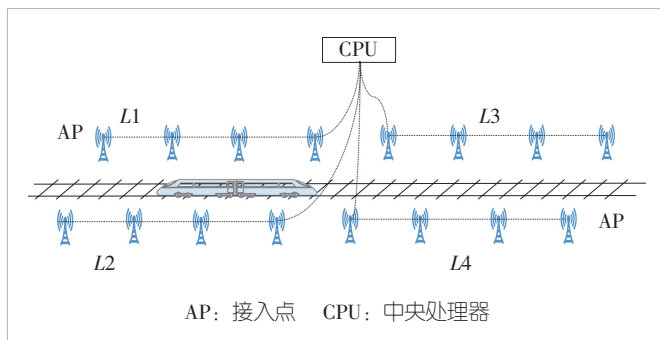


图4 高铁无蜂窝条带组网

端的AP均与CPU对接。

此外,通过对多个条带进行地理上的延伸部署,可进一步扩展系统通信覆盖范围,提升用户服务质量。这种多条带联合的工作模式可称为混合模式,即星式与星式、星式与条带式、条带式与条带式的组合形式(其中星式可视为条带式的特例,此时条带上仅包含一个AP)^[12],如图5所示。

3.2 系统模型与传输方案

这里考虑Radio Stripes混合模式的系统模型。该系统共服务 K 个单天线用户。假设系统场景中有 N 个条带(对于图3,可分别表示为 $N=2,3,4$),其集合表示为 $N=\{1,\dots,N\}$,而对于其中的第 n 个条带,其包含 L_n 个AP,由此形成AP个数集合 $L=\{L_1,\dots,L_n,\dots,L_N\}$,并得到总AP数 $L=\sum_{n=1}^N L_n$ 。每个AP有 M 根天线,于是,总天线数为 ML 。需要注意的是,当 $L_n \geq 2$,其结构表示为条带;当 $L_n = 1$,其条带退化为星式结构,即可呈现为混合的结构模式。

对于第 n 个条带,其中的第 l_n 个AP第 m 根天线与第 k 个用户的无线信道(信道增益)可以表示为 $h_{n,l_n,m,k} \in \mathbb{C}$,则第 l_n 个AP与第 k 个用户的无线信道向量可以表示为 $\mathbf{h}_{n,l_n,k} = [h_{n,l_n,1,k}, \dots, h_{n,l_n,M,k}]^H \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 。于是,对于来自 K 个用户的上行信号 $\{\mathbf{x}_k\}_{k=1}^K$,其中 $\mathbf{x}_k = \sqrt{p_k} \mathbf{s}_k \in \mathbb{C}^{1 \times \tau_u}$, $E\{\mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^H / \tau_u\} = p_k$, p_k 为用户的上行发送功率, τ_u 为上行传输符号数,则第 n 个条带上的第 l_n 个AP的联合接收信号 $\mathbf{Y}_{n,l_n} \in \mathbb{C}^{M \times \tau_u}$ 表示为求和的形式:

$$\mathbf{Y}_{n,l_n} = \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{n,l_n,k} \mathbf{x}_k + \bar{\mathbf{N}}_{n,l_n} \quad (1),$$

其中, $\bar{\mathbf{N}}_{n,l_n} \in \mathbb{C}^{M \times \tau_u}$ 表示为接收噪声,其各元素建模为独立同分布的复高斯变量 $CN(0, \sigma_n^2)$ 。

3.2.1 分布式处理

各AP对接收信号进行处理,并通过条带反馈至CPU, CPU对所有接收到的处理信号进行最终合并,从而完成上行数据的整体处理流程。具体而言,令第 l_n 个AP对于第 k 个用户的上行检测向量为 $\mathbf{w}_{n,l_n,k}^U \in \mathbb{C}^{1 \times M}$,则最终在CPU上对于第 k 个用户的合并符号表示为求和的形式:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \sum_{n=1}^N \sum_{l_n=1}^{L_n} \mathbf{w}_{n,l_n,k}^U \mathbf{Y}_{n,l_n} \quad (2).$$

现将上述内容改写成组合联立的形式(对于所有用户)。

令 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1^H, \dots, \mathbf{x}_K^H]^H \in \mathbb{C}^{K \times \tau_u}$, $\mathbf{H}_{n,l_n} = [\mathbf{h}_{n,l_n,1}, \dots, \mathbf{h}_{n,l_n,K}] \in \mathbb{C}^{M \times K}$,则存在:

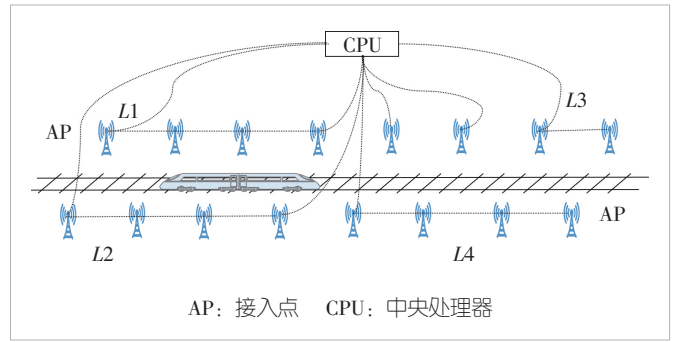


图5 高铁无线蜂窝混合模式组网

$$\mathbf{Y}_{n,l_n} = \mathbf{H}_{n,l_n} \mathbf{X} + \bar{\mathbf{N}}_{n,l_n} \quad (3).$$

令 $\mathbf{W}_{n,l_n}^U = [\mathbf{w}_{n,l_n,1}^U, \dots, \mathbf{w}_{n,l_n,K}^U]^H \in \mathbb{C}^{K \times M}$,则组合后的合并符号 $\hat{\mathbf{X}} = [\hat{\mathbf{x}}_1^H, \dots, \hat{\mathbf{x}}_K^H]^H \in \mathbb{C}^{K \times \tau_u}$ 表示为:

$$\hat{\mathbf{X}} = \sum_{n=1}^N \sum_{l_n=1}^{L_n} \mathbf{W}_{n,l_n}^U \mathbf{Y}_{n,l_n} \quad (4).$$

当系统采用MRC检测,则各AP采用本地信道状态信息(CSI)对接收信号进行处理,并通过条带进行叠加反馈, CPU对所有接收到的处理信号进行最终合并操作,从而完成整体的上行数据处理。具体地,检测向量(矩阵)可以表示为:

$$\mathbf{w}_{n,l_n,k}^U = \sqrt{p_k} \mathbf{h}_{n,l_n,k}^H, \mathbf{W}_{n,l_n}^U = [\sqrt{p_1} \mathbf{h}_{n,l_n,1}^H, \dots, \sqrt{p_K} \mathbf{h}_{n,l_n,K}^H]^H = \bar{\mathbf{H}}_{n,l_n}^H \quad (5).$$

此时的合并符号即为 $\hat{\mathbf{X}} = \sum_{n=1}^N \sum_{l_n=1}^{L_n} \bar{\mathbf{H}}_{n,l_n}^H \mathbf{Y}_{n,l_n}$ 。由于每个条带都能对其AP所反馈的信号进行叠加操作,即实现 $[\hat{\mathbf{x}}_{1(n,l_n)}^H, \dots, \hat{\mathbf{x}}_{K(n,l_n)}^H]^H = \sum_{l_n=1}^{L_n} \mathbf{W}_{n,l_n}^U \mathbf{Y}_{n,l_n} \in \mathbb{C}^{K \times \tau_u}$,则每个条带的反馈量(回传信息维度)为 $K\tau_u$,进而系统的整体反馈量为 $NK\tau_u$ 。当AP获得非理想的信道信息时,相应的向量(矩阵)可修改为 $\hat{\mathbf{h}}_{n,l_n,k}$ ($\hat{\mathbf{H}}_{n,l_n}$)。MRC检测的流程如下:

1) 条带上的各AP接收到上行信号 $\mathbf{Y}_{n,l_n}$;

2) 各AP计算 $\mathbf{W}_{n,l_n}^U \mathbf{Y}_{n,l_n}$ ($\bar{\mathbf{H}}_{n,l_n}^H \mathbf{Y}_{n,l_n}$);

3) 各条带对处理信号进行(顺序)叠加: $\sum_{l_n=1}^{L_n} \mathbf{W}_{n,l_n}^U \mathbf{Y}_{n,l_n}$,

并反馈至CPU;

4) CPU对各条带反馈的信号进行叠加: $\hat{\mathbf{X}} = \sum_{n=1}^N \sum_{l_n=1}^{L_n} \mathbf{W}_{n,l_n}^U \mathbf{Y}_{n,l_n}$,以完成上行数据处理。

3.2.2 协作处理

协作处理可简单描述为 AP 与 CPU 间的协作式处理。对于上行链路, AP 首先进行信号处理(一阶段处理),将处理后的信息通过条带反馈给 CPU,再由 CPU 完成后续处理(二阶段处理),从而在减轻前传负载的同时获得较高的性能增益。具体而言, AP 需要获取信道信息,并将相应结果用于空间合并下的本地数据估计(检测);随后,估计后的数据与信道相关信息通过条带从 AP 传送至 CPU, CPU 据此进行进一步的空间合并处理,以完成上行数据整体处理流程。下面给出方案描述:

1) 系统采用 Q-MMSE 检测^[13], 检测流程如图 6 所示。

该检测方案具体包括 5 个步骤:

(1) 条带上的各 AP 接收到上行信号 Y_{n,l_n} ;

(2) 各 AP 计算 $\mathbf{W}_{n,l_n}^U \mathbf{Y}_{n,l_n}$ ($\bar{\mathbf{H}}_{n,l_n}^H \mathbf{Y}_{n,l_n}$) (一类前传信息: 可理解为 MRC 结果, 其隐含信道相关信息);

(3) 各条带对处理信号进行(顺序)叠加: $\sum_{l_n=1}^{L_n} \mathbf{W}_{n,l_n}^U \mathbf{Y}_{n,l_n}$,

并反馈至 CPU;

(4) CPU 对各条带反馈的信号进行叠加: $\hat{\mathbf{X}} = \sum_{n=1}^N \sum_{l_n=1}^{L_n} \mathbf{W}_{n,l_n}^U \mathbf{Y}_{n,l_n}$;

(5) CPU 对叠加信号进行处理, 以完成上行数据处理。

可以看到, 系统进行了两次信号叠加操作: 条带内叠加和条带间叠加(可理解为条带间的加权系数恒为 1)。

CPU 对叠加信号进行处理, 得到信道相关信息并进行最终合并, 其流程如下:

(1) 对叠加信号进行相关操作: $\hat{\mathbf{C}} = \hat{\mathbf{X}} \hat{\mathbf{X}}^H / \tau_u$;

(2) SVD: $\hat{\mathbf{C}} = \mathbf{U} \mathbf{\Omega} \mathbf{U}^H$, 其中的奇异值 $\{\omega_l\}_{l=1}^d$, $\mathbf{\Omega} = \omega_1 \mathbf{I}_{n_1} \oplus \cdots \oplus \omega_d \mathbf{I}_{n_d}$;

(3) 变换操作: $\hat{\mathbf{X}}_{Q-MMSE} = \mathbf{U} (\mu_1 \mathbf{I}_{n_1} \oplus \cdots \oplus \mu_d \mathbf{I}_{n_d}) \mathbf{U}^H \hat{\mathbf{X}}$, $\mu_l =$

$$\frac{2}{\sqrt{\sigma_u^4 + 4\omega_l + \sigma_u^2}}。$$

为了表述清晰, 现将上述内容进一步改写成组合的形式(对于所有条带)。令 $\mathbf{Y}_n = [\mathbf{Y}_{n,1}^H, \cdots, \mathbf{Y}_{n,L_n}^H]^H \in C^{ML_n \times \tau_u}$, $\bar{\mathbf{H}}_n = [\bar{\mathbf{H}}_{n,1}^H, \cdots, \bar{\mathbf{H}}_{n,L_n}^H]^H \in C^{ML_n \times K}$, 进一步地, $\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_1^H, \cdots, \mathbf{Y}_N^H]^H \in C^{ML \times \tau_u}$, $\bar{\mathbf{H}} = [\bar{\mathbf{H}}_1^H, \cdots, \bar{\mathbf{H}}_N^H]^H \in C^{ML \times K}$, 那么 $\hat{\mathbf{X}} = \bar{\mathbf{H}}^H \mathbf{Y}$, $\hat{\mathbf{X}}_{Q-MMSE} = \mathbf{U} (\mu_1 \mathbf{I}_{n_1} \oplus \cdots \oplus \mu_d \mathbf{I}_{n_d}) \mathbf{U}^H \bar{\mathbf{H}}^H \mathbf{Y}$ 。

对于此方案, 每个条带的反馈量为 $K\tau_u$ ($\sum_{l_n=1}^{L_n} \mathbf{W}_{n,l_n}^U \mathbf{Y}_{n,l_n}$ 的维度为 $K \times \tau_u$), 进而系统的整体反馈量为 $NK\tau_u$, 这与 MRC 方案的结果相同。

2) 系统采用 C-RZF 检测^[14], 则流程如图 7 所示。

该检测方案具体也包括 5 个步骤:

(1) 条带上的各 AP 接收到上行信号 Y_{n,l_n} ;

(2) 各 AP 计算 $\mathbf{W}_{n,l_n}^U \mathbf{Y}_{n,l_n}$ ($\bar{\mathbf{H}}_{n,l_n}^H \mathbf{Y}_{n,l_n}$) 与 $\bar{\mathbf{H}}_{n,l_n}^H \bar{\mathbf{H}}_{n,l_n}$ (两类前传信息);

(3) 各条带对处理信号进行(顺序)叠加: $\sum_{l_n=1}^{L_n} \mathbf{W}_{n,l_n}^U \mathbf{Y}_{n,l_n}$, 对信道相关矩阵进行叠加: $\sum_{l_n=1}^{L_n} \bar{\mathbf{H}}_{n,l_n}^H \bar{\mathbf{H}}_{n,l_n}$, 并将两类信息反馈至 CPU;

(4) CPU 对各条带反馈的信息进行叠加: $\hat{\mathbf{X}} = \sum_{n=1}^N \sum_{l_n=1}^{L_n} \mathbf{W}_{n,l_n}^U \mathbf{Y}_{n,l_n}$, $\bar{\mathbf{H}}^H \bar{\mathbf{H}} = \sum_{n=1}^N \sum_{l_n=1}^{L_n} \bar{\mathbf{H}}_{n,l_n}^H \bar{\mathbf{H}}_{n,l_n}$;

(5) CPU 对叠加信息进行处理: $\hat{\mathbf{X}}_{C-RZF} = (\bar{\mathbf{H}}^H \bar{\mathbf{H}} + \mathbf{A} \mathbf{I}_K)^{-1} \hat{\mathbf{X}}$, 其中有 $\mathbf{A} = \sigma_u^2 \mathbf{I}_K$ 或 $\mathbf{A} = \text{diag}(a_1, \cdots, a_K) + \sigma_u^2 \mathbf{I}_K$, 以完成上行数据处理。

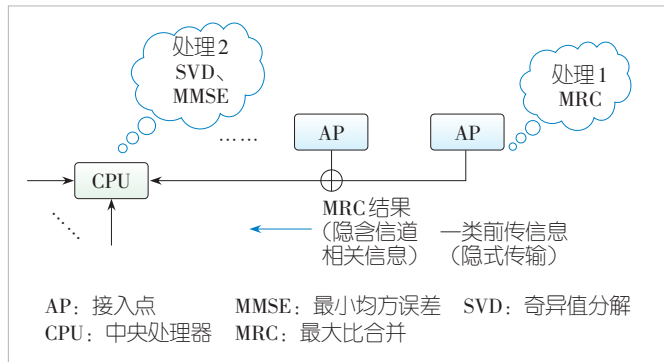


图6 Q-MMSE检测流程

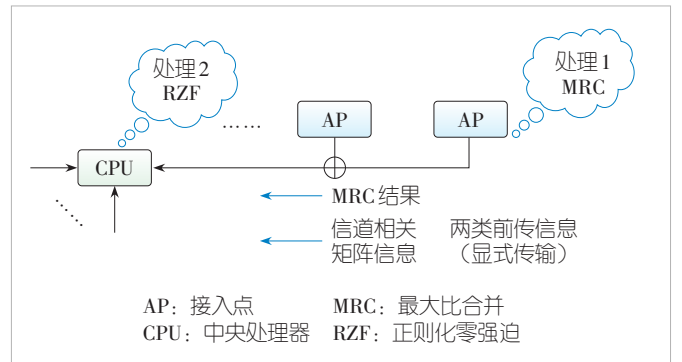


图7 C-RZF检测流程

在上述步骤中, $a_k = \frac{1}{ML} \text{tr} \left(\sum_{i \neq k} \left(\frac{\tau_u}{\sigma_u^2} \mathbf{I}_{ML} + \frac{\mathbf{R}_i^{-1}}{p_i} \right)^{-1} \right)$, $\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_{i,1,1} \oplus \cdots \oplus \mathbf{R}_{i,n,l_n} \oplus \cdots \oplus \mathbf{R}_{i,N,L_N}$, $\mathbf{R}_{i,n,l_n} \in C^{M \times M}$ 表示第 n 个条带中的第 l_n 个 AP 与第 i 个用户的空间相关矩阵 (CPU 已知的信道统计信息), 并可假设 $\mathbf{h}_{n,l_n,i} \sim \text{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_{i,n,l_n})$ 。对于此方案, 每个条带需要反馈两类信息, 其反馈量为 $K\tau_u + \frac{K(K+1)}{2}$ (注意, 信道相关矩阵的维度为 $K \times K$, 但只需反馈其上三角元素), 进而系统的整体反馈量为 $NK\tau_u + \frac{NK(K+1)}{2}$ 。

3.3 高铁快速移动对信道估计的影响

在高铁场景下, 由于列车移动速度较高, 无线信道随时间快速衰落, 多普勒频移较为显著, 对数据解调性能造成严重影响。高速移动引起的信道快速变化主要体现在两个方面: 一是符号间产生相位偏移; 二是破坏子载波间的正交性, 引入载波间干扰 (ICI)。

5G 根据移动速度适配附加导频数量, 通过多个导频联合进行频偏跟踪与信道估计, 能够更有效地跟踪高速场景下的多普勒频偏变化, 并获取信道的时变特性, 从而提升解调性能。

在 CDL-C 信道模型下, 图 8 仿真表明, 在间隔 0.4 ms 的两个符号上, 信道时变特性使得两个时刻的误差矢量幅度 (EVM) 差异与用户设备 (UE) 移动速度强相关。具体而言, UE 以 300 km/h 移动时, 两个符号间的信道差异显著大于 120 km/h 时的情况。

在无蜂窝组网模式下, 各节点独立进行信道估计与补偿

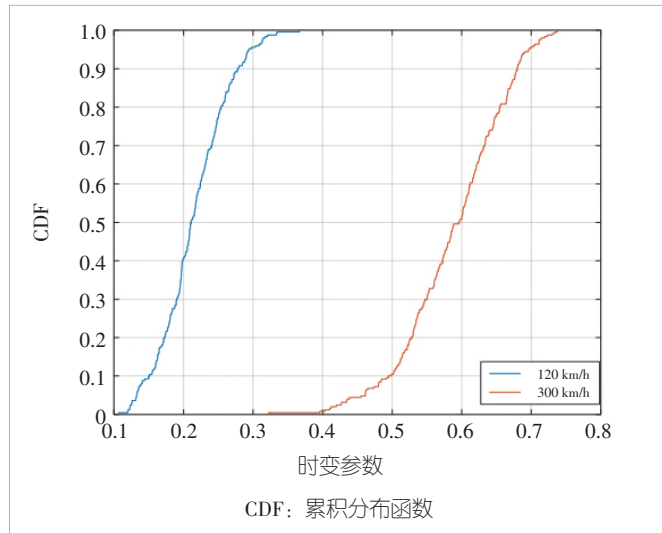


图8 高铁时变特性在不同速度下的差异

处理, 即各节点在接收数据合并之前, 已完成信道插值估计和频偏补偿。该处理方式不会影响多节点数据合并增益的获取。

3.4 高铁下行数据分布式处理的分析

考虑到高铁场景中高速运动带来的频偏影响, 若各 AP 节点间的频偏与相位未能有效对齐, 则在联合处理时会导致系统性能下降。图 9 仿真对比了单个 8T (single_8T) 节点与两个分布式 8T 节点 (cell_free_double_8T) 在无蜂窝组网下为用户发送数据的性能。结果表明, 若未经频偏与相位对齐处理, 采用无蜂窝节点联合发送的方式反而会造成性能损失。

考虑各节点间的频偏处理, 一种可行的方式是在各 AP 处独立进行频偏补偿, 统一向零频偏靠拢, 随后将处理后的信息汇聚至 CPU 进行后续处理。同时, 不同 AP 的权值也需进行补偿对齐, 经过权值拉齐后, 信号可实现有效增强。

$$\begin{aligned} r(f) &= \left(\sum_i h_i(f) w_i(f) s(f) \right) + n(f) = \\ &= \left(\sum_i A_i(f) e^{j\varphi(f)} s(f) \right) + n(f) = \\ &= \left(\sum_i A_i(f) \right) e^{j\varphi(f)} s(f) + n(f) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{SNR}(f) = \frac{\left| \sum_i A_i(f) \right|^2}{\sigma_n^2} \quad (7)$$

其中, $h_i(f)$ 代表第 i 个 AP 的频域信道, $w_i(f)$ 代表第 i 个 AP 的频域发送权值, $A_i(f)$ 代表第 i 个 AP 的等效信道 $h_i(f)w_i(f)$ 的幅度, $\varphi(f)$ 代表第 i 个 AP 的等效信道

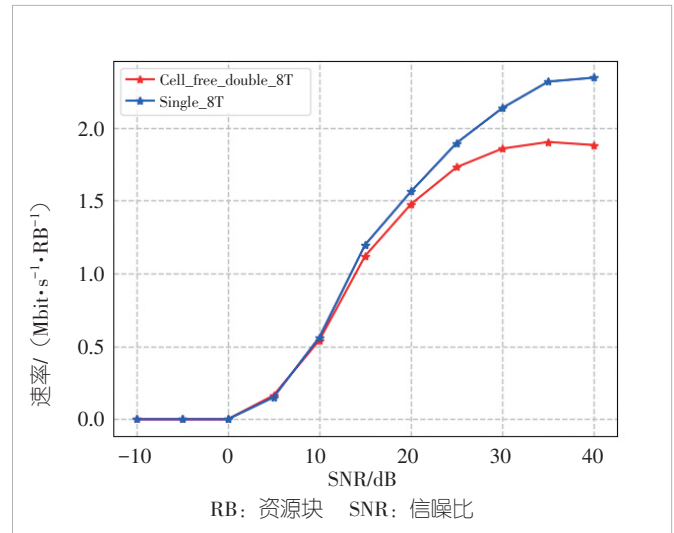


图9 无蜂窝和单节点发送性能对比

$h_i(f)w_i(f)$ 的相位。

不同 AP 的空口信道 $h_i(f) = \alpha_i(f)e^{j\psi_i(f)}$, 其权值 $w_i(f) = \rho_i(f)e^{j\delta_i(f)}$ 。在使用权值补偿后, $\psi_i(f) + \delta_i(f) = \psi_j(f) + \delta_j(f) = \varphi(f)$, 即不同 AP 在使用权值补偿后的等效信道相位均拉齐至 $\varphi(f)$ 。

4 结束语

中国持续推进“八纵八横”高速铁路网及重点客运普速铁路的移动网络信号连续覆盖, 以支撑旅客通话及综合信息服务需求。本文提出的高铁无蜂窝组网方案, 采用无蜂窝网络架构, 实现了从“以网络为中心”向“以用户为中心”的转变。未来, 随着业务的快速发展和高铁无线网络覆盖的持续升级, 该方案能够有效保障用户体验, 助力运营商构建高质量无线网络覆盖体系。

参考文献

- [1] 王佐, 李晓萌, 董瑶, 等. 高铁 5G NR2.1 覆盖方案和特性参数验证 [J]. 通信与信息技术, 2024, (2): 74–78+82
- [2] 李新, 王强. 高铁 5G 覆盖网络建设挑战及应对 [J]. 电信快报, 2024 (1): 1–4
- [3] 胡彦丰, 王东明, 梁楚龙, 等. 无蜂窝大规模 MIMO 中的大规模随机接入 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(1): 26–32. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401006
- [4] 吴越, 王东明, 尤肖虎. 面向 6G 的无蜂窝无线接入网技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 14–25. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404004
- [5] 章嘉懿. 无蜂窝大规模 MIMO 系统研究进展与发展趋势 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2019, 31(3): 285–292
- [6] Ammar H A, Adve R, Shahbazpanahi S, et al. User-centric cell-free massive MIMO networks: a survey of opportunities, challenges and solutions [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(1): 611–652. DOI: 10.1109/comst.2021.3135119
- [7] Wang R, Shen M, He Y, et al. Performance of cell-free massive MIMO with joint user clustering and access point selection [J]. IEEE access, 2021, 9: 40860–40870. DOI: 10.1109/

ACCESS.2021.3056051

- [8] Ngo H Q, Ashikhmin A, Yang H, et al. Cell-free massive MIMO versus small cells [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2017, 16(3): 1834–1850. DOI: 10.1109/TWC.2017.2655515
- [9] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术 [J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963–987
- [10] Kassam J, Castanheira D, Silva A, et al. A review on cell-free massive MIMO systems [J]. Electronics, 2023, 12(4): 1001. DOI: 10.3390/electronics12041001
- [11] Shaik Z H, Bjornson E, Larsson E G. Cell-free massive MIMO with radio stripes and sequential uplink processing [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2020: 1–6. DOI: 10.1109/iccworkshops49005.2020.9145164
- [12] Björnson E, Sanguinetti L. Making cell-free massive MIMO competitive with MMSE processing and centralized implementation [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2020, 19(1): 77–90. DOI: 10.1109/TWC.2019.2941478
- [13] Yuan Z F, Ma Y H, Yu G H. LMMSE processing for cell-free massive MIMO with radio stripes and MRC fronthaul [C]//2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2022: 1336–1340. DOI: 10.1109/WCNC51071.2022.9771691
- [14] Ma Y H, Yuan Z F, Yu G H, et al. Cooperative scheme for cell-free massive MIMO with radio stripes [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2021: 1–6. DOI: 10.1109/iccworkshops50388.2021.9473493

作者简介



孙普, 中国电信股份有限公司河南分公司副总经理; 研究方向为无线通信、新型基础设施规划及企业数字化转型。