



研究与开发

# FDD 无蜂窝大规模 MIMO 系统 CSI 反馈及预编码研究

张德坤<sup>1,2</sup>, 白宝明<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学空天地一体化综合业务网全国重点实验室, 陕西 西安 710071;

2. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 实现频分复用 (frequency division duplexing, FDD) 无蜂窝大规模多输入多输出 (multiple input multiple output, MIMO) 系统的下行系统容量最大化, 关键在于设计既具有高成形增益又能有效抑制多用户间干扰的预编码矩阵, 而精准的下行链路信道状态信息 (channel state information, CSI) 的获取则是计算预编码矩阵的基础。FDD 制式由于上下行链路不具备完美互易性, 故低开销、高精度的下行 CSI 获取是业界难题。为此, 提出了一种基于共址空间用户簇的 CSI 测量和反馈方案, 同时设计了联合簇级 CSI 反馈的两段式预编码优化方案。首先, 基于上下行统计互易性计算获得等效下行空间相关性, 利用用户反馈的信道质量和等效空间相关性联合构建了共址空间用户簇。其次, 基于大尺度衰落特征和 CSI 导频端口能力约束, 设计了 CSI 相干测量动态方案, 以及共址空间簇的统计 CSI 反馈方案, 显著地降低了反馈开销。最后, 在 CSI 测量阶段通过簇间用户统计协方差矩阵设计了大尺度缓变干扰消除预编码, 在下行调度阶段基于信号泄露噪声比 (signal-to-leakage-and-noise ratio, SLNR) 算法设计了簇内实时多用户干扰消除预编码, 二者级联构成每个用户的下行预编码优化权值。仿真结果表明, 提出的 CSI 反馈优化方案相对于文献中主路径增益信息反馈策略降低反馈开销 34%, 两段式预编码优化方案相对于 SLNR 预编码提升 FDD 无蜂窝大规模 MIMO 频谱效率 10.8%。

**关键词:** 频分复用无蜂窝大规模多输入多输出; 共址空间用户簇; 信道状态信息测量和反馈; 两段式预编码

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2024253

## Research on CSI feedback and precoding in FDD cell-free massive MIMO systems

ZHANG Dekun<sup>1,2</sup>, BAI Baoming<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China

2. ZTE Corporation, Shenzhen 518055, China

**Abstract:** For frequency division duplexing (FDD) cell-free massive multiple input multiple output (MIMO) systems, maximizing downlink capacity relies on designing a precoding matrix that achieves high beamforming gain and effectively suppresses multi-user interference. The accurate acquisition of downlink channel state information (CSI) is es-

收稿日期: 2024-09-22; 修回日期: 2024-11-25

通信作者: 白宝明, bmbai@mail.xidian.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2021YFA000500)

**Foundation Item:** The National Key Research and Development Program of China (No.2021YFA000500)



sential for calculating precoding matrix. However, due to the imperfect reciprocity between uplink and downlink in FDD systems, securing low-overhead and high-precision downlink CSI remains an industry challenge. Therefore, a CSI measurement and feedback scheme on the basis of co-located spatial user clusters was proposed, along with a two-stage precoding optimization scheme that integrated cluster-level CSI feedback. Firstly, equivalent downlink spatial correlation was obtained based on the calculation of uplink and downlink statistical reciprocity, and co-located space user clusters were jointly constructed using the downlink channel quality and equivalent spatial correlation. Secondly, a dynamic CSI coherent measurement scheme was designed based on large-scale fading characteristics and CSI pilot port capacity constraints, and a statistical CSI feedback scheme for co-located space clusters was developed, significantly reducing feedback overhead. Finally, during the CSI measurement phase, large-scale slowly varying interference elimination precoding was designed using the statistical covariance matrix between cluster users. During the downlink scheduling phase, real-time multi-user interference elimination precoding within clusters was designed on the basis of the signal-to-leakage-and-noise ratio (SLNR) algorithm. The two were cascaded to form the optimized downlink precoding weight values for each user. Simulation results show that the proposed CSI feedback optimization scheme reduces the feedback overhead by 34% compared with the path gain information feedback strategy in the literature, and the two-stage precoding optimization scheme improves the FDD non-cellular massive MIMO spectral efficiency by 10.8% compared with the SLNR precoding.

**Key words:** FDD cell-free massive MIMO, co-located spatial user cluster, CSI measurement and feedback, two-stage precoding

## 0 引言

近年来, 密集组网已经成为无线移动通信提升网络吞吐量的重要手段。然而, 密集组网下小区半径显著减小, 小区间干扰急速增加, 导致边缘用户体验速率显著恶化。为了解决这一难题, 一种以“用户为中心”的无蜂窝大规模多输入多输出 (multiple input multiple output, MIMO) 网络架构<sup>[1-4]</sup>被提出, 在无蜂窝大规模 MIMO 网络中, 中心处理单元 (central processing unit, CPU) 能够基于用户无线信道环境, 为每个用户动态分配远程天线单元 (remote antenna unit, RAU) 组进行协作服务, 从而极大地提升了每个用户的体验速率。

实现无蜂窝大规模 MIMO 系统下行链路增益的最大化, 关键在于设计既具有高成形增益又能强效抑制多用户间干扰的预编码矩阵。而精准的下行链路信道状态信息 (channel state information, CSI)<sup>[5-6]</sup>的获取则是计算预编码矩阵的基础。

对于 CSI 的准确获取, 不同制式差异较大。对于时分双工 (time division duplexing, TDD) 系统来说, 由于上下行信道完美互易, 可以通过上行导频获得精准的 CSI, 这项任务相对容易; 对于频分双工 (frequency division duplexing, FDD) 系统, 上下行信道不具备完美互易性, 为了达到与完美 CSI 相当的速率, 导频数量以及 CSI 反馈开销都与 RAU 侧的发射天线数量成正比<sup>[7-9]</sup>, 这项任务挑战极大。然而, FDD 在当前 5G 通信系统中被广泛采用, 拥有更成熟的工业产品和市场份额, 并且许多频段被分配给 FDD 系统<sup>[10-11]</sup>。此外, 由于 TDD 系统需要在上行和下行传输之间不断切换, 用户的上行接入以及 RAU 的瞬时信道估计都具有挑战性, 而 FDD 系统则具有低传输延迟、连续信道估计和广泛覆盖的优势<sup>[7]</sup>。因此, FDD 无蜂窝大规模 MIMO 系统在未来的 6G 网络具备更商用潜力, 本文聚焦讨论 FDD 制式下的 CSI 反馈难题。

FDD 无蜂窝大规模 MIMO 系统中, 每个用户协作服务的 RAU 一般大于 1 个, 因此需要考虑估

计和反馈多个RAU的联合下行CSI,这使得CSI的获取任务更具有挑战性。因此,需要针对FDD无蜂窝大规模MIMO系统设计一种低反馈开销、高性能的CSI测量和反馈方案。

目前相关的研究主要集中在利用FDD制式上行和下行链路的统计互易性来减少反馈开销<sup>[10-13]</sup>。为了减少FDD无蜂窝大规模MIMO的反馈开销,文献[11]提出了一种基于部分互易性的码本,主要针对低秩信道有较好的性能收益,非视距径信道性能相对传统码本无明显收益。文献[13]提出选择几个主导路径,然后反馈所选路径的路径增益信息。通过利用在上行链路和下行链路信道中的角度互易性,RAU直接从上行链路导频信号获得发射角(angle of departure, AoD),进行重构下行信道。文献[14-16]主要通过几何统计信道建模研究了多个协作RAU的信道相关性,重点关注用户侧局部散射体密度对这种相关性的影响。

上述文献针对CSI反馈所提出的方案,随无蜂窝大规模MIMO网络中RAU的增加,CSI反馈信息会同步增加,反馈开销依旧较大,本文需要在此基础上进一步优化。

文献[17-18]研究了FDD大规模MIMO的预编码方案。其中,文献[17]提出了一个基于深度学习的CSI反馈框架,以提升CSI反馈精度,从而提升成形增益。文献[18]主要对FDD大规模MIMO系统下的恒定包络预编码进行优化。文献[19]提出了基于RIS辅助无蜂窝大规模MIMO的预编码设计,是对正则化迫零(regularized zero forcing, RZF)预编码算法的优化,提升了TDD无蜂窝大规模MIMO的系统性能。

上述文献提出的预编码方案均有其价值,但主要针对集中式大规模MIMO提出,天线规模有限,如果直接应用到FDD无蜂窝大规模MIMO系统,运算复杂度和信息交互量均非常大。因此,需要针对FDD无蜂窝大规模MIMO系统分布式特点重新设计低复杂度、高性能的预编码

算法。

本文在现有工作的基础上,聚焦研究了FDD无蜂窝大规模MIMO系统的CSI测量、CSI反馈机制优化,以及预编码方案优化,以达到FDD无蜂窝大规模MIMO系统下行链路增益的最大化。

本文针对FDD无蜂窝大规模MIMO系统研究的主要贡献总结如下。

(1) 本文提出利用用户间相关性构建共址空间用户簇,同时,为每个用户设计动态CSI测量RAU集合。通过共址空间用户簇和动态测量集进行CSI测量和反馈,极大地降低了反馈开销。

(2) 本文提出了簇间基于用户统计协方差矩阵构建大尺度缓变干扰消除预编码,簇内基于信号泄露噪声比的实时多用户干扰消除预编码,二者级联构成每个用户的下行预编码优化权值。性能相对信号泄露噪声比(signal-to-leakage-and-noise ratio, SLNR)预编码算法得到了显著的提升。

## 1 FDD无蜂窝大规模MIMO系统模型

FDD无蜂窝大规模MIMO系统示意图如图1所示,假设该网络中部署了 $M$ 个RAU,同时服务 $K$ 个用户,并且每个RAU都有 $N$ 个天线单元,每个用户配备一个天线单元。

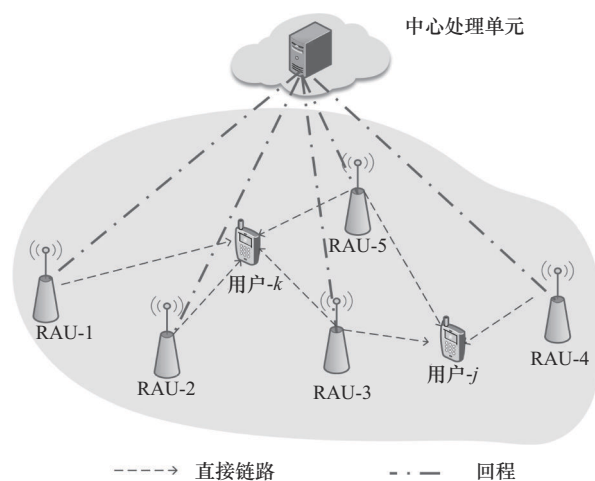


图1 FDD无蜂窝大规模MIMO系统示意图



设  $B = \{1, \dots, m, \dots, M\}$  和  $U = \{1, \dots, k, \dots, K\}$  分别表示 RAU 和用户集合, 本文考虑了由  $L$  条路径组成的窄带射线信道模型<sup>[12]</sup>。

由第  $m$  个 RAU 到第  $k$  个用户的下行信道向量  $\mathbf{h}_{m,k} \in \mathbf{C}^N$  表示为:

$$\mathbf{h}_{m,k} = \sum_{i=1}^L g_{m,k,i} \mathbf{a}(\theta_{m,k,i}) \quad (1)$$

其中,  $\theta_{m,k,i}$  表示第  $m$  个 RAU 到第  $k$  个用户在第  $i$  个路径的入射角,  $g_{m,k,i} \sim \text{CN}(0, 1)$  表示第  $m$  个 RAU 到第  $k$  个用户的第  $i$  个路径的复数路径增益。另外  $\mathbf{a}(\theta_{m,k,i}) \in \mathbf{C}^N$  表示入射角为  $\theta_{m,k,i}$  的导向矢量, 具体为:

$$\mathbf{a}(\theta_{m,k,i}) = \left[ 1, e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_{m,k,i}}, \dots, e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda} (N-1) \sin\theta_{m,k,i}} \right]^T \quad (2)$$

其中,  $d$  表示天线间距,  $\lambda$  表示信号波长。

RAU 集合发送的用户  $k$  的信号, 通过无线信道后, 用户  $k$  接收到的信号  $\mathbf{y}_k$  具体表示为:

$$\mathbf{y}_k = \sum_{m=1}^M \mathbf{h}_{m,k}^H \mathbf{w}_{m,k} \mathbf{s}_k + \sum_{j \neq k} \sum_{m=1}^M \mathbf{h}_{m,k}^H \mathbf{w}_{m,j} \mathbf{s}_j + \mathbf{n}_k \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{w}_{m,k} \in \mathbf{C}^N$  表示第  $m$  个 RAU 到第  $k$  个用户的预编码矩阵。 $\mathbf{s}_k$  表示用户  $k$  的发送数据。 $\mathbf{n}_k$  表示零均值、方差为  $\sigma^2$  的加性高斯白噪声。

基于式 (3) 可以推导出用户  $k$  的和速率  $R_k$  如式 (4) 所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{SINR}_{m,k} = \frac{\left| \sum_{m=1}^M \mathbf{h}_{m,k}^H \mathbf{w}_{m,k} \right|^2}{\sum_{j \neq k} \mathbb{E} \left[ \left| \sum_{m=1}^M \mathbf{h}_{m,k}^H \mathbf{w}_{m,j} \right|^2 \right] + \sigma_n^2} \\ R_k = \text{lb}(1 + \text{SINR}_{m,k}) \end{array} \right. \quad (4)$$

基于式 (4) 可知, 实现系统速率最大化, 需要每个用户的和速率最大化, 达成目标的关键在于设计性能优良的预编码权值。因此, 本文重点围绕 FDD 无蜂窝大规模 MIMO 系统中如何设

计出既具有高成形增益又能强效抑制多用户间干扰的预编码矩阵。精准的下行链路 CSI 是计算预编码矩阵的基础。FDD 制式由于上下行链路不具备完美互易性, 故低开销、高精度的下行 CSI 获取是业界难题。因此, 首先解决 CSI 反馈重构的问题, 其次基于 CSI 重构信息进一步设计性能优良的预编码矩阵。

## 2 多层次动态协作簇机制

在 FDD 无蜂窝大规模 MIMO 系统中, 大量的 RAU 广泛灵活地部署在服务区域, 并通过回程或前传链路相互协作, 为每个用户提供高质量的数据传输服务。由于 RAU 分布在不同的地理位置, 与每个用户的距离有远有近, 服务用户的信号强度有大有小, 如果所有 RAU 同时服务每个用户, 一方面会引起回程或前传链路中出现大量的信道和数据信息的传输, 另一方面远离服务用户的 RAU 带来的协作增益非常有限, 因此通常需要在无蜂窝网络中构建以用户为中心的 RAU 协作簇。

不同用户的协作簇中可能包含相同或不同的 RAU, 如果需要在相同的时频资源上同时服务多个用户, 多个协作簇中的部分 RAU 之间需要有效地协调资源、联合调度、用户间干扰消除、CSI 反馈等, 导致协作规模随用户数的增加而成倍增加, 回程或前传链路资源被大量占用, 实现复杂度大规模增加, 极大地影响了无蜂窝大规模 MIMO 系统的有效实施。为此, 本文针对 FDD 无蜂窝大规模 MIMO 系统考虑多层次协作簇架构, 3 层协作簇结构示意图如图 2 所示, 旨在不影响系统性能的基础上, 降低系统处理复杂度。

第一个层级是 CSI 测量和反馈簇。基于 FDD 量化码本反馈机制, 设计下行 CSI 测量和反馈簇, 将空间高相关的用户聚类为一个簇, 可以极大地降低反馈开销, 同时该簇内的用户只能时分或频分调度, 这对于 FDD 系统具有非常大的实际应用价值。

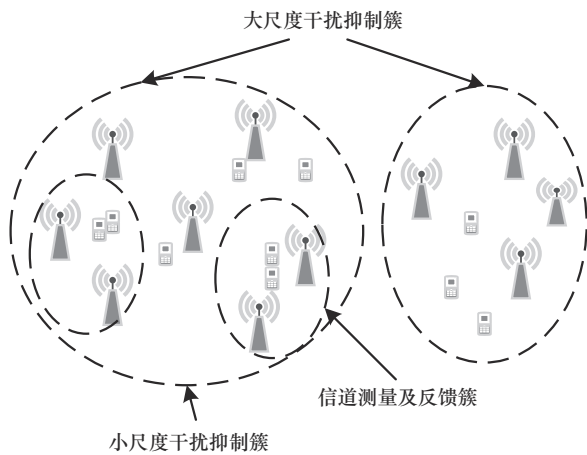


图2 3层协作簇结构示意图

第二个层级是大尺度统计干扰抑制簇。该簇通常以用户间的距离或信道相关性为目标函数进行分簇，仅需要构建大尺度的干扰抑制策略，降低同频干扰即可，整体变化较慢。

第三个层级是小尺度干扰抑制簇。该簇主要是具有部分RAU交集的用户构成，通常复用相同的时频资源的用户变化较快，且同频干扰严重，通常需要设计精细化的预编码矩阵，降低用户间的干扰。

后续章节围绕上述的3个簇展开细化研究。

### 3 CSI测量及反馈优化方案

#### 3.1 CSI测量方案设计

FDD无蜂窝大规模MIMO系统中，每个用户实际只有部分RAU为其服务，如果采用传统的全量RAU参与CSI测量和反馈方案，不仅会造成测量和调度RAU不匹配，同时全量天线反馈开销也会非常大。因此，需要设计低开销、匹配服务RAU集合的CSI测量机制。

上述问题的本质为：每个用户基于全量RAU测量和反馈不合理，需要根据用户实际服务的RAU集合进行CSI测量和上报。基于该本质和CSI测量反馈簇的思想，设计每个用户动态的CSI测量机制，具体如下。

首先，基于用户支持的CSI导频端口数约束

(3GPP协议在码本设计时同时考虑码本精度和反馈开销的约束，对最大支持的CSI导频端口数进行了限制)，选择服务用户的RAU集合。假设大部分用户最大支持 $Q$ 个CSI导频端口，每个RAU最大配置 $P$ 个导频端口，则将 $\lceil Q/P \rceil$ 个相邻近的RAU组成一个测量簇。

其次，为了使每个用户都最大化测量准确，同时考虑用户的移动性，每个测量簇之间需要重叠设计。

最后，每个用户的CSI测量RAU簇，根据用户与RAU簇中心的距离，动态切换RAU测量簇。

针对上面的内容，实例说明，假设每个RAU配置4个天线，故每个RAU配置4个CSI导频端口，用户最大支持32个CSI导频端口，则最大8个RAU组成一个测量簇，无蜂窝大规模MIMO系统CSI测量图样如图3所示。

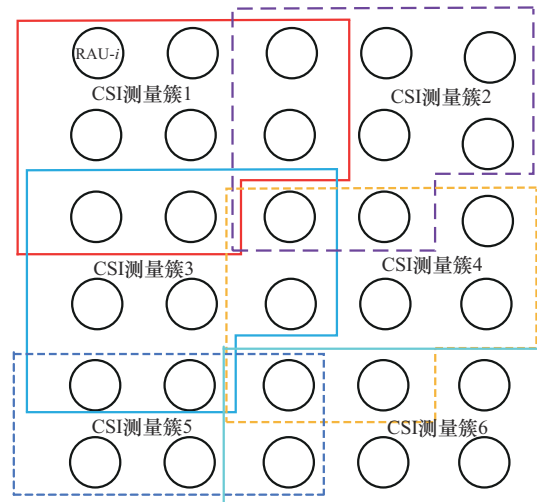


图3 无蜂窝大规模MIMO系统CSI测量图样

从图3可知，部分RAU在两个CSI测量簇中，可以采用时分或者频分的策略，保证不同簇之间的CSI测量正交发送，为了提升测量效率，本文建议优先频分，从而准确测量用户的下行CSI。非相邻且满足空间隔离度的CSI测量簇可以复用相同时频资源发送CSI测量信号。无蜂窝大规模MIMO系统CSI测量时序如图4所示，不同颜色表



示相邻的CSI测量簇频分发送CSI信号。

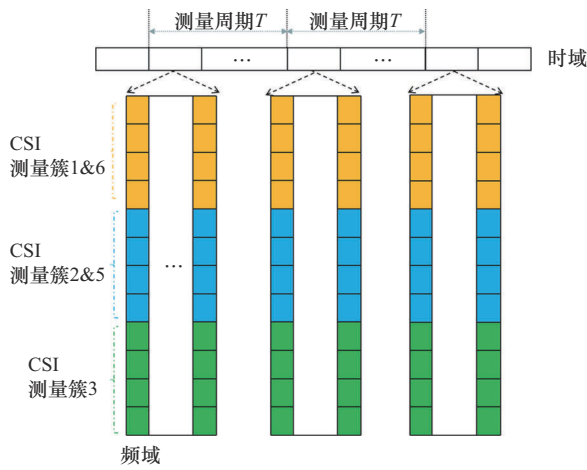


图4 无蜂窝大规模MIMO系统CSI测量时序

### 3.2 CSI 反馈方案设计

第3.1节设计的CSI测量方案解决了测量和调度RAU集合不匹配的问题，同时降低了CSI的反馈开销。但是FDD无蜂窝大规模MIMO系统中用户数巨大，每个用户的下行CSI均全量反馈，则上行时频资源开销依旧非常大。因此需要设计一种低反馈开销，且性能损失在容忍范围内的CSI反馈方案。

参考当前5G和5G-Advanced系统，针对FDD制式均采用量化码本反馈的方式获得下行CSI，包括低精度的TypeI码本和高精度的TypeII码本，同时FDD制式具有的部分统计互易性，FDD制式具有的统计互易性特征见表1。借鉴3GPP的码本设计思想，同时考虑上行和下行载波频率接近，可以充分利用角度域、时延域等大尺度的统计互易性构建共址空间用户簇，降低CSI反馈开销。

表1 FDD制式具有的统计互易性特征

信道特征		互易性
快变特征	角度	是
	时延	是
统计特征	协方差	是
	角度功率谱	是

#### (1) 空间相关性计算

为了构建共址空间用户簇，首先，每个用户基于上行探测参考信号，利用经典的MUSIC谱估计算法估计角度信息和时延信息。然后，根据信号每条传播路径的角度信息和时延信息，重构上行信道矩阵，第 $m$ 个RAU、第 $i$ 个用户重构的等效上行信道表示为：

$$\tilde{\mathbf{h}}_{m,i}^u = \frac{1}{\sqrt{L_m}} \sum_{i=1}^{L_m} g_i^u \mathbf{a}(\theta_i) \quad (5)$$

其中， $L_m$ 表示子径数目， $g_i^u$ 是幅度系数， $\mathbf{a}(\theta_i)$ 表示第 $i$ 个用户入射角为 $\theta_i$ 的导向矢量。

依据FDD信道的统计互易性，上行与下行信号具有相同的传播方向角度和传播路径数，其阵列响应的变化仅与上行和下行的频率差有关，其中，上下行频点转移矩阵 $\mathbf{T}(\theta_i)$ 表示为：

$$\mathbf{T}(\theta_i) = \text{diag} \left\{ 1, e^{(f_d - f_u)Y(\theta_i)}, \dots, e^{(f_d - f_u)(N-1)Y(\theta_i)} \right\} \quad (6)$$

其中， $Y(\theta_i) = j2\pi d \sin(\theta_i)/c$ ， $d$ 为RAU侧的天线间距， $f_d$ 和 $f_u$ 分别为下行和上行载波频率， $c$ 为光速， $N$ 为基站天线数目。基于式(5)和式(6)可得下行等效信道 $\tilde{\mathbf{h}}_{m,i}^d$ ，具体为：

$$\tilde{\mathbf{h}}_{m,i}^d = \frac{1}{\sqrt{L_m}} \sum_{i=1}^{L_m} g_i^u \mathbf{T}(\theta_i) \mathbf{a}(\theta_i) \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_{m,i} = \tilde{\mathbf{h}}_{m,i}^d (\tilde{\mathbf{h}}_{m,i}^d)^H \quad (8)$$

对 $\mathbf{R}_{m,i}$ 进行特征值分解，即 $\mathbf{R}_{m,i} = \mathbf{v}_{m,i} \mathbf{A}_{m,i} \mathbf{v}_{m,i}^H$ ，获得特征向量 $\mathbf{v}_{m,i}$ 。测量RAU集合一致的用户 $i$ 和用户 $j$ ，联合测量RAU集合的所有特征向量，分别得到向量 $\mathbf{v}_i = [\mathbf{v}_{b,i}, \dots, \mathbf{v}_{m,i}]$ 和 $\mathbf{v}_j = [\mathbf{v}_{b,j}, \dots, \mathbf{v}_{m,j}]$ ，基于联合特征向量计算空间相关性，如式(9)所示。

$$\rho_{i,j} = \left| \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_j^H \right| \quad (9)$$

所有用户之间的相关性组成相关性矩阵 $\mathbf{C}_q$ ，如式(10)所示。

$$C_q = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{1,2} & \rho_{1,3} & \cdots & \rho_{1,K-1} & \rho_{1,K} \\ \rho_{2,1} & 1 & \rho_{2,3} & \cdots & \rho_{2,K-1} & \rho_{2,K} \\ \rho_{3,1} & \rho_{3,2} & 1 & \cdots & \rho_{3,K-1} & \rho_{3,K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{K-1,1} & \rho_{K-1,2} & \rho_{K-1,3} & \cdots & 1 & \rho_{K-1,K} \\ \rho_{K,1} & \rho_{K,2} & \rho_{K,3} & \cdots & \rho_{K,K-1} & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

### (2) 共址空间用户簇构建

根据 (1) 中获得的用户间的空间相关性，构建空间共址用户簇如下。

#### 步骤1 共址角度域用户聚类

由于码本是对空间信道的角度量化，基于相邻角度的码本相关性，确定共址空间用户的信道相关性的门限。基于确定的相关性门限，利用经典的聚类算法和用户之间的相关性矩阵  $C_q$ ，实现用户的角度共址聚类，将网络中的所有用户划分为  $S$  簇。

#### 步骤2 CSI测量并上报

在共址角度域空间簇的用户，一定满足第 3.1 节的 CSI 测量方案（因为信道高相关，一定是相同的服务 RAU 集合）。CPU 指示簇内用

$$\mathbf{w}_i = \mathbf{w}_{i,1} \mathbf{w}_{i,2} \mathbf{w}_{i,f} = \begin{bmatrix} w_{i,1,1} & & & \\ & \ddots & & \\ & & & w_{i,N,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{i,1,2} \\ \vdots \\ w_{i,N,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{i,1,f}^H \\ \vdots \\ w_{i,N,f}^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{i,1,1} w_{i,1,2} w_{i,1,f}^H \\ \vdots \\ w_{i,N,1} w_{i,N,2} w_{i,N,f}^H \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中， $\mathbf{w}_{i,1}$  表示空域基矢量， $\mathbf{w}_{i,2}$  表示空域基矢量和频域基矢量的加权系数， $\mathbf{w}_{i,f}$  表示频域基矢量， $w$  表示矩阵元素。 $N = \lfloor Q/P \rfloor$  是第  $i$  用户在第 3.1 节中选择的 RAU 测量簇中的 RAU 数目。

#### 步骤3 簇级协方差矩阵计算

共址空间组  $d$  内的每个用户基于步骤 1，轮番上报并重构对应的码本权值，之后基于式 (12)，可以获得簇级协方差矩阵。

$$\mathbf{R}_d = \frac{1}{U_d} \sum_{i=1}^{U_d} \mathbf{w}_i \mathbf{w}_i^H \quad (12)$$

其中， $U_d$  表示共址空间组  $d$  内的用户数。 $\mathbf{w}_i$  表示

户，每个周期上报簇内一个用户的 CSI，通过周期性轮寻上报的方式，可以获得簇内所有用户在相同服务 RAU 集合内测量的 CSI。

#### 步骤4 共址功率域聚类

通过步骤 2 反馈的 CSI 信息，CPU 获得每个用户的空间秩 (rank indicator, RI) 和信道质量指示 (channel quality indicator, CQI)，基于该信息进一步将共址角度域簇内的用户划分为不同信道质量簇，即满足相同 RI 和 CQI 的用户划分为同一信道质量共址空间。由于共址角度域簇内的用户数相对较小，通常采用遍历法划分即可。

同时满足共址角度域和共址功率域的用户，构成共址空间用户簇。

### (3) 共址空间簇 CSI 反馈重构

假设所有用户共分为  $D$  个共址空间簇。第  $d$  组内用户基于上报的码本信息，计算簇内统计协方差矩阵，之后进行簇级 CSI 重构。

#### 步骤1 用户上传的码本信息重构

本文的 CSI 反馈过程参考 3GPP 中 5G 的 Type II 码本反馈过程<sup>[20]</sup>，第  $i$  用户的反馈码本  $\mathbf{w}_i$  重构为：

反馈码本量化重构的预编码值。

#### 步骤2 共址空间簇 CSI 重构

对共址空间簇内所有用户的协方差矩阵进行特征值分解，并选择对应的前 RI 列作为共址空间簇的重构 CSI 对应的基础权值。

$$\mathbf{R}_d = \mathbf{U}_d \mathbf{D}_d \mathbf{U}_d^H \quad (13)$$

$$\mathbf{w}_d = \mathbf{U}_d(:, 1:RI) \quad (14)$$

其中， $\mathbf{U}_d$  表示 SVD 分解后的  $\mathbf{U}$  矩阵。

实现 FDD 无蜂窝大规模 MIMO 下行系统容量最大化，关键在于设计既具有高成形增益又能强效抑制多用户间干扰的预编码矩阵，而精准的



下行链路CSI的获取则是计算预编码矩阵的基础。

本节已经获得FDD无蜂窝大规模MIMO系统重构的簇级CSI信息。第4节将基于重构的簇级CSI,进行全新的预编码方案设计,以达到FDD无蜂窝大规模MIMO系统中用户的体验速率加权和最大化。

#### 4 两段式联合预编码设计

针对系统用户体验速率加权和最大化问题,抽象出具体的目标函数和约束条件,具体为:

$$\arg \max \sum_{i=1}^K a_i \cdot \frac{1}{\sum_n \sum_m \text{lb}(1 + \text{SINR}_{i,m,n})} \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \sum_n \sum_{i=1}^K \mathbf{w}_{i,m,n} \mathbf{w}_{i,m,n}^H \leq P_{\max} \quad (15a)$$

$$\sum_n \sum_m \text{lb}(1 + \text{SINR}_{i,m,n}) \geq B_i, \forall i \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (15b)$$

其中,  $\text{SINR}_{i,m,n}$ 表示第 $n$ 个时隙第 $m$ 个RAU第 $i$ 个用户的信干噪比,具体表达如第1节式(4)所示。 $\mathbf{w}_{i,m,n}$ 表示用户 $i$ 在时隙 $n$ 的预编码权值。 $P_{\max}$ 表示RAU的最大发送功率, $B_i$ 表示用户 $i$ 的最低保障速率。

上述优化问题无法直接求解,本文充分利用统计互易的原理,从全局视角优化设计FDD无蜂窝大规模MIMO系统的预编码权值,提出两阶段预编码方案,具体包括:簇间统计干扰消除预编码和簇内用户间实时干扰消除预编码,详细内容如下。

##### 步骤1 簇间统计干扰消除预编码

基于第3.2节计算的空间相关性,将小区的用户分为 $G$ 组大尺度干扰抑制簇(如图2所示),求出每组用户的统计CSI的平均值,即统计协方差矩阵。利用每组用户的统计协方差矩阵和SLNR算法,设计组间干扰消除矩阵 $\mathbf{W} = [\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \mathbf{W}_g, \dots, \mathbf{W}_G]$ 其中,第 $g$ 组用户的SLNR $_g$ 的期望值 $E\{\text{SLNR}_g\}$ 表示为

$$E\{\text{SLNR}_g\} = \frac{\text{Tr}\{\mathbf{W}_g^H \mathbf{R}_g \mathbf{W}_g\}}{\text{Tr}\left\{\mathbf{W}_g^H \left(\sum_{k=1, k \neq g}^G \mathbf{R}_k + \mu \mathbf{I}_M\right) \mathbf{W}_g\right\}} \quad (16)$$

其中,  $\text{Tr}\{\cdot\}$ 表示求矩阵的迹,  $\mathbf{W}_g$ 为第 $g$ 组用户的第一阶段预编码矩阵,  $\mathbf{R}_g$ 为第 $g$ 组用户的统计CSI协方差矩阵,  $\mu$ 为噪声权重,表示噪声对各组用户功率泄露的影响。 $\mathbf{W}_g$ 的设计应使 $E\{\text{SLNR}_g\}$ 最大。考虑运算量的同时,最大限度地降低干扰,基于如下步骤计算 $\mathbf{W}_g$ 。

##### 子步骤1-1 计算干扰零空间矩阵

对 $\sum_{k=1, k \neq g}^G \mathbf{R}_k + \mu \mathbf{I}_M$ 进行Cholesky分解,得到矩阵 $\mathbf{C}$ ,该矩阵满足式(17)。

$$\begin{cases} \sum_{k=1, k \neq g}^G \mathbf{R}_k + \mu \mathbf{I}_M = \mathbf{C}^H \mathbf{C} \\ \mathbf{Q}_g = \mathbf{C}^{-1} \end{cases} \quad (17)$$

##### 子步骤1-2 计算第一阶段预编码矩阵

对 $\mathbf{Q}_g^H \mathbf{R}_g \mathbf{Q}_g$ 进行特征值分解,得到 $\mathbf{Q}_g^H \mathbf{R}_g \mathbf{Q}_g = \mathbf{F}_g^H \mathbf{A}_g \mathbf{F}_g$ 。由此可得第 $g$ 组的第一阶段预编码矩阵 $\mathbf{W}_g$ 如式(18)所示。

$$\mathbf{W}_g = \mathbf{Q}_g \mathbf{F}_g \begin{bmatrix} \mathbf{I}_m \\ \mathbf{0}_{(M-m) \times m} \end{bmatrix} \quad (18)$$

子步骤1-3 第一阶段预编码矩阵作用到CSI测量

RAU向所有用户发送下行CSI导频,并将第一阶段预编码矩阵 $\mathbf{W} = [\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \mathbf{W}_g, \dots, \mathbf{W}_G]$ 加在CSI导频信号上发送至各组用户。

第 $g$ 干扰簇、第 $d$ 测量组的第 $k$ 个用户根据接收到的CSI导频信号,估计出等效信道,即 $\mathbf{H}_{k,g} \mathbf{W}_g$ ,之后对该等效信道进行量化处理,并基于第3节方案进行测量和反馈信息到RAU,并获得 $\mathbf{w}_{g,d,k}$ 。

##### 步骤2 簇内实时干扰消除预编码

考虑FDD制式的统计互易性,针对第 $g$ 干扰簇内满足空分复用的用户,进一步基于SLNR算法计算第二阶段预编码权值,则第 $g$ 干扰簇、第 $d$ 测量组内的用户 $k$ 对应的预编码权值为:

$$p_{g,d,k} = \left( \sum_{j \notin U_{g,d}} \mathbf{Rxx}_j \right)^{-1} w_{g,d,k} \quad (19)$$

其中,  $\mathbf{Rxx}_j$  是属于第  $g$  干扰簇, 但不属于第  $d$  测量组的用户  $j$  对应的协方差矩阵,  $w_{g,d,k}$  是第  $g$  干扰簇, 第  $d$  测量组的用户  $k$  的基础权值, 由第 3.2 节和第 4 节第一阶段预编码联合计算获得。

### 步骤 3 级联预编码

考虑第一阶段预编码矩阵  $W_g$  和第二阶段预编码矩阵  $p_{g,d,k}$ , 得到用户  $k$  的联合预编码矩阵为:

$$w_k = W_g p_{g,d,k} \quad (20)$$

RAU 将预编码矩阵  $w_k$  作用到用户  $k$  的发送数据进行发送, 接收侧获得对应 SINR。

## 5 仿真及数据分析

本节主要针对所提出的 CSI 反馈优化和预编码优化算法, 基于 FDD 无蜂窝大规模 MIMO 系统进行仿真评估, 仿真参数配置见表 2。

表 2 仿真参数配置

参数名	取值
RAU 数目	128
用户数目	128
信道模型	CDL-A
频点	4.9 GHz
区域长度	1 000 m
大尺度衰落模型	$PL = 28 + 40 \lg d + 20 \lg f_c$

注: 其中,  $d$  表示用户到 RAU 的距离, 单位为 km;  $f_c$  表示中心频点, 单位为 MHz (即表 2 中的 4.9 GHz)

### (1) CSI 反馈策略评估及分析

将 128 个 RAU 和 128 个用户随机分布在仿真条件设定的区域范围内, 采用不同的 CSI 测量和反馈机制获得用户的 CSI, CPU 根据获得的 CSI 计算预编码权值, 作用到对应用户的下行数据上发送。通过约束每个用户的反馈比特数, 对比文献[12]中的主路径增益信息反馈策略 (path gain information, PGI)、经典的 AoD 反馈重构策略和本文提出的簇级 CSI 反馈方案的性能。

CSI 反馈策略和速率性能如图 5 所示, 本文提出的 CSI 反馈策略主要通过将用户下行信道矩阵奇异值分解后的特征向量进行量化反馈。由于本文提出的 CSI 测量 RAU 集合相对于 PGI 和 AoD 策略显著缩小, 且通过构建的共址用户簇进行统计反馈, 整体反馈开销降低了 34%。在 16 bit 反馈约束下, 相对 PGI 和速率增益 8.6%。

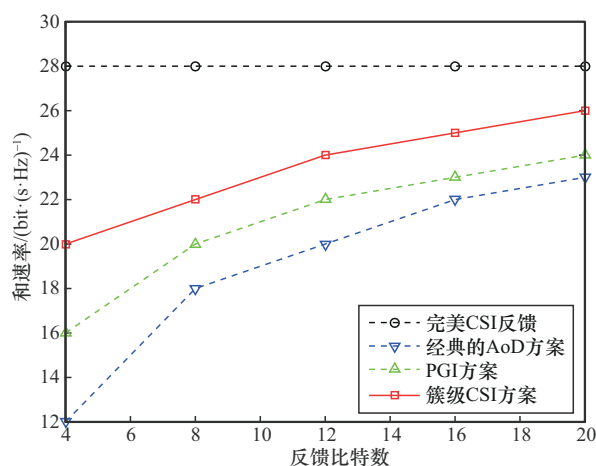


图 5 CSI 反馈策略和速率性能

16 bit 反馈约束下, 不同 CSI 策略与理想下行信道之间的相关性如图 6 所示, 展示了累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF) 曲线, 本文所提方案的所有用户下行反馈 CSI 与理想 CSI 的相关性最高。

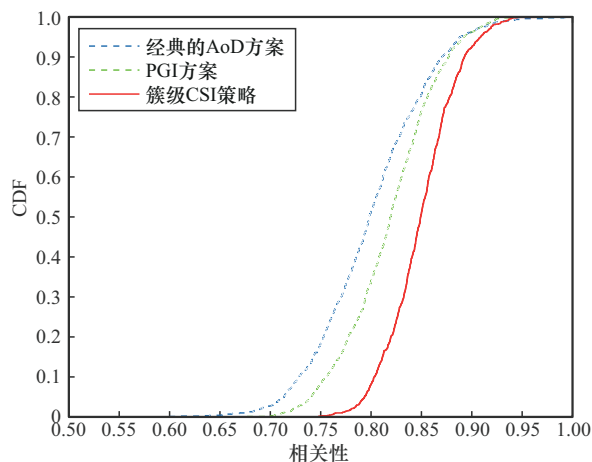


图 6 16 bit 反馈约束下, 不同 CSI 策略与理想下行信道之间的相关性



## (2) 预编码方案评估及分析

FDD无蜂窝大规模MIMO系统中,下行多用户的性能不仅依赖于CSI的精确度,也依赖于预编码方案的性能。主要对比了文献[21]的针对无蜂窝大规模MIMO的RZF,文献[22]中大规模MIMO下的SLNR预编码,文献[23]中提出的分布式预编码(joint distributed precoding, JDP),以及本文提出的两段式预编码方案。

由于上述文献提出的预编码主要针对TDD系统优化设计的,应用在FDD制式下性能相对一般。不同预编码方案的和速率对比如图7所示,基于本文提出的非理想CSI反馈策略在16 bit反馈开销的约束下,本文提出的两段式预编码性能最优,相对于RZF增益14.2%,相对于SLNR算法增益10.8%。与此同时,本文提出的两阶段预编码方案,依赖统计协方差矩阵设计,因此在非理想CSI下性能最鲁棒。

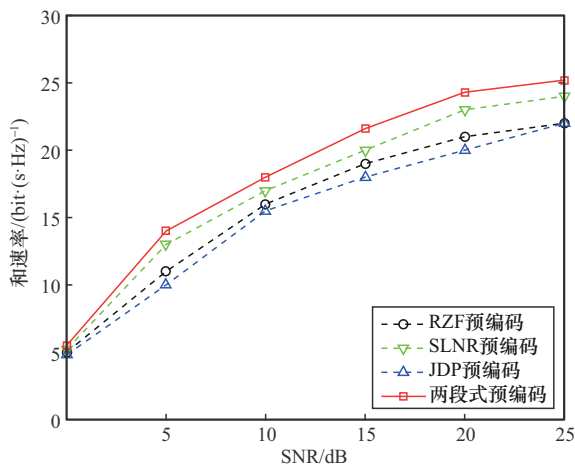


图7 不同预编码方案的和速率对比

## 6 结束语

无蜂窝大规模MIMO技术打破了传统蜂窝结构,是实现分布式大规模协作的有效途径,能够有效地解决蜂窝网场景边缘用户体验差的问题。该架构的基本理论继承于分布式MIMO,已被广泛证明有显著的性能增益,故无蜂窝将在6G系统中

中发挥重要作用。FDD制式在5G和5G-Advanced系统中均已广泛部署,基于频点和设备利旧的综合考虑,FDD无蜂窝大规模MIMO和TDD无蜂窝大规模MIMO均会在未来网络发挥重要作用。针对FDD系统,高精度、低开销的CSI方案是支撑FDD无蜂窝大规模MIMO协作传输的关键,本文针对该问题拆解为CSI测量和CSI反馈两个子问题进行研究,设计了用户动态测量簇和CSI反馈簇的综合CSI反馈方案,显著地降低了反馈开销,实验效果表明了本文所提的CSI反馈算法的有效性和鲁棒性。同时,针对FDD无蜂窝大规模MIMO的预编码难题也进行了详细研究,充分利用大尺度空间稀疏性,提出两段式预编码思想,空间隔离远的用户间构建大尺度统计干扰抑制权值,簇内用户构建实时的干扰消除预编码。实验结果表明本文所提的两阶段预编码方案性能最优。FDD无蜂窝大规模MIMO系统中的全新协作码本设计,后续也是一个重要的研究课题。另外,RIS辅助的FDD无蜂窝大规模MIMO系统的智能节能也是未来的研究重点,有望实现真正意义上的绿色通信。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] ZHANG J Y, CHEN S F, LIN Y, et al. Cell-free massive MIMO: a new next-generation paradigm[J]. IEEE Access, 2019, 7: 99878-99888.
- [3] 郭劭, 潘鹏, 范耀宗. CF-mMIMO系统中一种基于用户极坐标的低复杂度导频分配算法[J]. 电信科学, 2023, 39(7): 1-10. GUO S, PAN P, FAN Y Z. A low complexity pilot assignment algorithm based on user polar coordinates in CF-mMIMO systems[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(7): 1-10.
- [4] 王东明. 面向6G的无蜂窝大规模MIMO无线传输技术[J]. 移动通信, 2021, 45(4): 10-15. WANG D M. Wireless transmission techniques of cell-free massive MIMO for 6G mobile communications[J]. Mobile Communications, 2021, 45(4): 10-15.
- [5] LEE G, RAHMAN M S, ONGGOSANUSI E. CSI feedback for distributed MIMO[C]//Proceedings of the 2022 IEEE Wire-

- less Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 2154-2159.
- [6] JIN Y, ZHANG J Y, JIN S, et al. Channel estimation for cell-free mmWave massive MIMO through deep learning[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(10): 10325-10329.
- [7] JINDAL N. MIMO broadcast channels with finite-rate feedback [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(11): 5045-5060.
- [8] LEE B, CHOI J, SEOL J Y, et al. Antenna grouping based feedback compression for FDD-based massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(9): 3261-3274.
- [9] SHEN W Q, DAI L L, SHI Y, et al. Joint channel training and feedback for FDD massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(10): 8762-8767.
- [10] LIANG H W, CHUNG W H, KUO S Y. FDD-RT: a simple CSI acquisition technique *via* channel reciprocity for FDD massive MIMO downlink[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(1): 714-724.
- [11] YIN H F, GESBERT D. A partial channel reciprocity-based codebook for wideband FDD massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(9): 7696-7710.
- [12] LIU Y S, SIMEONE O. Learning how to transfer from uplink to downlink via hyper-recurrent neural network for FDD massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(10): 7975-7989.
- [13] KIM S, CHOI J W, SHIM B. Downlink pilot precoding and compressed channel feedback for FDD-based cell-free systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(6): 3658-3672.
- [14] CHENG X, WANG C X, WANG H M, et al. Cooperative MIMO channel modeling and multi-link spatial correlation properties[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(2): 388-396.
- [15] ZHOU T, TAO C, SALOUS S, et al. Geometry-based multi-link channel modeling for high-speed train communication networks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(3): 1229-1238.
- [16] ZHANG L, CHEN X Y, ZHOU Z H, et al. A novel 3D non-stationary multi-frequency multi-link wideband MIMO channel model[C]//Proceedings of the 2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1016-1021.
- [17] GUO J J, WEN C K, JIN S. Deep learning-based CSI feedback for beamforming in single- and multi-cell massive MIMO systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(7): 1872-1884.
- [18] LIU S C, GAO Z, HU C, et al. Model-driven deep learning based precoding for FDD cell-free massive MIMO with imperfect CSI[C]//Proceedings of the 2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 696-701.
- [19] 胡亚婷, 史恩宇, 许柏恺, 等. RIS辅助去蜂窝大规模MIMO系统低复杂度预编码算法设计[J]. 无线电通信技术, 2024, 50(2): 245-252.
- HU Y T, SHI E Y, XU B K, et al. Low complexity precoding algorithm design for RIS-aided cell-free massive MIMO systems [J]. Radio Communications Technology, 2024, 50(2): 245-252.
- [20] 苏俊, 张磊, 何斌, 等. 5G多天线增强关键技术研究[J]. 移动通信, 2023, 47(9): 110-116.
- SU J, ZHANG L, HE B, et al. Study on 5G MIMO enhancement key technologies[J]. Mobile Communications, 2023, 47(9): 110-116.
- [21] NGUYEN L D, DUONG T Q, NGO H Q, et al. Energy efficiency in cell-free massive MIMO with zero-forcing precoding design[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(8): 1871-1874.
- [22] ALBREEM M A, AL HABBASH A H, ABU-HUDROUSS A M, et al. Overview of precoding techniques for massive MIMO [J]. IEEE Access, 2021, 9: 60764-60801.
- [23] ZHANG P, ZHANG J Y, XIAO H H, et al. Joint distributed precoding and beamforming for RIS-aided cell-free massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(4): 5994-5999.

## [作者简介]



张德坤 (1990-), 男, 西安电子科技大学空天地一体化综合业务网全国重点实验室博士生, 中兴通讯股份有限公司算法工程师, 中国通信学会高级会员, 主要研究方向为大规模MIMO、无线资源管理、天线校准等。



白宝明 (1967-), 男, 博士, 西安电子科技大学空天地一体化综合业务网全国重点实验室教授, 主要研究方向为无线通信、MIMO技术、信息论与信道编码等。