太赫兹超大规模天线阵列系统中的远场与近场无线通信

Chong Han、Yuhang Chen、Longfei Yan、Zhi Chen 和 Linglong Dai

arXiv:2301.03035v2 [cs.IT] 3 Aug 2023

摘要——太赫兹（THz）频段拥有丰富的数十吉赫兹带宽，可支持太比特每秒级无线通信，是第六代移动通信及后续系统的一项支柱技术。借助亚毫米长天线，采用具有数千个阵列单元的超大规模（UM）多输入多输出（MIMO）系统和反射智能表面（RIS）系统，可有效克服距离限制和阻塞问题，共同构成前景广阔的太赫兹超大规模天线阵列（ULAA）系统。波长与阵列孔径的共同作用，使太赫兹系统的覆盖范围从近场延伸至远场，由此催生了跨场通信这一新范式。尽管远场和近场的信道模型、通信理论与组网策略已分别得到研究，但如何统一设计兼具高频谱效率与低复杂度的跨场通信，仍有待解决。本文探讨了太赫兹超大孔径天线跨场通信面临的挑战及其特点，并从三个方面提出跨场解决方案：球面波与平面波混合信道模型、跨场信道估计，以及基于广泛间隔多子阵列的混合波束成形，其中将子阵列作为太赫兹超大规模天线阵列系统的基本单元。本文通过数值评估，分析了这些设计在信道建模精度、频谱效率和估计误差方面的近似误差。最后，作为太赫兹超大孔径天线跨场通信的路线图，本文阐述了多个开放问题和潜在研究方向。

I. 引言

无线流量需求的不断增长，促使人们更加关注对未来第六代（6G）及后续通信系统的研究。为突破带宽有限这一瓶颈，太赫兹（THz）频段的新频谱范围为 0.1 至 10 THz，拥有数十吉赫兹的丰富连续带宽，被视为满足第六代移动通信系统每秒太比特（Tbps）数据速率需求的一项支柱技术 [1]。然而，太赫兹波面临的一项重大挑战是，较大的自由空间衰减和强烈的分子吸收会造成严重的传播损耗，从而限制通信距离 [2]。此外，由于漫散射，太赫兹频段的信号传播依赖视距（LoS）传输，因此容易受到通信信道中各种障碍物的阻挡。

Chong Han 任职于上海交通大学太赫兹无线通信实验室、电子工程系及协同媒体网络创新中心（CMIC），地址为中国上海市 200240（电子邮箱：chong.han@sjtu.edu.cn）。Yuhang Chen 和 Longfei Yan 任职于上海交通大学太赫兹无线通信实验室，地址为中国上海市 200240（电子邮箱：{yuhang.chen, longfei.yan}@sjtu.edu.cn）。Zhi Chen 任职于电子科技大学通信科学与技术国家重点实验室，地址为中国成都市 611730（电子邮箱：chenzhi@uestc.edu.cn）。Linglong Dai 任职于北京信息科学与技术国家研究中心（BNRist）及清华大学电子工程系，地址为中国北京市 100084（电子邮箱：daill@tsinghua.edu.cn）。

幸运的是，太赫兹频段的亚毫米波长使得在小面积内紧凑排列数百甚至数千根天线成为可能，从而构成超大规模多输入多输出（UM-MIMO）系统 [3]。通过生成极其锐利的窄波束并获得较高的波束成形增益，UM-MIMO 系统能够有效应对距离限制问题。此外，反射智能表面（RIS）系统通过布置大量无源反射单元，能够有效解决遮挡问题 [2]。通过采用 UM-MIMO 和 RIS，构成的太赫兹超大规模天线阵列（ULAA）系统由大量亚毫米级有源和无源单元组成。

在太赫兹超大孔径天线阵列系统中，一个问题随之而来：太赫兹信号是在天线阵列的远场、近场还是跨场中传播？作为远场与近场之间的经典边界，天线阵列的瑞利距离与阵列孔径的平方成正比，与波长成反比，其计算公式为 $\frac{2S^2}{\lambda}$，其中 S 表示阵列孔径，λ 表示波长 [4]。因此，随着阵列尺寸迅速增大以及波长减小，瑞利距离也会增加。以发射端（Tx）和接收端（Rx）各配备 1024 个阵元、工作频率为 0.3 太赫兹、采用半波长间距的均匀平面阵列（UPA）为例，其瑞利距离约为 1 米。在太赫兹宽间距多子阵列（WSMS）系统中，这一距离还可能进一步增至数十米甚至数百米 [5], ，即共址分布式阵列。

在这种系统配置下，典型的室内和室外场景（如元宇宙、车载通信等）中的通信范围涵盖近场至远场。因此，太赫兹超大孔径天线阵列系统中的跨场通信这一新范式正在兴起，典型应用场景包括图1所示的太赫兹超大孔径天线跨场通信室外和室内场景。值得注意的是，跨场的定义与传统雷达和通信系统中的混合场相似 [6]。相比之下，混合场强调信道中远场路径和近场路径共存，而跨场则强调传输距离跨越近场至远场。

尽管超大规模多输入多输出和可重构智能表面系统近年来已应用于信道建模与分析 [7], [8],信道估计 [9], [10], 波束训练 [11], [12], 波束成形设计 [3] 以及多址接入 [13], 等

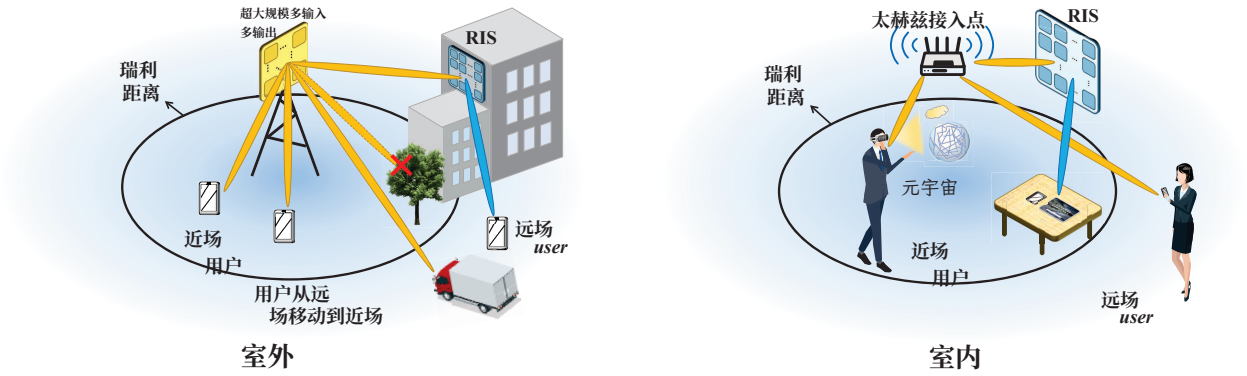

图 1. 典型太赫兹超大规模天线阵列跨场通信示意图。

研究主题，但针对远场或近场分别设计的方案都无法作为跨场通信的统一解决方案。一方面，远场采用平面波模型（PWM），将波传播近似为平面波。忽略非线性相位项能够降低复杂度并保持令人满意的精度，但在近场环境中会导致精度下降，进而降低传输性能。另一方面，基于电磁（EM）波理论推导的球面波模型（SWM）被视为真实基准。当通信范围小于瑞利距离时，也就是处于近场时，SWM 很有用。然而，SWM 的复杂度很高，因而不切实际，尤其是在远场。总之，SWM 和 PWM 均无法高效适用于太赫兹超大规模天线阵列跨场通信。

本文从信道和ULAA架构两个角度，在第II节探讨太赫兹超大规模天线阵列跨场通信面临的挑战。分析表明，与微波多天线系统不同，出于硬件和传输设计方面的实际考虑，太赫兹超大孔径天线阵列系统可以将子阵列而非天线作为一个单元。第III节从三个方面介绍跨场解决方案，包括球面波与平面波混合信道模型（HSPM）、基于压缩感知（CS）的跨场信道估计，以及WSMS混合波束成形；这些方案均受到太赫兹超大孔径天线阵列系统中子阵列单元的启发。第IV节给出数值结果，分别展示这些方法的建模精度、估计误差和频谱效率。第V节阐述第六代移动通信太赫兹超大规模天线阵列跨场通信面临的多个开放问题和研究方向。最后，本文在第VI节进行总结。

II. 太赫兹超大孔径天线阵列跨场通信面临的挑战

本节将从信道和ULAA架构的角度，阐述太赫兹超大规模天线阵列跨场通信所面临的挑战及其独特特性。

A. 跨场信道视角下的挑战

在信道建模方面，由于太赫兹超大规模天线阵列的通信距离跨越远场和近场，采用 SWM 或 PWM 模型会导致复杂度过高或建模精度下降。一方面，在 SWM 中，针对一条传播路径，考虑发射端与接收端之间的一对天线，分别计算信道响应的幅度和相位，因此 SWM 可视为真实信道模型。然而，确定 SWM 所需的参数数量与天线数量和传播路径数量的乘积成正比；若发射端和接收端各有 1024 根天线，且太赫兹多径较为稀疏（例如少于 10 条） [5]，则该数量将达到 10^7 。

另一方面，作为远场区域中SWM的一种近似，PWM将无线电波前视为平面。可根据某根天线与参考天线之间的相位差，推导出该天线的信道响应。因此，确定PWM只需参考天线的信道参数，其数量与太赫兹稀疏多径的数量相当（例如10个），远少于SWM所需的参数。然而，由于平面波传播假设带来的相位近似误差，PWM在近场区域会变得不准确 [14]。

信道模型会极大影响传输技术的选择，因此，大多数文献中的传输技术都是专门基于PWM或SWM设计的。然而，基于SWM或PWM的技术都无法有效适用于跨场通信。采用SWM时，传输设计必须考虑SWM中的大量参数，因而复杂度很高。例如，确定SWM各元素的相位时应考虑角度和传播距离信息，因此在信道估计和波束训练中也必须考虑这些信息。相比之下，基于PWM的设计只考虑角度信息。额外的距离域信息会增加信道估计和波束训练的复杂度 [9], [12]。

相比之下，由于 PWM 在近场中的不准确性，基于 PWM 的传输技术（如信道估计和波束训练）分别会导致显著的估计精度和训练精度损失，尤其是在近场区域 [15]。此外，图2展示了基于 PWM 和 SWM 的信道容量示例。对于工作在

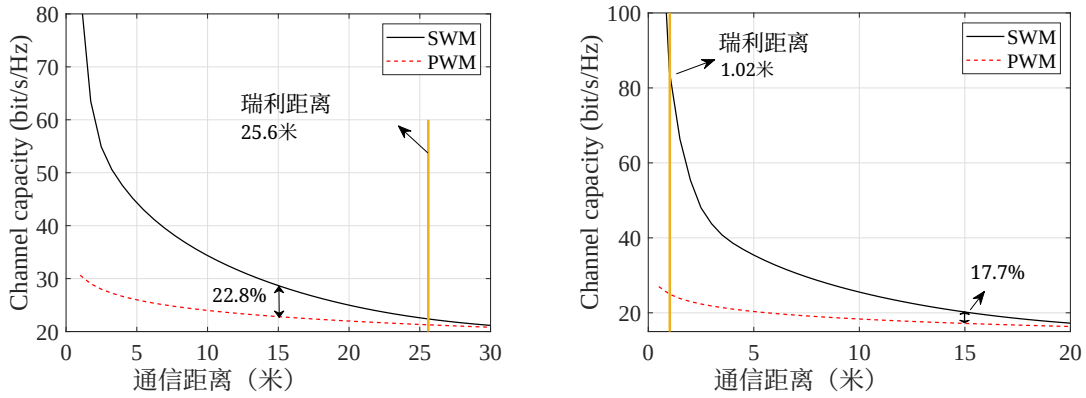

图2. 不同通信距离和频率下基于PWM和SWM的信道容量。左图考虑了包含1024个单元和4个子阵列的WSMS，子阵间距为波长的64倍。右图采用了包含1024个单元的均匀平面阵列（UPA）。通信频率固定为300吉赫兹。

300 吉赫兹的 1024 单元 WSMS 系统，在通信距离为 15 米时，基于 PWM 的信道容量比基于 SWM 的低 22.8%。当距离缩短至近场范围时，容量差异进一步扩大，这表明 PWM 存在不准确性。值得注意的是，即使通信距离超过瑞利距离，PWM 与 SWM 之间仍然存在容量差距。需要强调的是，瑞利距离是根据 PWM 与 SWM 之间的相位差超过某一差异阈值推导得出的。通过观察信道容量的不匹配可以看出，瑞利距离本身只是远场与近场之间的近似边界，而非从一种状态到另一种状态的骤变界线。

B. ULAA架构视角下的挑战

太赫兹超大规模天线阵列（THz ULAA）架构和传输技术的设计应充分考虑太赫兹硬件复杂度、功耗和传播特性。特别是，移相器和射频链等太赫兹硬件具有较高的制造成本和能耗。受此启发，太赫兹超大规模天线阵列的基本组件可以采用子阵列，而不是像微波频段中那样采用天线，典型结构包括子阵列阵列（AoSA）、动态子阵列阵列（DAoSA）、WSMS和带固定真时延的动态子阵列（DS-FTTD） [5]。每条射频链都可以通过开关和移相器动态连接至一个或多个子阵列，例如DAoSA和DS-FTTD。基于子阵列的超大规模天线阵列设计减少了所需移相器和射频链的数量，从而降低了硬件复杂度和功耗。从太赫兹波传播的角度来看，与不包含子阵列单元的传统结构相比，这些受子阵列启发的架构通过专用波束成形算法设计，能够保证波束成形增益和传输灵活性 [5]。具体而言，彼此分离的子阵列能够独立生成具有高波束成形增益的窄波束，有助于克服传播损耗。此外，还可以通过数字处理同时执行子阵列协调，从而为传输设计提供灵活性。

采用这种超大型天线阵列架构，会受到若干结构性约束的影响，给跨场通信设计带来挑战。

如图2所示，近场中的信道容量会随着距离缩短而增加，这主要归因于非线性信道相位带来的额外空间自由度（SDoF） [5]。空间自由度增强了复用能力，进而提升信道容量。然而，要释放近场空间复用的潜力，与远场场景相比，需要更多射频链，这与太赫兹超大规模天线阵列架构对低硬件复杂度和低功耗的要求相矛盾。此外，与天线数量相比，所部署的射频链数量较少，因此接收信号从天线维度到射频链维度的压缩程度很高。为了获取完整的信道信息，需要观测天线维度，但这会造成巨大的信道估计导频开销，因为所需的导频传输次数与天线数量相当。此外，波束管理由子阵列生成的模拟波束和数字基带共同完成。在跨场通信中，需要仔细处理硬件约束（例如移相器的恒模约束），以及远场和近场效应（包括角度分辨率和距离分辨率）。

III. 太赫兹超大孔径天线阵列系统中的跨场解决方案

本节介绍太赫兹超大孔径天线阵列系统中基于子阵列架构的三种跨场技术，包括 HSPM 信道模型、基于压缩感知的跨场信道估计和宽间距多子阵列混合波束成形。

A. HSPM信道模型

信道模型是传输设计的基础。为了支持太赫兹超大孔径天线阵列的跨场通信，信道模型应兼顾高精度与低复杂度，并能高效适用于远场和近场。在太赫兹超大孔径天线阵列系统中，子阵列被视为基本单元。物理子阵列通常包含的天线数量远少于整个超大型天线阵列，例如 64 个阵元。因此，子阵列的瑞利距离通常较短，例如，工作于 0.3 太赫兹的 64 阵元正方形子阵列，其瑞利距离为 0.05 米。

受这些事实启发，我们提出了 HSPM，如图 3 所示。HSPM 在单个子阵列内采用 PWM。

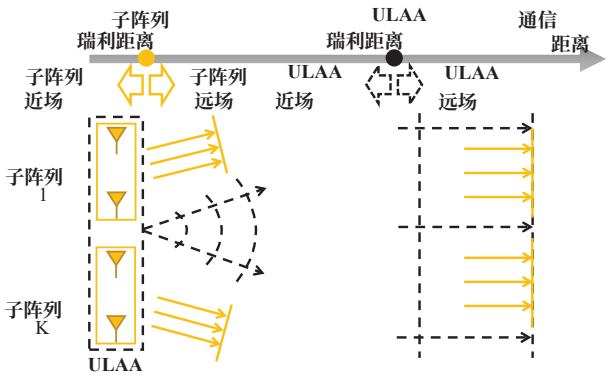

图 3. HSPM信道模型示意图。

基于 PWM 的建模仍然精确，因为认为传输始终从子阵列出发、在远场中进行是合理的。相比之下，子阵列之间采用 SWM，以处理近场球面波传播并提高建模精度，因为通信发生在整个超大型天线阵列的远场与近场交叉区域。得益于平面波模型与球面波模型混合建模，HSPM 相较于 PWM 在远场和近场区域都具有更高的精度。

从建模复杂度来看，确定 HSPM 所需的参数数量与发射端和接收端的子阵列数量之积以及信道中的传播路径数量成正比，远小于 SWM。尽管 HSPM 的建模复杂度略高于 PWM，但通过进一步将物理子阵列划分为若干虚拟子阵列，在建模过程中于虚拟子阵列内采用 PWM，并在虚拟子阵列之间采用 SWM，HSPM 能够有效实现精度与复杂度的平衡。

B. 跨场信道估计

需要获取天线级的精确信道状态信息，以帮助确定模拟与数字预编码。使用少量射频链观测高维信道，需要进行多次导频传输，从而导致较高的导频开销。为解决这一问题，基于 CS 的信道估计方法在远场和近场通信中得到了广泛研究 [9], [10]。利用太赫兹超大规模天线阵列无线信道的稀疏性，这些方案能够从压缩观测中恢复高维信道矩阵，并实现较低的导频开销。

为部署基于 CS 的方法，需要用码本对无线信道进行稀疏表示。在采用 SWM 的近场传输中，需要对角度与距离维度进行采样，每个采样点对应一个网格，即码本的一种实现。通过收集这些采样点的阵列导向矢量，可构建稀疏表示码本。由于网格数量通常远多于传播路径数量，因此可以对信道进行稀疏表示。然而，这种二维采样会导致码本维度过高，从而带来巨大的运算复杂度 [9]。相比之下，对于远场 PWM，整个超大型天线阵列上的某条路径具有相同的入射角因此，只需在角度域进行一维采样即可构成码本 [10]。然而，这种采样策略与近场环境不匹配，导致在跨场传播环境中的估计精度较低。

超大型天线阵列中的子阵列单元为基于压缩感知的跨场信道估计开辟了新的途径 [6], [15]。具体而言，在每个子阵列内，一条路径的入射角被认为对所有阵列单元都相同。因此，在运行过程中，对子阵列信道的角度域进行采样，以构建子阵列码本。此外，对于不同子阵列，一条路径的入射角被认为各不相同。为此，不同子阵列的角度采样彼此独立。在这种情况下，近场和远场信道都可以通过基于子阵列的方法进行稀疏表示。所提出的稀疏表示方法具有与基于 PWM 的传统解决方案相同的计算复杂度，但在近场中具有高得多的精度。此外，与使用 SWM 的联合角度与距离域稀疏表示相比，所提出码本的计算复杂度显著降低。

之后，可以设计不同的信道估计算法来恢复天线级信道。例如， [15] 中的分侧估计（SSE）将发射端和接收端的非零网格估计解耦，从而实现低复杂度。此外， [15]中的字典收缩估计（DSE）利用子阵列之间的空间相关性，即不同子阵列的入射角在空间域中彼此接近，进一步降低复杂度。此外， [6] 中还采用不动点迭代和深度学习工具，以高效估计跨场信道。值得注意的是，在宽带系统中，信道响应会随载波频率变化。可以通过划分多个子载波来进行宽带信道估计。在这种情况下，每个子载波上的子信道可视为不变，并通过上述信道估计方法进行估计。

C. 宽间距多子阵列混合波束成形

由于太赫兹信道具有很强的稀疏性，远场中的空间复用能力受传播路径数量的限制，即采用路径间复用，而非像微波频段那样受天线数量限制。然而，图2显示，随着通信距离缩短，SWM 与 PWM 之间的信道容量差距会增大。这是因为近场区域中的球面波传播带来了额外的空间复用增益，正如第 II-B 节所述，即路径内复用。具体而言，引入球面波传播后，一个显著影响是，针对特定传播路径，信道矩阵中各列/行的相位变得线性无关 [5]。这会带来额外的空间自由度，从而产生复用增益，使单条传播路径能够利用不同天线进行复用。由于路径内复用增益不受多径数量限制，因此它自然适用于太赫兹通信，并且在信道稀疏性显著的情况下前景广阔。因此，

对于太赫兹超大孔径天线阵列系统，优先采用近场传输，并通过路径间和路径内复用实现更高的频谱效率 [5]。

然而，近场范围有限，仅覆盖一定的近距离区域，在室外场景中尤其如此。例如，在图2中，发射端和接收端各配备一个含1024个阵元的紧凑型均匀平面阵列，其覆盖范围在1米以内。为进一步提升紧凑阵列在远场中的空间复用能力，文献 [5]研究了一种WSMS混合波束成形架构。传统架构中，整个阵列的天线间距为半个波长；而WSMS将子阵间距扩大至半波长的数十倍甚至数百倍，子阵列内部的天线间距则设为半个波长。通过这种方式，近场区域可扩展至数十米乃至数百米。与远场传输相比，总复用增益提升至子阵列数量的相应倍数。总之，通过联合利用路径间复用和路径内复用，这种集中式或分布式WSMS可显著提升空间复用能力，进而提高数据速率。

关于WSMS硬件制造，每个子阵列均配备射频链和移相器。在子阵列内部，每条射频链连接若干个移相器，其数量等于天线数量。此外，天线、移相器和射频链彼此互不连接。因此，模拟波束成形矩阵呈块对角结构，且每个元素的相位满足恒模约束。这些约束在模拟与数字波束成形算法设计中得到处理。值得注意的是，WSMS工作在较小的分数带宽下，即带宽与中心频率之比。例如，在0.3太赫兹载波频率下，带宽为5吉赫兹。在具有较大分数带宽的太赫兹宽带系统中，可能降低阵列增益和频谱效率的波束偏斜效应需要得到仔细处理 [5]。

IV. 性能评估

本节对HSPM、基于子阵列的信道估计方法和WSMS混合波束成形结构的性能进行评估。在仿真过程中，发射端和接收端均部署平面型太赫兹超大规模天线阵列。我们选择0.3太赫兹的载波频率，多径数量设为 2 [5]。在WSMS结构中，子阵列和射频链的数量均设为4，除非另有说明，超大型天线阵列中的天线数量设为1024。因此，每个子阵列的天线数量为256。此外，带宽选为5吉赫兹。

为展示 HSPM 在超大型天线阵列系统中的优势，我们通过计算 HSPM 和 PWM 与真实球面波模型之间的差异，数值评估了它们在不同通信距离下的近似误差。近似误差表示为 $\|\mathbf{H}_{\mathrm{M}}-\mathbf{H}_{\mathrm{S}}\|_{\mathrm{F}}^{2}/\|\mathbf{H}_{\mathrm{S}}\|_{\mathrm{F}}^{2}$，其中 $\mathbf{H}_{\mathrm{M}}$和 $\mathbf{H}_{\mathrm{S}}$ 分别表示基于 HSPM 或 PWM 得到的信道矩阵和 SWM 信道矩阵，$\|\cdot\|_{\mathrm{F}}$表示弗罗贝尼乌斯范数。值得注意的是，在这种情况下，SWM 的近似误差为 0。如图4所示，HSPM

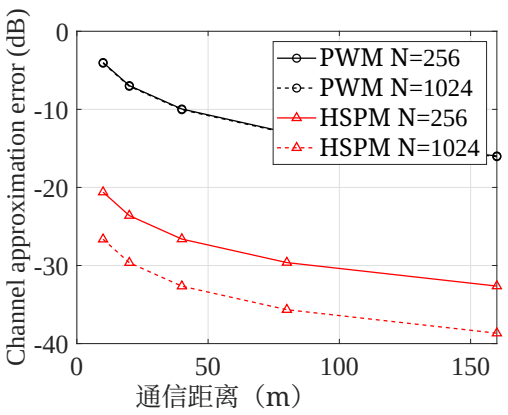

图4. 不同通信距离下的信道近似误差。子阵间距固定为32倍波长。

的建模精度远高于 PWM。在系统包含 1024 根天线时，HSPM 在 40 米处的近似误差比 PWM 低 22.5 dB。此外，我们还计算了表示不同信道模型所需的参数数量。在所考虑的配置中，基站和用户设备各有 1024 根天线和 4 个子阵列，SWM 和 PMW 所需的参数数量分别约为 4×10^{6} 和 12。相比之下，HSPM 所需的参数数量约为 400。因此，我们可以得出结论：HSPM 的精度约为 PWM 的 175 倍，同时其使用的参数数量仅为 SWM 的 0.01%，且是 PWM 的 33 倍。

图5分别评估了基于传统离散傅里叶变换（DFT）[10], 、所提出的 SSE 和低复杂度 DSE [15] 的信道估计归一化均方误差（NMSE）。我们观察到，基于所提出的子阵列码本（包括 SSE 和 DSE）的信道估计，其估计精度远高于传统方法。当信噪比为 =15 dB 时，SSE 的 NMSE 比传统 DFT 方法低 4 dB，验证了其优越性。此外，所提出的 DSE 的 NMSE 也比传统方法低 1 dB。远场方法、基于子阵列的方法和低复杂度方法的复杂度分别为 $\mathcal{C}(N^{2})$、$\mathcal{C}(N)$ 和 $\mathcal{C}\left(\frac{N}{K}\right)$，其中 N 和 K 分别表示太赫兹超大规模天线阵列系统中的天线数和子阵列数。值得注意的是，SSE 和 DSE 均基于以子阵列为单位的网格稀疏信道表示码本，其估计精度严格受网格分辨率限制。尽管增加网格数量或进行网格细化能够进一步提高估计精度，但代价是计算复杂度更高，因此不适用于天线数量庞大的太赫兹 UM-MIMO 系统 [15]。

最后，图6比较了文献中WSMS与传统紧凑阵列系统的频谱效率。值得注意的是，紧凑阵列指天线间距为半波长的阵列。大多数现有阵列结构都属于这一类别，例如全连接（FC）、子阵列阵列（AoSA）和DAoSA [5]。WSMS架构中部署了4个间距较大的子阵列。通信距离固定为40m。频谱效率通过计算不同结构下的信道容量得出，

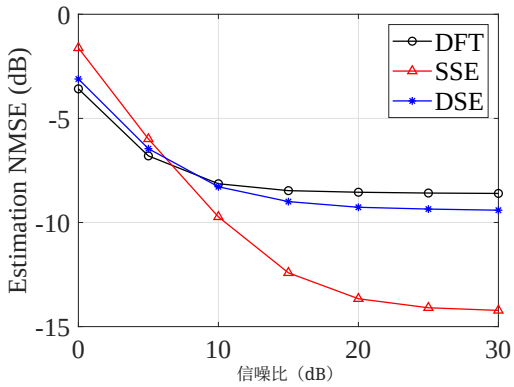

图5. 不同信道估计方法的比较。

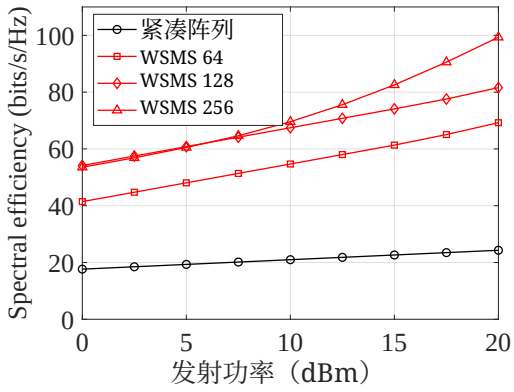

图 6. 不同混合波束成形架构的频谱效率。

其数值反映了频谱效率的上限。图6中，子阵间距分别设为波长的64、128和256倍。可以看出，采用宽间距架构设计提升了复用增益。具体而言，在发射功率为15 dBm且 128λ 子阵间距下，太赫兹WSMS混合波束成形架构的频谱效率是传统紧凑阵列的3.2倍。进一步可以看出，考虑HSPM后，频谱效率会随着WSMS子阵间距的增大而提高。这是因为更大的子阵间距会使各子阵列的子信道之间差异更大，从而有助于提升复用增益。

V. 开放问题与潜在研究方向

本节将阐述太赫兹超大规模天线阵列跨场通信的开放问题和未来研究方向。

A. 理论界

现有研究已通过实验表明，超大型天线阵列混合场通信有望提升性能，包括信道建模精度、信道估计归一化均方误差和频谱效率 [5], [6], [14], [15]。然而，作为通信系统设计的基础，跨场技术的理论界（如系统容量、自由度、估计克拉美-罗下界（CRLB）等）仍有待研究。例如，值得探究 CRLB，并提出有效的跨场参数估计算法以逼近该下界。此外，还可通过训练和系统配置设计来降低 CRLB。在以往的所有分析中，都需要探究子阵划分、子阵间距和通信距离的影响，并在可能的情况下进行优化，以指导系统设计。此外，值得综合考虑硬件限制、功耗和容量提升，对跨场中的基于子阵的方案进行系统分析和评估，权衡其总体成本与收益。

B. 实用型硬件高效设计

随着通信频率进入太赫兹频段，太赫兹超大规模天线阵列硬件的实现难度和成本也随之增加。这促使人们采用更少的射频链和移相器来构建混合式超大孔径天线架构 [3]。然而，正如第 II-B 节所分析的那样，要释放近场中的空间复用能力，就需要更多的射频链和移相器，这与低硬件成本的要求相矛盾。与此同时，由于空间自由度有限，远场所需的射频链数量少于近场。由于超大孔径天线阵列的硬件结构通常是固定的，因此很难同时满足跨场空间复用和硬件成本要求。作为两种潜在的解决方案，第 III-C 节介绍的 WSMS 将近场区域扩展至典型通信距离。此外，文献 [4] 提出了一种距离感知预编码结构（DAP）。通过在移相器与射频链之间插入选择电路，可根据空间自由度灵活启用或停用各射频链。尽管这两种结构都可用于跨场传输，但其所需的射频链和移相器数量均多于为远场传输设计的结构。因此，仍有必要探索更高效的结构，以平衡跨场传输中的空间复用与硬件成本。

C. 跨场波束训练

为实现可靠的超大孔径天线传输，需要通过称为波束训练的波束搜索过程来实现窄波束对准。在远场中，波束仅处理角度分辨率，波束训练在角度域中进行搜索，以找到最佳波束对 [11]。为了执行近场波束训练，文献中开展了角度域和距离域的联合搜索 [4], [12]。一方面，由于搜索波束取自预先定义的波束码本，远场码本设计无法满足跨场中的角度与距离分辨率联合需求。另一方面，尽管近场码本可部署于远场，但无论采用何种码本设计和训练策略，额外的距离域搜索无疑都会增加训练开销，导致复杂度较高，因此在跨场中并不理想。为研究高效的统一跨场波束训练框架，首先，需要根据不同的通信距离和超大孔径天线阵列结构，确定跨场中的角度域和距离域波束图

。其次，为实现低训练开销，有必要探索适用于对准的训练波束。例如，研究在角度域和距离域中具有非均匀可调波束宽度的分层码本 [4], ，或直接使用远场波束进行训练，并提出用于对准的波束估计算法。此外，单用户和多用户场景下的训练策略，以及用户移动情况下的波束跟踪策略，也有待进一步研究。

D. 多用户通信与组网

尽管太赫兹跨场通信在物理层单链路传输方面已得到研究 [5], ，但其对介质访问控制（MAC）和组网的影响尚未引起足够的研究关注。近期一项关于近场多址接入的研究 [13] 表明，与远场空分多址（SDMA）相比，近场新增的距离维度划分能力可以提升多址接入能力，这种方式称为位置分多址（LDMA）。然而，当通信距离跨越近场和远场时，有必要研究统一跨场多址接入，并考虑不同通信距离下的距离分辨率和角度分辨率。例如，可通过设置距离阈值来划分位置分多址和空分多址的适用范围。此外，由于物理层特性发生变化，在组网过程中需要采用基于角度—距离复用的通用方案，以满足传输覆盖、聋节点规避，以及节点发现和耦合过程中的控制信道选择需求。跨场对干扰消除、网络拓扑和路由的影响仍需进一步研究。

VI. 结论

太赫兹超大孔径天线阵列系统通过有效应对距离限制和遮挡问题，得到了广泛应用。随着超大型天线阵列维度的增大，典型通信距离同时涵盖远场和近场，从而形成了跨场通信这一新范式。本文从信道和超大型天线阵列架构的角度，研究了超大型天线阵列混合场通信的挑战与特征。本文介绍并评估了跨场混合球面波-平面波模型、基于压缩感知的信道估计，以及宽间距超大规模阵列混合波束成形框架。最后，本文提出了多个有待探索的超大型天线阵列跨场通信开放问题和潜在研究方向，包括理论界限、硬件高效设计、跨场波束训练，以及多用户通信与组网。

VII. 致谢

本研究得到国家自然科学基金委员会项目（ 62171280）以及中国中央高校基本科研业务费专项资金的资助。

参考文献

[1] T. S. Rappaport、Y. Xing、O. Kanhere、S. Ju、A. Madanayake、S. Mandal、A. Alkhateeb 和 G. C. Trichopoulos，《100 吉赫兹以上的无线通信与应用：第六代移动通信及未来的机遇与挑战》，IEEE Access，第 7 卷，第 78 729–78 757 页，2019 年。[2] Z. Chen、C. Han、Y. Wu、L. Li、C. Huang、Z. Zhang、G. Wang 和 W. Tong，《面向 2030 年及未来的太赫兹无线通信：前沿领域》，IEEE Commun. Mag.，第 59 卷，第 11 期，第 66–72 页，2021 年 11 月。[3] A. M. Elbir、K. V. Mishra、S. A. Vorobyov 和 R. W. Heath，《波束成形的 25 年发展：从凸与非凸优化到学习技术》，IEEE Signal Process. Mag.，第 40 卷，第 4 期，第 118–131 页，2023 年 6 月。[4] M. Cui、Z. Wu、Y. Lu、X. Wei 和 L. Dai，《面向第六代移动通信的近场 MIMO 通信：基础、挑战、潜力与未来方向》，IEEE Commun. Mag.，第 61 卷，第 1 期，第 40–46 页，2023 年 1 月。[5] C. Han、L. Yan 和 J. Yuan，《太赫兹无线通信的混合波束成形：挑战、架构与开放问题》，IEEE Wireless Commun.，第 28 卷，第 4 期，第 198–204 页，2021 年 8 月。[6] W. Yu、Y. Shen、H. He、X. Yu、J. Zhang 和 K. B. Letaief，《通过定点网络进行太赫兹超大规模 MIMO 的远场与近场混合信道估计》，载于 IEEE Globecom 会议论文集，巴西里约热内卢，2022 年，第 1–6 页。[7] F. Bohagen、P. Orten 和 G. E. Oien，《视距 MIMO 信道的球面波与平面波建模比较》，IEEE Trans. Commun.，第 57 卷，第 3 期，第 841–849 页，2009 年 3 月。[8] E. Bj¨ornson 和 L. Sanguinetti，《大规模 MIMO 与智能反射面的功率缩放定律和近场特性》，IEEE Open J. Commun. Society，第 1 卷，第 1306–1324 页，2020 年 9 月。[9] Y. Han、S. Jin、C.-K. Wen 和 X. Ma，《极大规模大规模 MIMO 系统的信道估计》，IEEE Wireless Commun. Lett.，第 9 卷，第 5 期，第 633–637 页，2020 年 5 月。[10] A. Alkhateeb、O. El Ayach、G. Leus 和 R. W. Heath，《毫米波蜂窝系统的信道估计与混合预编码》，IEEE J. Sel. Topics Signal Process.，第 8 卷，第 5 期，第 831–846 页，2014 年 10 月。[11] C. Lin、G. Y. Li 和 L. Wang，《面向毫米波和亚太赫兹通信的基于子阵列的协同波束成形训练》，IEEE J. Sel. Areas Commun.，第 35 卷，第 9 期，第 2115–2126 页，2017 年 9 月。[12] W. Liu、H. Ren、C. Pan 和 J. Wang，《近场域中极大规模大规模 MIMO 的基于深度学习的波束训练》，IEEE Commun. Lett.，第 27 卷，第 1 期，第 170–174 页，2023 年 1 月。[13] Z. Wu 和 L. Dai，《近场通信的多址接入：空分多址还是位置分多址？》，IEEE J. Sel. Areas Commun.，第 41 卷，第 6 期，第 1918–1935 页，2023 年 6 月。[14] Y. Chen、L. Yan 和 C. Han，《太赫兹超大规模多输入多输出信道的球面波与平面波混合建模及基于深度卷积神经网络的估计》，IEEE Trans. Commun.，第 69 卷，第 10 期，第 7063–7076 页，2021 年 10 月。[15] Y. Chen、R. Li、C. Han、S. Sun 和 M. Tao，《太赫兹集成超大规模多输入多输出与智能反射面系统的球面波与平面波混合信道建模及估计》，IEEE Trans. Wireless Commun.，即将于 2023 年发表。

个人简介

Chong Han 是中国上海交通大学电子工程系、协同媒体网络创新中心（CMIC）以及太赫兹无线通信实验室（TWC）的 John Wu & Jane Sun 捐赠副教授。

Yuhang Chen 目前正在中国上海交通大学太赫兹无线通信实验室攻读博士学位。

Longfei Yan 目前正在中国上海交通大学太赫兹无线通信实验室攻读博士学位。

Zhi Chen 是电子科技大学教授。

Linglong Dai 是清华大学副教授。他曾获得六次最佳会议论文奖和四次最佳期刊论文奖。