



低复杂度超大规模 MIMO 无线传输设计研究

孙蕊蕊¹, 韩瑜¹, 金石¹, 王珏²

(1. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 南通大学信息科学技术学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 超大规模 MIMO (extra-large scale MIMO, XL-MIMO) 技术有望满足 6G 对高频谱效率的要求, 同时也面临计算复杂度提升带来的挑战。研究发现, XL-MIMO 信道独特的空间非平稳特性为低复杂度无线传输设计带来新的可能。首先从近场传播效应出发, 梳理 XL-MIMO 信道特性及信道建模研究成果, 深入探讨空间非平稳性出现的原因; 由此引出 XL-MIMO 中阵列可见区域 (visibility region, VR) 的概念, 并对结合 VR 信息的低复杂度无线传输设计展开讨论; 接着, 从子阵列划分与分布式信号处理的角度, 介绍 XL-MIMO 低复杂度系统架构的实现, 并总结相应的设计方案; 最后, 对未来研究方向进行展望。

关键词: 超大规模 MIMO; 空间非平稳性; 近场效应; 可见区域; 6G

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023170

Research on low-complexity XL-MIMO wireless transmission design

SUN Ruirui¹, HAN Yu¹, JIN Shi¹, WANG Jue²

1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China

2. School of Information Science and Technology, Nantong University, Nantong 226019, China

Abstract: Extra-large scale MIMO (XL-MIMO) can meet the requirement of high spectral efficiency in 6G communication, but also faces the challenge caused by the increase in computational complexity. It is found that the unique spatial non-stationary characteristics of XL-MIMO channel brings new possibilities for low-complexity wireless transmission design. Firstly, starting from the near-field propagation effect, the research results of XL-MIMO channel characteristics analysis and channel modeling were combed, and the causes of spatial non-stationarity were deeply discussed. Furthermore, the concept of array visibility region (VR) in XL-MIMO was introduced, and the low-complexity wireless transmission design combined with VR information was discussed. Then, from the perspective of sub-array partition and distributed signal processing, the implementation of XL-MIMO low-complexity system architecture was introduced, and the corresponding design schemes were summarized. Finally, the future research direction was prospected.

Key words: XL-MIMO, spatial non-stationarity characteristics, near field effect, visibility region, 6G

收稿日期: 2023-06-12; 修回日期: 2023-08-30

通信作者: 金石, jinshi@seu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62171240, No.62301148)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62171240, No.62301148)



0 引言

大规模多输入多输出 (massive multiple-input multiple-output, mMIMO) 是 5G 关键技术之一, 现有研究在 mMIMO 系统架构^[1]、性能分析^[2]、算法设计^[3]等方面取得了大量成果。mMIMO 通过提高基站天线数量获得较高的空间分辨率, 从而可使用相同的时频资源服务多个用户, 实现频谱效率的成倍提升。此外, 通过波束成形将能量集中于目标用户方向, 也可提高系统能量效率, 并减少信息在其他空间方向的泄露。随着 5G 的逐渐普及, 6G 开始受到产业界的广泛关注。与 5G 相比, 6G 期望具有更宽的频带、更高的传输速率和频谱效率、更大的连接容量、更低的时延、更广的覆盖范围和更强的抗干扰能力, 以满足多样化网络需求^[4]。为实现该目标, 传统 mMIMO 技术亟待更新与发展, 超大规模 MIMO (extra-large scale MIMO, XL-MIMO)、智能反射面、无小区 mMIMO 等技术应运而生^[5]。

XL-MIMO 技术可视为 5G mMIMO 向更高空间维度的演进。其通过在基站部署更高数量级天线, 更加深入地挖掘空间资源, 有望为通信系统提供极高的频谱效率、极高的能效和可靠的海量接入, 因此成为极具潜力的 6G 技术之一^[6]。XL-MIMO 部署的天线数量可以达到 10^3 数量级甚至更高^[7], 在带来更高空间性能增益的同时, 也带来了新的挑战。在硬件架构上, XL-MIMO 射频链部署开销不容忽视, 若采用低成本射频链来降低能耗和部署成本又必须面临性能权衡。此外, 由于天线数量庞大, 传统信道估计以及预编码技术在应用于 XL-MIMO 系统时将面临超高计算复杂度的难题。值得注意的是, 由于超大规模天线阵列的新型部署方式, 如超大孔径阵列 (extremely large aperture array, ELAA) 或分布式部署, XL-MIMO 信道呈现出空间非平稳的新特性。该特性在文献[8]中已得到

实验验证。在空间非平稳特性下, 用户在天线阵列上的能量分布可能只集中于维度大幅降低的部分子阵列; 这一发现给 XL-MIMO 的低复杂度设计带来新的思路, 并将启发 XL-MIMO 新的低复杂度系统架构设计。

基于上述论述, 本文对 XL-MIMO 的空间非平稳特性分析、建模, 以及低复杂度无线传输设计的相关工作进行总结, 并对 XL-MIMO 的主要研究趋势进行展望。首先对 XL-MIMO 近场直达径信道模型进行介绍, 着重强调了其与传统远场传播模型的不同, 以及相关的低复杂度近场球面波信道模型; 进一步考虑近场下不同阵列天线由于部分遮挡效应所产生的可见区域 (visibility region, VR) 现象, 对文献中与 VR 信息测量、获取与利用相关的工作进行了总结讨论; 以 VR 概念为基础, 从硬件架构与逻辑架构两方面, 系统介绍了现有的 XL-MIMO 低复杂度实现架构; 最后对 XL-MIMO 未来发展进行展望。

1 XL-MIMO 近场信道模型

1.1 传统远场信道模型

在 5G mMIMO 系统中, 由于阵列形态多为集中式紧凑部署, 往往可假设用户位于基站天线阵列远场。此时信道可采用平面波假设简化建模, 远场信号到达阵列天线单元的波程差如图 1 所示。以 N 维均匀线性阵列 (uniform linear array, ULA) 为例, 当天线间距为半波长时, 远场信道 $\mathbf{h}_{\text{far-field}}$ 可建模为:

$$\mathbf{h}_{\text{far-field}} = \sum_{l=0}^{L-1} g_l e^{-j \frac{2\pi f_l}{c}} \mathbf{a}(\theta_l) \quad (1)$$

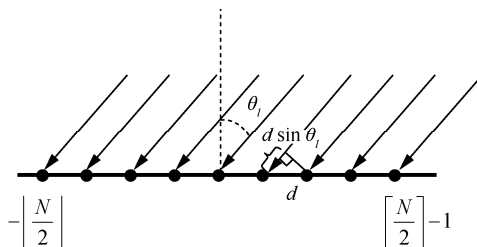


图 1 远场信号到达阵列天线单元的波程差

其中, c 表示光速, L 表示路径数, f 表示载波频率, g_l 和 r_l 分别表示第 l 条路径对应的路径增益和传播距离, $\mathbf{a}(\theta_l)$ 是路径 l 对应的导向矢量, 由信号到达阵列各单元波程差推导而来, 满足以下形式:

$$\mathbf{a}(\theta) = \left[e^{-j2\pi \left[\frac{N}{2} \right] \frac{d}{\lambda} \sin \theta}, \dots, e^{j2\pi \left(\left[\frac{N}{2} \right] - 1 \right) \frac{d}{\lambda} \sin \theta} \right]^H \quad (2)$$

其中, d 表示天线单元的间距, λ 表示波长。针对远场信道, 通常可以使用离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 矩阵将信道变换到角度域, 获取信道在角度域的稀疏表达:

$$\mathbf{h}_f^A = \mathbf{F}^H \mathbf{h}_{\text{far-field}} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{F}^H$ 为 $\mathbf{F}$ 的共轭矩阵, $\mathbf{F}$ 为 DFT 矩阵, 表示对角度的均匀采样:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{j\pi [0,1,\dots,N-1]^T} \cdot e^{[-1,-1+2/N,-1+4/N,\dots,1-2/N]} \quad (4)$$

1.2 近场信道模型

在 XL-MIMO 系统中, ELAA 等新型阵列形态使得上述远场平面波前假设往往不能成立。此时, 用户发送的电磁波在到达基站阵列时需要以球面波前加以描述, 即信道近场效应不可忽略。通常用瑞利距离判定阵列的远场与近场, 瑞利距离 R 与天线阵列的尺寸 D 和波长 λ 有关^[7]。

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (5)$$

以 30 GHz 频段、天线数量 $N=256$ 为例, 此时瑞利距离计算为 328 m, 导致大部分用户将处于近场范围内, 其相应 XL-MIMO 信道建模需要采用球面波模型。不同于式 (3) 所述的平面波导向矢量建模仅需要角度域参数, 球面波导向矢量建模时波程差的计算要用到距离参数, 近场信号到达阵列天线单元的波程差如图 2 所示。相应地, 近场信道表示为^[7]:

$$\mathbf{h}_{\text{near-field}} = \sqrt{\frac{N}{L}} \sum_{l=0}^{L-1} g_l e^{-j\frac{2\pi f r_l}{c}} \mathbf{b}(\theta_l, r_l) \quad (6)$$

其中, r_l 为第 l 条路径到基站阵列中心的传播距离。此时, 导向矢量表示为:

$$\mathbf{b}(\theta_l, r_l) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[e^{-j\frac{2\pi f}{c}(r_l^{(0)} - r_l)}, \dots, e^{-j\frac{2\pi f}{c}(r_l^{(N-1)} - r_l)} \right]^T \quad (7)$$

$$r_l^{(n)} = \sqrt{(r_l \cos \theta_l - 0)^2 + (r_l \sin \theta_l - nd)^2} = r_l \left(1 + \frac{n^2 d^2}{r_l^2} - \frac{2nd \sin \theta_l}{r_l} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

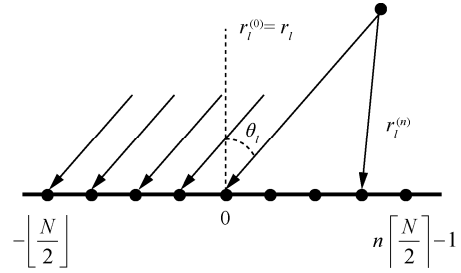


图2 近场信号到达阵列天线单元的波程差

近场信道模型越复杂, 参数化信道估计的复杂度越高。在远场假设下, 信道矢量和 DFT 矩阵相乘刚好构成 sinc 函数, 所以角度域能量可集中在到达角上。而在近场中, 由于式 (8) 中的根号项形式复杂, 信道能量在角度域中出现了扩展, 并不集中在离散的特定角度。近场传播下的角度域能量扩展如图 3 所示, 在远场信道下, 角度域的信道能量集中在有限的角度上; 而在近场信道下, 到达角附近出现的信道能量扩展使得无法以稀疏的角度域参数进行低复杂度信道估计。为降低信道模型复杂度, 文献[9-11]采用二阶近似的方法, 根据泰勒展开:

$$(1+x)^a = 1 + ax + \frac{a(a-1)}{2!} x^2 + \frac{(a-2)}{3!} x^3 + \dots \quad (9)$$

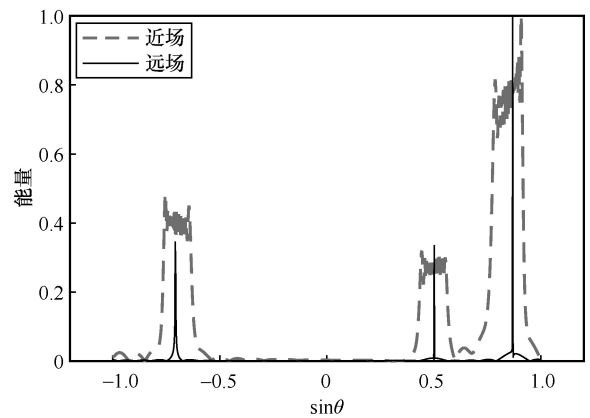


图3 近场传播下的角度域能量扩展



将式(8)中的根号项展开并保留到二阶:

$$r_l^{(n)} \approx r_l \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{n^2 d^2}{r_l^2} - \frac{2nd \sin \theta_l}{r_l} \right) - \frac{1}{8} \left(\frac{n^2 d^2}{r_l^2} - \frac{2nd \sin \theta_l}{r_l} \right)^2 \right) \approx r_l - nd \sin \theta_l + \frac{n^2 d^2 \cos^2 \theta_l}{2r_l} \quad (10)$$

根据式(10)构建信道模型,此时球面波模型被近似成抛物面模型。简化后的导向矢量为:

$$\mathbf{a}_{\text{Par}}(\theta, r) = \begin{bmatrix} e^{j \left(-\frac{2\pi d}{\lambda} \left[\frac{N}{2} \right] \sin \theta + \frac{\pi d^2}{\lambda r} \left[\frac{N}{2} \right]^2 \cos^2 \theta \right)}, \dots, 1, \dots, e^{j \left(-\frac{2\pi d}{\lambda} \left[\frac{N}{2} - 1 \right] \sin \theta + \frac{\pi d^2}{\lambda r} \left[\frac{N}{2} - 1 \right]^2 \cos^2 \theta \right)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

不难看出,该表达式包括属于平面波前的子项,以及振幅与距离成反比的子项。文献[9]指出平面波模型可看作球面波模型泰勒展开的一阶,那么含有二次项的抛物面模型比平面波模型精确。3种模型的计算复杂度主要来源于导向矢量,对比导向矢量中相位部分的复杂度,式(2)中平面波导向矢量涉及 N 次乘法运算;式(11)中抛物面波由于含二次项,因此涉及 $2N$ 次乘法运算和 N 次加法运算;式(7)中球面波模型先进行 $2N$ 次乘法和 $2N$ 次加法运算,之后进行了 N 次开方运算。显然,随着 N 的增大,平面波的运算复杂度最低,抛物面模型次之,球面波的运算复杂度最高。相比于平面波假设,用抛物面波假设进行参数化信道估计时,既考虑了信号到达不同阵列天线时距离不同的影响,又避免了球面波建模时根式计算的复杂性。然而,近似处理必然会带来模型上的偏差。为描述该偏差,定义平均绝对误差(mean absolute error, MAE), $\|\cdot\|_1$ 表示1-范数。

$$\text{MAE} = \frac{\|\mathbf{h}_{\text{near-field}} - \mathbf{h}_{\text{far-field or par}}\|_1}{\|\mathbf{h}_{\text{near-field}}\|_1} \quad (12)$$

两种信道模型与球面波模型的偏差如图4所

示,对比了采用平面波模型和抛物面模型对球面波模型进行近似时的MAE,其中,纵坐标描述了信道模型的偏差,横坐标表示用户与基站的距离。作为简化示例,实验只考虑一条直达径,仿真中设定基站天线数为1024,载波频率为30 GHz。可以看出,随着距离的增加,两种模型的MAE均呈现下降趋势,而抛物面模型则更贴近球面波模型,同时有效降低了模型复杂度。

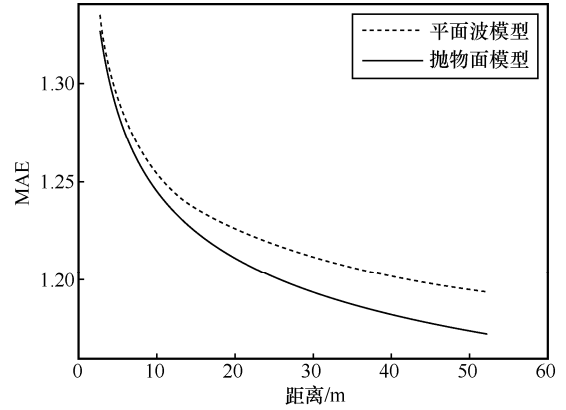


图4 两种信道模型与球面波模型的偏差

2 XL-MIMO 阵列中的用户可见区域

如第1节所述,在近场球面波信道模型(式(6))中,信号到各阵列天线的传播距离需要分别独立描述,使得各天线信道能量分布不均。对于特定位置的用户,其有效能量可能仅集中于部分阵列单元。进一步地,在近场距离内,信号到达各阵列天线的路径可能会受到部分遮挡。受上述因素影响,不同位置的用户可能看到阵列的不同部分,该部分阵列称为用户的可见区域。

2.1 考虑 VR 的信道模型

阵列用户可见区域示意图如图5所示,当用户与(或)散射体簇位于XL-MIMO阵列近场时,不同位置的用户可能会看到不同的散射体(簇),而不同位置的散射体(簇)可能会看到阵列的不同部分。VR是近场传播空间非平稳性的另一种体现(近场效应是其中一种体现),使得用户信号能量可能未覆盖整个阵列,而集中在部分天线上。

此时, XL-MIMO 信道建模应该考虑 VR 影响。为简化假设, 在建模时可认为 VR 之外的天线接收信号能量为 0; 引入 N 维向量 $\mathbf{p}(\Psi_l)$ 表示阵列天线是否在可见区域内, 式 (6) 所述信道模型可进一步表示为:

$$\mathbf{h} = \sum_{l=0}^{L-1} g_l \mathbf{a}(\theta_l, r_l) \odot \mathbf{p}(\Psi_l) \quad (13)$$

$$[\mathbf{p}(\Psi_l)]_m = \begin{cases} 1, m \in \Psi_l \\ 0, \text{其他} \end{cases}$$

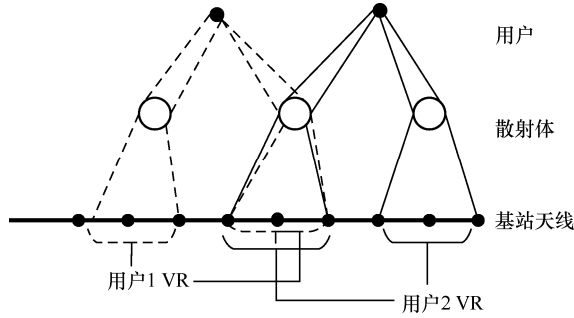


图 5 阵列用户可见区域示意图

其中, $\odot$ 表示矢量 Hadamard 积, 天线编号集合 Ψ_l 为第 l 条路径的 VR。对于第 l 条路径而言, 在 VR 内的天线对应的参数 $\mathbf{p}(\Psi_l)$ 的值取 1, 反之取 0。式 (13) 中所有路径 VR 的并集即用户可见的阵列部分, 称为用户 VR。这种建模方式侧重于表示不同路径对应的 VR, 可以应用于参数化信道估计算法, 以降低待估参数空间维度。

另一种考虑 VR 的模型从信道协方差矩阵角度出发, 在传统的多天线系统中, 基于协方差矩阵的散射体信道模型为^[12]:

$$\mathbf{h}_k = \mathbf{R}_A^{\frac{1}{2}} \mathbf{H}_w \mathbf{R}_S^{\frac{1}{2}} \mathbf{h}_{w,k} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{R}_A \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 和 $\mathbf{R}_S \in \mathbb{C}^{S \times S}$ 分别为阵列侧和散射体侧的协方差矩阵, S 为散射体个数, k 表示第 k 个用户, $\mathbf{H}_w \in \mathbb{C}^{N \times S}$ 和 $\mathbf{h}_{w,k} \in \mathbb{C}^{S \times 1}$ 为小尺度衰落系数矩阵。在 XL-MIMO 系统中, 由于不同散射体具有不同的 VR, 式 (14) 中的信道需要重新考虑。假设散射体簇的数量为 C , 散射体簇 c 中散射体数量为 S_c , 即 $\sum_{c=1}^C S_c = S$, 用户可以看到

的射体总数为 $\tilde{S}_k = \sum_{c \in \Phi_{UC,k}} S_c$ 。将图 5 中基站到散射体与散射体到用户的两段信道级联, 用户 k 与基站之间的信道表示为:

$$\mathbf{h} = [\mathbf{G}_1, \dots, \mathbf{G}_C] \mathbf{R}_S^{\frac{1}{2}} \mathbf{D}_{UC,k} \mathbf{h}_{w,k} \quad (15)$$

其中, $\mathbf{D}_{UC,k} = \{0, 1\}^{S \times \tilde{S}_k}$ 是表示用户 k 可见散射体的选择矩阵, $\mathbf{h}_{w,k} \in \mathbb{C}^{\tilde{S}_k \times 1}$ 是小尺度衰落向量, $\mathbf{G}_c$ 表示阵列与簇 c 之间的信道。

$$\mathbf{G}_c = \mathbf{D}_{CA,c} \mathbf{R}_{CA,c}^{\frac{1}{2}} \mathbf{H}_{w,c} \in \mathbb{C}^{N \times S_c} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{D}_{CA,c} = \{0, 1\}^{N \times |\Phi_{CA,c}|}$ 表示簇 c 可见的天线, $\mathbf{R}_{CA,c} \in \mathbb{C}^{|\Phi_{CA,c}| \times |\Phi_{CA,c}|}$ 是区域 $\Phi_{CA,c}$ 内天线的协方差矩阵, $\mathbf{H}_{w,c} \in \mathbb{C}^{|\Phi_{CA,c}| \times S_c}$ 是小尺度衰落模型。基于信道协方差矩阵的信道模型有助于分析信道的关键性能指标, 如信噪比^[13]和系统容量^[14], 进而有助于收发器的设计。

2.2 基于 VR 的 XL-MIMO 低复杂度无线传输设计

利用 VR 信息可仅在用户可见的降维阵列部分进行传输信号处理, 从而实现 XL-MIMO 低复杂度设计。若用户间 VR 不重叠, 则信道不存在用户间干扰, 在基带信号处理中可以对信道进行降维简化计算。文献[13]分析了存在 VR 时的系统性能, 说明了信道的 VR 对共轭波束成形和迫零预编码器的性能有很大影响。通过利用不同位置的用户可能具有不同 VR 的特征, 现有研究在 VR 识别^[15-16]、接入协议^[17-18]、用户调度^[3]及信道估计^[19]等方面提出了新的算法。

首先在 VR 识别方面, 对于单个用户, 其 VR 可以通过发送上行信标信号并测量阵列单元的接收功率来轻松获得。但 XL-MIMO 的目标是支持海量连接, 在这种情况下, 获取和更新每个用户的 VR 信息将导致无法负担的巨大开销。针对该问题, 文献[15]选择少量信标用户反馈的 VR 信息作为环境先验信息, 在此基础上提出基于位置的神经网络 VR 识别方法。对于训练好的网络, 只需 $O(N)$ 次计算即可将 VR 未知的用户位置转化为



网络输入向量,与快速衰落的信道相比,用户的VR变化缓慢。因此,在一个传输周期内,VR识别的开销和计算复杂度可以忽略不计。文献[16]提出VR可近似为XL-MIMO阵列的子阵列的组合,位于用户VR中的子阵列的尺寸可能比整个阵列小得多,因此可以使用每个用户的VR设计XL-MIMO的低复杂度检测器,即选择接收了大部分信号功率的子阵列来实现检测器。VR检测器的复杂度与子阵列天线数相关,因而复杂度低于基于全阵列的方法。

文献[17]指出随着VR的出现,传统的mMIMO接入协议在XL-MIMO中已不适用,考虑用户VR存在重叠的情况,提出一种基于子阵列架构的最强用户检测协议,降低了用户访问时延,其根本原因是不同用户的VR为XL-MIMO增加了新的自由度^[18]。类似地,文献[18]在每个子阵列中利用非正交多址提高基于授权的随机接入协议的性能,接收信号可以由不同的子阵列处理,利用VR改进后的接入协议可以减少用户访问次数,从而降低系统复杂度。文献[3]考虑一个用户覆盖多个连续子阵列以及不同用户的VR重叠的情况,为避免产生用户间干扰,提出一种XL-MIMO的贪婪用户调度算法。通常利用穷举搜索可以返回调度问题的最优解,但在XL-MIMO中计算复杂度极大,运行时间长,因此文献中对每个子阵列采用次优用户调度算法,在每个调度步骤中都达到最优结果,从而大幅降低算法复杂度。

在VR信息辅助的无线传输方面,部分研究在信道估计、信号检测等方面进行了低复杂度设计。文献[19]提出了利用子阵列上的平稳性估计近场非平稳信道,对每个子阵列的可见散射体进行定位。该算法的复杂度取决于子阵列天线数与子阵列个数,相比XL-MIMO的复杂度与所有天线数量相关,信道估计复杂度有所下降。文献[20]提出了针对XL-MIMO非平稳性设计的随机化Kaczmarz算法,由于VR的存在,仅考虑用户VR

内的子阵列,其复杂度与子阵列天线数量有关,减少了信号检测器的计算负担。

3 基于子阵列的XL-MIMO系统架构

空间非平稳特性为XL-MIMO低复杂度设计提供可能,其中VR特性的出现使得基于子阵列的系统架构成为XL-MIMO中天线调度的自然选择,在上述VR辅助的无线传输设计中,一些研究^[3,16-20]提出对每条路径仅利用VR内的天线来降低系统功耗及复杂度,同时为避免所有射频链都连接到天线单元的昂贵成本,子阵列架构在VR辅助的无线传输设计中更普遍。在子阵列架构下,各子阵列对应的部分信道可看作空间平稳的。同时,基于子阵列架构的算法复杂度通常取决于子阵列天线数与子阵列个数,相比XL-MIMO的复杂度取决于所有天线数量,子阵列架构的复杂度有所下降。为了在支持低复杂度处理的同时降低硬件成本,文献中对基于子阵的XL-MIMO硬件架构和分布式处理方法进行了广泛讨论。本节将对相关研究进展进行梳理与分析。

3.1 基于子阵的硬件架构

超高维信道导致资源分配、用户调度、预编码等传输设计的计算复杂度爆炸式增长。如前所述,可通过仅激活处于用户VR内的天线,降低XL-MIMO系统的复杂度;其实现需要硬件射频链路的支持,使基站可以灵活开关天线,因此XL-MIMO系统架构研究成为其落地实现的关键。在传统mMIMO系统中,存在两种射频链和天线之间的硬件连接形式:全连接(fully-connected, FC),以及部分连接或“子阵列架构”(subarray architecture, SA)^[1]。多天线系统的硬件实现架构如图6所示,在FC架构中,所有射频链都连接到天线单元,因此可实现较高的频谱效率;但当将FC架构应用在天线数量急剧提升的XL-MIMO系统中时,成本和功耗问题无法避免。在SA中,每个射频链只连接到预先划分的子阵列;SA的硬件复

杂度和功耗远低于 FC 架构,但同时也会带来系统频谱效率的折损^[21]。综合考虑上述问题,SA 更适用应用在 XL-MIMO 系统中。此时,天线选择(或 SA 选择)算法是取得较好性能权衡的关键。

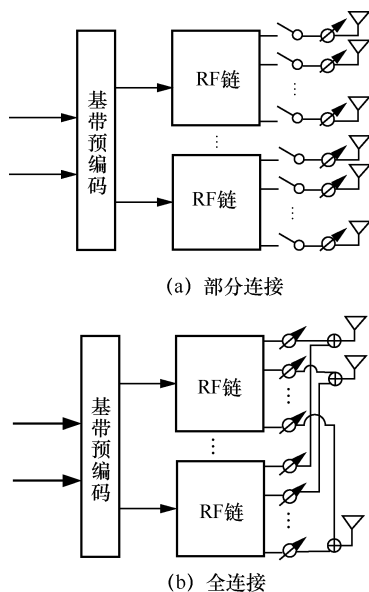


图6 多天线系统的硬件实现架构

针对 XL-MIMO 系统中的天线选择(或 SA 选择),目前已有很多相关研究。其中,文献[22]提出了两种 XL-MIMO 系统的天线选择方法,分别为可调柔性天线选择和固定子阵选择。结果表明,选择接收到用户发送信号的天线,而不是使用所有天线,可在有效降低功耗的同时保证通信吞吐量。文献[23]提出了有效的资源分配方法实现联合天线选择和功率分配,以最大限度地提高在不同负载设置下运行的 XL-MIMO 系统的下行频谱效率。文献[24]引入并研究了一种基于连续干扰消除的 SA 混合预编码。在文献[24]中,作者假设了一个具有实元素的对角数字预编码器,并证明了在 XL-MIMO 系统中 SA 比 FC 架构更节能。文献[25-26]研究了一种动态子阵列架构,该架构使用开关来调整射频(radio frequency, RF)链和子阵列之间的连接。为了降低 XL-MIMO 动态预编码的复杂性,文献[27]提出了一种部分动态 SA,并假设子阵列与射频链之间是动态连接的,每个子阵列中的天线数量固

定。然而,文献[27]中的部分动态预编码器仍然具有比固定预编码器更大的计算和硬件复杂性,以及更高的功耗。文献[28]考虑了子阵列架构中预编码器和组合器的联合设计。

XL-MIMO 近场非平稳性给信道估计带来了挑战,但在上述子阵列架构下,各子阵列对应的部分信道可看作空间平稳的,可独立应用传统参数化信道估计方案进行估计。文献[29]指出,当 XL-MIMO 系统以免授权访问模式运行时,在给定的时隙中只有一小部分潜在用户是活跃的,因此信道矩阵具有双稀疏和用户特定的结构,这样每个用户和每个子阵列的活动可以通过嵌套的伯努利-高斯分布联合建模。文献[30]将 XL-MIMO 的每个子阵列看作平稳的,提出了一种基于分数阶傅里叶变换的信道估计框架。子阵列架构有助于解决非平稳性带来的信道估计困难。

3.2 基于子阵的分布式信号处理

在硬件架构上,采取子阵列架构可减小 XL-MIMO 实现的硬件复杂度。同理,在基站信号处理上也可以采用一种逻辑概念上的子阵列架构,即将信号运算任务分配给子阵列的本地处理单元(local processing unit, LPU),摒弃了将所有的处理和计算任务交由 CPU 的传统处理方式,形成分布式处理架构。

LPU 的设计是为了将 CPU 巨大的计算量分解到各个子阵。一种设计方案是,系统中没有 CPU,所有的任务均在 LPU 进行,不需要对 LPU 进行集中控制,LPU 之间也不进行交互。例如,文献[19]中利用子阵列架构进行信道估计和 VR 分析,每个子阵可独立进行运算,不需要其他 LPU 的配合。由于单个 LPU 的天线数量远小于总天线数量,所以 LPU 的信道估计复杂度远小于全阵列。将子信道估计叠加处理,可以得到整个阵列的最终信道估计结果。

另一种方案允许 LPU 之间相互协作,例如,文献[31]中利用子阵列架构对信号进行检测,一个



LPU 输出的检测结果将作为下一个 LPU 的输入信息, 最后一个子阵输出的结果将作为最终的信号检测结果。这种串行检测方式易于扩展, 但会带来较高的时延。为解决该问题, 一些研究提出了双层 LPU 结构, 即在完成分布式处理和计算后, 每个 LPU 将其本地结果反馈给 CPU。然后, CPU 将所有 LPU 的局部结果进行整合, 通过硬决策或数据融合的方式得到最终的全局结果。文献[32-33]在进行信号检测时, 将每个 LPU 输出的结果反馈给 CPU, 由 CPU 给出最后的信号检测结果。

LPU 的引入不仅避免了对全阵列超高维信道的直接处理, 而且基于 VR 信息, 仅调用 VR 内子阵对应的 LPU 同样能达到降低全局复杂度的效果。上述结果表明, 空间非平稳性让子阵列结构成为 XL-MIMO 低复杂度无线传输设计的新思路, 研究者不仅可以依靠基于子阵的硬件架构降低 XL-MIMO 的硬件复杂度, 还可以利用子阵进行分布式的信号处理, 降低系统的复杂度。

4 未来研究方向展望

未来 6G 网络的服务量是巨大的, 针对 XL-MIMO 的低复杂度无线传输研究还有很大的发展空间^[34], 值得关注的未来主要研究方向有以下两个。

(1) 信道建模及信道特性研究。现有 XL-MIMO 的信道模型复杂度较高, 在这些模型基础上进行信道估计等研究, 计算量庞大, 因此现有信道模型仍有改进空间。通过信道测量等手段探究 XL-MIMO 的信道特性, 对建立符合实际的信道模型至关重要, 是 XL-MIMO 未来主要研究方向。

(2) 低功耗设计。未来 6G 将服务更多的终端设备, 低功耗是 XL-MIMO 必须面临的问题, 因其庞大的天线数量给系统带来较大功耗, 需要灵活的天线开关或功率控制方法, 以及有效的信号处理技术, 如 XL-MIMO 系统的低密度信道编码和低功耗信道估计算法^[35]。

5 结束语

本文围绕 XL-MIMO 的空间非平稳性和低复杂度设计的相关研究成果展开调研, 给出了球面波模型下的近场信道模型, 分析了可见区域对低复杂度设计的影响, 总结了基于 VR 开展的信道估计、用户调度等研究。此外, 通过分析文献说明部分连接结构更适合 XL-MIMO 系统, 逻辑子阵列的设计有助于减小 XL-MIMO 的计算复杂度, 总结了子阵列架构下的预编码、信道估计研究成果。最后本文总结了从现有研究中获得的经验, 讨论了未来 XL-MIMO 面临的潜在挑战与可能的发展方向。

参考文献:

- [1] AL-KAMALI F, D'AMOURS C. Low-complexity hybrid precoding for subarray architecture mmWave MIMO systems[J]. IEEE Access, 2022(10): 74921-74930.
- [2] MARINELLO J C, ABRÃO T, AMIRI A, et al. Antenna selection for improving energy efficiency in XL-MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 13305-13318.
- [3] YANG X, CAO F, MATTHAIIOU M, et al. On the uplink transmission of extra-large scale massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 15229-15243.
- [4] ZHAO Y, ZHAI W, ZHAO J, et al. A comprehensive survey of 6G wireless communications[J]. arXiv preprint, 2020, arXiv: 2101.03889.
- [5] DALA PEGORARA SOUTO V, DETER P S, SOARES PEREIRA FACINA M, et al. Emerging MIMO technologies for 6G networks[J]. Sensors, 2023, 23(4): 1921.
- [6] CUI M Y, DAI L L. Near-field channel estimation for extremely large-scale MIMO with hybrid precoding[C]//Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [7] CUI M Y, DAI L L. Channel estimation for extremely large-scale MIMO: far-field or near-field?[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(4): 2663-2677.
- [8] CARVALHO E D, ALI A, AMIRI A, et al. Non-stationarities in extra-large-scale massive MIMO[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(4): 74-80.

- [9] MAGOAROU L L, CALVEZ A L, PAQUELET S. Massive MIMO channel estimation taking into account spherical waves[C]//Proceedings of 2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [10] LIU H B, ZHANG W. A novel near-field localization method based on second order statistics[C]//Proceedings of 2008 Congress on Image and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2008: 29-33.
- [11] ZHANG X F, CHEN W Y, ZHENG W, et al. Localization of near-field sources: a reduced-dimension MUSIC algorithm[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(7): 1422-1425.
- [12] SHIN H, LEE J H. Capacity of multiple-antenna fading channels: spatial fading correlation, double scattering, and key-hole[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10): 2636-2647.
- [13] ALI A, CARVALHO E D, HEATH R W. Linear receivers in non-stationary massive MIMO channels with visibility regions[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(3): 885-888.
- [14] LI X R, ZHOU S D, BJÖRNSON E, et al. Capacity analysis for spatially non-wide sense stationary uplink massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(12): 7044-7056.
- [15] LIU D H, WANG J, LI Y, et al. Location-based visible region recognition in extra-large massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(6): 8186-8191.
- [16] AMIRI A, ANGJELICHINOSKI M, DE CARVALHO E, et al. Extremely large aperture massive MIMO: low complexity receiver architectures[C]//Proceedings of 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [17] NISHIMURA O S, MARINELLO J C, ABRÃO T. A grant-based random access protocol in extra-large massive MIMO system[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(11): 2478-2482.
- [18] BRUZA ALVES T A, ABRÃO T. Improving random access with NOMA in mMTC XL-MIMO[C]//Proceedings of 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-5.
- [19] HAN Y, JIN S, WEN C K, et al. Channel estimation for extremely large-scale massive MIMO systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(5): 633-637.
- [20] RODRIGUES V C, AMIRI A, ABRÃO T, et al. Low-complexity distributed XL-MIMO for multiuser detection[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [21] LI N X, WEI Z X, YANG H W, et al. Hybrid precoding for mmWave massive MIMO systems with partially connected structure[J]. IEEE Access, 2017: 15142-15151.
- [22] UBIALI G A, MARINELLO J C, ABRÃO T. Energy-efficient flexible and fixed antenna selection methods for XL-MIMO systems[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2021(130): 153568.
- [23] DE SOUZA J H I, AMIRI A, ABRÃO T, et al. Quasi-distributed antenna selection for spectral efficiency maximization in subarray switching XL-MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(7): 6713-6725.
- [24] GAO X Y, DAI L L, HAN S F, et al. Energy-efficient hybrid analog and digital precoding for MmWave MIMO systems with large antenna arrays[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(4): 998-1009.
- [25] YAN L F, HAN C, YUAN J H. A dynamic array of sub-array architecture for hybrid precoding in the millimeter wave and terahertz bands[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [26] PARK S, ALKHATEEB A, HEATH R W. Dynamic subarrays for hybrid precoding in wideband mmWave MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(5): 2907-2920.
- [27] YANG F, WANG J B, CHENG M, et al. A partially dynamic subarrays structure for wideband mmWave MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(12): 7578-7592.
- [28] ZHANG Z L, WU X Y, LIU D P. Joint precoding and combining design for hybrid beamforming systems with subconnected structure[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(1): 184-195.
- [29] IIMORI H, TAKAHASHI T, ISHIBASHI K, et al. Joint activity and channel estimation for extra-large MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(9): 7253-7270.
- [30] PENG J Y, WANG Y H. Fractional Fourier transform based channel estimation in XL-MIMO systems[C]//Proceedings of 2023 3rd International Conference on Neural Networks, Information and Communication Engineering (NNICE). Piscataway: IEEE Press, 2023: 400-404.
- [31] AMIRI A, MANCHÓN C N, DE CARVALHO E. Uncoordinated and decentralized processing in extra-large MIMO arrays[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(1): 81-85.
- [32] CROISFELT V, ABRÃO T, AMIRI A, et al. Decentralized design of fast iterative receivers for massive MIMO with spatial non-stationarities[C]//Proceedings of 2021 55th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. Piscataway: IEEE



Press, 2022: 1242-1249.

- [33] AMIRI A, REZAIE S, MANCHÓN C N, et al. Distributed receiver processing for extra-large MIMO arrays: a message passing approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(4): 2654-2667.
- [34] SHAHRAKI A, ABBASI M, PIRAN M J, et al. A comprehensive survey on 6G networks: applications, core services, enabling technologies, and future challenges[J]. arXiv preprint, 2021, arXiv: 2101.12475.
- [35] ALWIS C D, KALLA A, PHAM Q V, et al. Survey on 6G frontiers: trends, applications, requirements, technologies and future research[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2021(2): 836-886.

[作者简介]



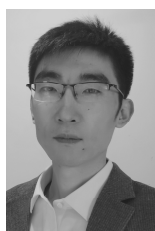
孙蕊蕊 (2002-), 女, 东南大学移动通信国家重点实验室博士生, 主要研究方向为超大规模 MIMO 无线传输理论与关键技术。



韩瑜 (1991-), 女, 博士, 东南大学移动通信国家重点实验室副研究员, 主要研究方向为面向 5G/6G 的物理层传输, 包括大规模 MIMO、智能超表面无线传输理论与关键技术。



金石 (1974-), 男, 博士, 东南大学移动通信国家重点实验室教授、博士生导师, 主要研究方向为 5G/B5G 移动通信理论与关键技术研究、物联网理论与关键技术研究 and 机器学习与大数据处理在移动通信中的应用等。



王珏 (1985-), 男, 博士, 南通大学信息科学技术学院副教授, 主要研究方向为无线通信物理层, 具体包括 MIMO 系统及超大规模 MIMO 系统、智能反射面、无人机辅助通信及机器学习技术在通信中的应用。