



专题: 6G

面向大规模天线系统的稀布阵技术与评估

楼梦婷¹, 金婧¹, 王菡凝¹, 王启星¹, 王江舟²

(1. 中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053; 2. 肯特大学, 英国 坎特伯雷 CT2 7NZ)

摘要: 通过大量天线数服务用户, 大规模天线技术可有效提升频谱效率。然而, 大规模天线将带来射频链路数量的大幅增加, 进而带来成本的急剧提升, 所以大规模天线的设计需要综合考虑性能和成本的折中。稀布阵技术通过优化天线阵元位置分布、激励幅度, 可实现以更少的天线数逼近均匀阵列的性能, 从而带来射频链路数量的降低和成本的控制, 取得较好的性价比平衡。介绍了稀布阵关键技术的实现方案, 评估分析了稀布阵的链路级性能以及在面向 6G 的大规模天线系统中应用稀布阵的系统性能。数据分析表明, 稀布阵在小幅性能损失的情况下, 可以显著降低天线阵元数, 节约基站设备成本。

关键词: 6G; 稀布阵; 大规模天线阵列; 凸优化; 天线综合

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021218

Research and evaluation of sparse array for massive MIMO

LOU Mengting¹, JIN Jing¹, WANG Hanning¹, WANG Qixing¹, WANG Jiangzhou²

1. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

2. University of Kent, Canterbury CT2 7NZ, U.K.

Abstract: Massive multiple-input multiple-output (mMIMO) enables higher spectrum efficiency by deploying a large number of antenna elements. However, mMIMO will bring a substantial increase in the number of radio frequency (RF) channel, which will result in a sharp increase in cost. Therefore, it is necessary to design mMIMO with comprehensive consideration of the trade-off between the performance and the cost. Sparse array technology can approach the performance of the uniform array with less number of antenna elements by optimizing the position distribution and excitation amplitudes of the antenna elements, thereby reducing the number of RF channels and controlling the cost, and achieving a better cost-effective balance. Both link-level and system-level evaluations and analysis of sparse array based mMIMO that targets for 6G were performed under realistic simulation settings. The results show that with little performance loss, the sparse array based mMIMO can significantly reduce the number of antenna elements and the cost of base station infrastructure.

Key words: 6G, sparse array, massive MIMO, convex optimization, antenna synthesization

收稿日期: 2021-08-10; 修回日期: 2021-09-15

基金项目: 北京邮电大学-中国移动研究院联合创新中心资助项目

Foundation Item: Funded by Beijing University of Posts and Telecommunications-China Mobile Research Institute Joint Innovation Center

1 引言

移动通信网络是数字经济发展的核心基础设施,加速了社会的信息化和数字化。5G 作为当前信息通信业发展焦点,正在逐步部署和发展商用。随着行业应用需求不断扩张,移动通信容量不足以成为“互联网+”应用持续创新和快速发展的瓶颈。大规模天线阵列 (massive multiple-input multiple-output, mMIMO) 技术作为 B5G (beyond 5G)^[1]以及 6G^[2]的核心技术之一,可通过部署更大规模的天线阵列获得更高的频谱效率和系统容量^[3-4],满足未来人们更高的移动通信服务需求。目前天线产品在迎风面、体积、重量、功耗等方面已达到商用部署最大规格,未来天线阵列的规模持续增大,天线阵元数以及射频通道数将进一步增多,基站硬件设计将面临天线阵面尺寸扩大、重量显著增加、馈电网络更加复杂的挑战。在此背景和需求下,研究者们提出了数模混合预编码、低比特量化 mMIMO 等方法降低 mMIMO 系统的功耗和硬件成本。例如,文献[5]首次从理论上证明,即便是用 1 bit 的 ADC,只要 mMIMO 天线数足够多,系统就可采用任意高阶 PSK 信号传输信息。除上述研究之外,面向 B5G/6G 的天线阵列设计需要考虑天线的优化布局,降低天线阵列规模持续扩展带来的实际部署压力。

稀布阵是一项解决上述问题的潜在使能技术^[6-7],通过优化阵元位置分布、激励幅度等,减少天线和射频通道数,且保证阵列方向图与同口径均匀阵相近。此时,相邻天线阵元的阵间距不再相同,且不再受半波长的约束,部分阵间距甚至可达到若干个半波长,因此稀布阵具有节省天线数、简化阵列结构、减轻阵列重量、抑制天线间互耦效应等优势,在雷达与卫星通信系统、感知与成像、射电天文中已有广泛应用。

天线方向图综合是稀布阵设计的核心关键,即以最少的天线阵元数来实现给定性能的天线阵

元排布。为了获得与原均匀阵相当的性能,稀布阵天线综合需要在给定阵列尺寸、最小阵元间距等诸多约束条件下,对天线阵元的位置、激励幅度等目标参数进行优化设计。由此可见,稀布阵天线综合是一个多变量的非线性优化问题。业界针对稀布阵天线综合算法的有效性开展了广泛的研究,目前应用于稀布阵天线综合的算法主要有以下几种。

(1) 智能化优化算法,包括遗传算法 (genetic algorithm, GA)^[8]、粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)^[9]、差分算法 (differential evolution, DE)^[10]等,该类算法可在较小天线规模阵列中应用,而对于大规模天线阵列,其算法的复杂度显著增加。

(2) 快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT)^[11]、矩阵束 (matrix pencil method, MPM)^[12]、前后向矩阵束 (forward-backward MPM, FBMPM)^[13]等算法有效提升了计算效率,使得大规模天线阵列的稀布综合成为可能,但这类算法大多需要目标优化天线数作为先验信息,无法获取最优天线数。

(3) 凸优化 (convex optimization, CO)^[14-15]算法是一类可以获得最优天线阵元数的优化算法,可在优化阵元位置、激励幅度的同时灵活处理最小阵间距等约束条件,具有较高的自由度,在稀布阵天线综合也有广泛的应用。

移动通信系统中,系统性能受到诸多实际环境因素的影响,包括信道质量、用户分布的随机性和移动特性等。因此,对于应用稀布阵的 mMIMO 系统而言,需要综合考虑信道环境、阵列天线数以及收发通道数变化对系统性能的影响。基于上述考虑,本文聚焦稀布阵天线综合优化算法的有效性和稀布阵技术的可实施性,对稀布阵的链路级性能以及在实际应用环境下应用稀布阵的系统性能进行仿真评估,为该技术的可部署性提供参考依据。



2 凸优化应用于稀布阵综合

大多数天线综合优化算法存在计算速度慢, 实现较复杂等问题, 且通常需要期望的稀布阵天线数作为先验信息, 无法实现天线阵元数最小化。CO 算法是一项可同时优化阵元位置和激励幅度的天线综合优化算法, 通过最小化稀布阵方向图与均匀阵方向图的误差, 该算法可获得最优的天线阵元数, 具有计算效率高、易于实现的特点。考虑到实际部署中关于天线阵列体积、重量等一系列硬件限制条件, 本文采用 CO 算法进行稀布阵优化设计, 期望以更少的天线数逼近原均匀阵的性能。

2.1 天线阵列方向图

稀布阵天线综合过程中, 天线阵列的方向图构建是基础。稀布阵按照形态可分为直线阵、平面阵、圆环阵等。其中, 平面阵由于包含垂直和水平双重维度的天线阵元, 可实现三维立体覆盖, 已在 5G 移动通信系统中得到广泛应用。如图 1 所示, 均匀平面阵 (uniform planar array, UPA) 上 $G = M \times N$ 个激活的天线阵元分布在 yoz 平面, 其中, M 为垂直方向的阵元个数, N 为水平方向的阵元个数。阵面垂直、水平方向长度分别为 L_z 、 L_y 。

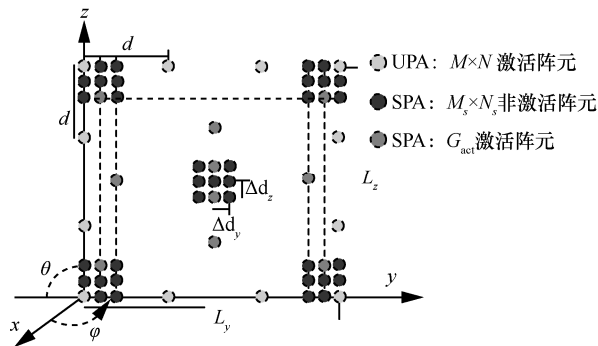


图 1 均匀平面阵、稀布平面阵示意图

假设该 UPA 上每个天线阵元的单元方向图为 1, 则由方向图乘积定理可知, 该 UPA 的方向图函数为:

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} w_{m,n} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (md \sin \theta \sin \varphi + nd \cos \theta)} = \mathbf{e}(\theta, \varphi) \otimes \mathbf{w} \quad (1)$$

其中, θ 、 φ 分别为俯仰角和方位角, 其取值范围分别为 $[0^\circ, 180^\circ]$ 、 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 。 $w_{m,n}$ 是坐标位置为 (md, nd) 的天线阵元的激励幅度, d 为该均匀平面阵的阵间距, λ 为空间自由波长。 $\mathbf{e}(\theta, \varphi)$ 、 $\mathbf{w}$ 分别为导向矢量、激励矢量, $\otimes$ 为内积运算。

对于稀布平面阵 (sparse planar array, SPA), 优化设计前需要构建虚拟的均匀平面阵。如图 1 所示, 在与上述 UPA 相同的阵面尺寸下, 以 Δd_y 、 Δd_z ($\Delta d_y, \Delta d_z \ll d$) 分别为 y 轴、 z 轴上的阵间距, 构建包含 $G_s = M_s \times N_s$ ($G_s \gg G$) 个虚拟的非激活天线阵元的初始化 SPA, 其中初始化 SPA 的方向图与式 (1) 类似。通过阵列优化设计, 可基于该初始化 SPA 获得 G_{act} 个天线阵元, 这些天线阵元可认为是激活的天线阵元, 在实际系统中具有辐射能力。 G_{act} 个激活的天线阵元形成重构 SPA, 其方向图函数为:

$$F_s(\theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{G_{act}-1} w_l^s e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (y_l^s \sin \theta \sin \varphi + z_l^s \cos \theta)} = \mathbf{e}_s(\theta, \varphi) \mathbf{w}_s \quad (2)$$

其中, w_l^s 是重构 SPA 中位于 (y_l^s, z_l^s) 的天线阵元的激励幅度, $\mathbf{e}_s(\theta, \varphi)$ 、 $\mathbf{w}_s$ 分别为导向矢量、激励矢量。

稀布阵的稀疏度 η 表征了天线阵元减少程度, 可计算如下:

$$\eta = \left(1 - \frac{G_s}{G} \right) \times 100\% \quad (3)$$

此外, 为评估分析重构 SPA 与 UPA 的匹配程度, 定义重构误差 Err 如下:

$$\text{Err} = \frac{\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} |F(\theta, \varphi) - F_s(\theta, \varphi)|^2 d\varphi d\theta}{\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} |F(\theta, \varphi)|^2 d\varphi d\theta} \quad (4)$$

其中, $\theta_{\max}$ 、 $\theta_{\min}$ 和 $\varphi_{\max}$ 、 $\varphi_{\min}$ 分别为俯仰角和方位角的上、下限。

2.2 基于凸优化的稀布阵天线综合

以更少天线数拟合均匀阵可转化为稀疏求解问题,即通过求解初始化 SPA 中激励幅度非 0 的天线阵元的个数,获得所需的重构 SPA。上述问题虽然可认为是通过 l_0 范数实现稀疏化,但 l_0 范数最小化在工程实践中是 NP 难问题,难以优化求解。为此,可将上述 l_0 范数最小化问题转化为 l_1 范数最小化的凸优化求解问题,实现阵列的稀疏设计。凸优化问题求解中,匹配误差 ε 是一个关键控制参数,通过改变 ε 可控制稀布阵的稀疏度和算法的收敛速度。基于凸优化的稀布阵天线综合的具体步骤如下。

(1) 初始化稀布阵优化设计参数。包括 UPA 垂直和水平天线数 M 、 N 以及阵间距 d , 初始化稀布阵垂直和水平天线数 M_s 、 N_s 以及阵间距 Δd_z 、 Δd_y , 匹配误差 ε , 最大迭代次数 N_{iter} 等。

(2) 采样目标参考方向图。根据 (1), 选取期望的 $F(\theta, \varphi)$ 作为目标参考方向图, 对其进行 K 离散点均匀采样, 构建采样样本矢量为 $\mathbf{F}_{\text{ref}} = [F(\theta_1, \varphi_1), F(\theta_2, \varphi_2), \dots, F(\theta_K, \varphi_K)]^T$ 。

(3) 构建凸优化模型。为提升天线综合优化求解的稀疏性, 可采用基于迭代权重 l_1 范数^[16]优化求解方法, 此时, 天线综合问题可构建为如下凸优化模型:

$$\begin{aligned} \min \mathbf{w}_s^{(p)} \\ \text{s.t. } \frac{\mathbf{F}_{\text{ref}} - \mathbf{E}_s^{(p)} \mathbf{w}_s^{(p)}}{\mathbf{F}_{\text{ref}2}} \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{E}_s^{(p)}$ 、 $\mathbf{w}_s^{(p)}$ 分别为第 p 次迭代过程中的导向矩阵、激励矢量, 且 $\mathbf{w}_s^{(p)} = \sum_s^{(p-1)} \mathbf{w}_s^{(p-1)}$ 。 $\sum_s$ 为对角阵, 第 p 次迭代中对角阵上第 i 个元素 u_i 更新如下:

$$u_i^{(p)} = \frac{1}{|\mathbf{w}_{i,s}^{(p-1)}| + \xi} \quad (6)$$

其中, ξ 为已知大于 0 的常量, 确保式 (6) 分母不为 0。

(4) 初始化求解。初始化 $p=1$, 利用式 (5) 进行求解。记录 $\mathbf{w}_s^{(1)}$ 中每个虚拟天线阵元对应的激励幅度, 以及激励幅度绝对值大于 0 的天线阵元数量。

(5) 循环求解。通过式 (6) 对激励矢量更新, 并重新利用式 (5) 求解, 记录对应的激励幅度以及激励幅度绝对值大于 0 的天线阵元数量, $p=p+1$ 。

(6) 判断是否连续若干次迭代中天线阵元数量恒定且 $p \leq N_{\text{iter}}$ 。若满足条件, 输出最后一次迭代的对应解, 否则返回步骤 (5)。若 $p > N_{\text{iter}}$ 仍不满足该判定条件, 返回步骤 (1) 修正初始化参数后重新求解。

3 链路级性能评估

仿真过程选取的目标参考方向图由 8×8 均匀平面阵 (64-UPA) 生成, 其中, 各天线阵元的激励幅度均为 1, 且该参考方向图的主波束指向阵轴方向。基于凸优化算法进行天线综合过程中, 通过依次配置 ε 为 1% 和 10%, 分别生成了含 52 天线阵元的稀布阵 (52-SPA)、含 32 天线阵元的稀布阵 (32-SPA)。

3.1 阵元位置分布与激励幅度

64-UPA、52-SPA、32-SPA 阵元位置分布以及激励幅度如图 2 所示, 52-SPA 和 32-SPA 阵列中部分天线阵元的阵列间超过半波长, 稀布阵整体的阵元位置分布呈现中心对称特性, 因此在实际天线阵列设计中, 可考虑参考部分方向图进行优化, 简化算法复杂度。

52-SPA 和 32-SPA 阵列中天线阵元的激励幅度不再保持为 1, 不同位置的阵元的激励幅度存在显著差异。进一步对比图 2 (b)、图 2 (c) 可以看出, 随着稀疏度的增加, 大多数阵元激励幅度显著提升。其中, 52-SPA 阵元的激励幅度均值达到 1.229 0, 32-SPA 阵元的激励幅度均值达到 1.820 2。

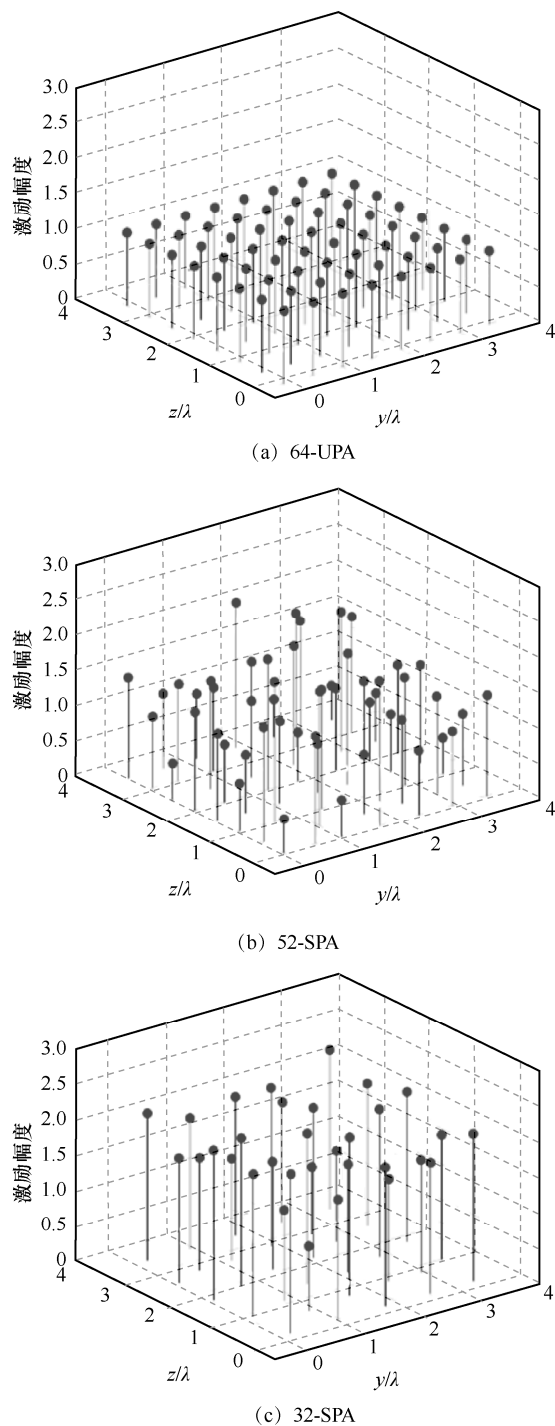


图2 均匀阵、稀疏阵阵元位置分布以及激励幅度

3.2 天线方向图

移动通信系统中，单个蜂窝扇形小区在 φ 方向扫描角度范围一般为 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 。考虑扫描角度的对称性，本节只评估扫描角度 60° 以内的方向图特性。3种阵列在 φ 方向上不同扫描角度下

($\hat{\varphi}_1 = 0^\circ, \hat{\varphi}_2 = 20^\circ, \hat{\varphi}_3 = 40^\circ$) 的归一化辐射方向图特性如图3所示，当扫描角度为 0° 时，52-SPA与64-UPA归一化方向图几乎重合。随着扫描角度逐渐增大，52-SPA、32-SPA均出现部分旁瓣电平抬升，32-SPA甚至出现了栅瓣。

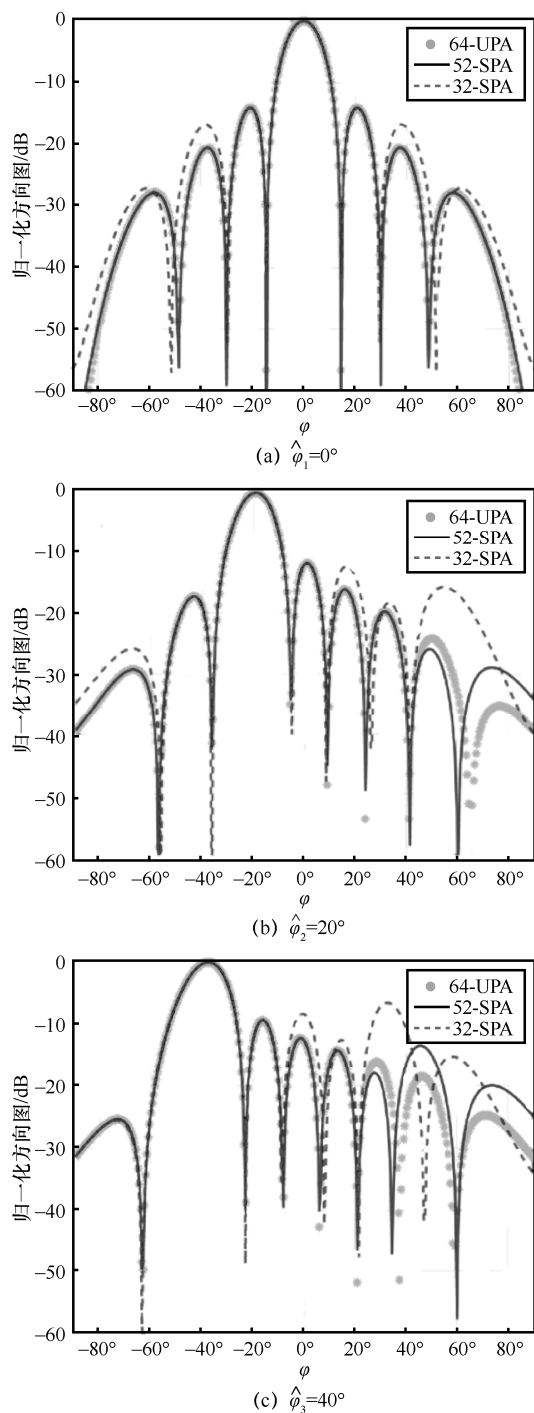


图3 不同扫描角度下，均匀阵、稀疏阵归一化辐射方向图特性

表 1 64-UPA、52-SPA、32-SPA 的 3dB 波束宽度、最大副瓣电平

平面阵	3 dB 波束宽度/ $^{\circ}$			最大副瓣电平/dB		
	$\hat{\varphi}_1 = 0^{\circ}$	$\hat{\varphi}_2 = 20^{\circ}$	$\hat{\varphi}_3 = 40^{\circ}$	$\hat{\varphi}_1 = 0^{\circ}$	$\hat{\varphi}_2 = 20^{\circ}$	$\hat{\varphi}_3 = 40^{\circ}$
64-UPA	12.56	13.21	15.34	-14.05	-11.71	-9.31
52-SPA	12.56	13.22	15.35	-14.04	-11.70	-9.30
32-SPA	12.73	13.39	15.52	-14.02	-11.68	-6.50

表 1 进一步分析了不同扫描角度下上述阵列的 3 dB 波束宽度、最大副瓣电平 (max side lobe level, MSLL)。当扫描角度为 0° 时, 52-SPA、32-SPA 的 3 dB 波束宽度、MSLL 与 64-UPA 近乎一致。而当扫描角度逐渐增大, 相比于 64-UPA, 52-SPA、32-SPA 的 3 dB 波束宽度虽然无明显展宽, 但部分副瓣电平升高。特别是在 $\hat{\varphi}_3 = 40^{\circ}$ 情况下的 32-SPA, 其 MSLL 高达 -6.50 dB, 相比于 64-UPA 增长约 30.18%。

3.3 重构误差

根据式 (4) 可计算得到不同扫描角度下 52-SPA 和 32-SPA 阵列的重构误差, 如图 4 所示, 扫描角度步长为 2° , 计算过程中俯仰角的上、下限取值分别为 180° 和 0° , 方位角的上、下限取值分别为 60° 和 -60° 。结果表明, 扫描角度增加, 重构误差也逐步增大。当扫描角度不超过 22° 时, 32-SPA 重构误差不超过 6%, 低于 52-SPA 的重构误差, 值得注意的是, 此时 32-SPA 的阵元数远小于 52-SPA, 稀疏度高达 50%。当扫描角度进一步增大, 52-SPA 重构误差增大趋势较为缓慢, 而 32-SPA 的重构误差显著增加。例如, 扫描角度达到小区覆盖边缘 60° 时, 52-SPA 重构误差不超过 35%, 而 32-SPA 重构误差大于 80%。

上述性能分析表明, 稀布阵稀疏度的提升是以扫描能力下降为代价的。在扫描角度较小时, 稀疏度达到 50% 的 32-SPA 仍可获得较低重构误差, 而当扫描角度较大时, 32-SPA 的重构误差性能急剧恶化。随着未来网络定向服务需求逐渐凸显, 对于用户分布较为集中的区域 (如写字楼)

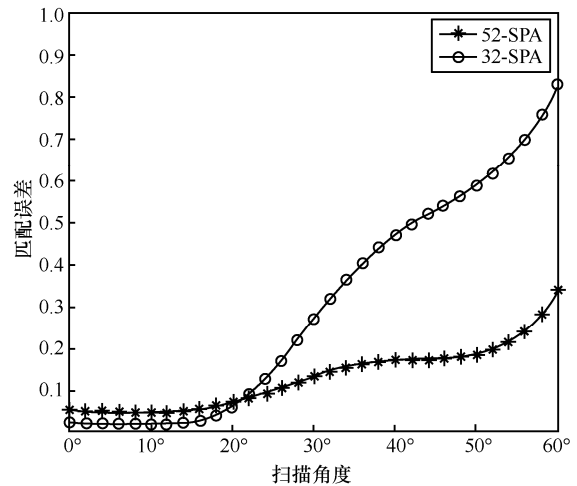


图 4 不同扫描角度下的重构误差

可以采用稀疏度较高的稀布阵进行定向服务, 减少扫描引发的干扰, 保障逼近均匀阵性能的同时大幅节约基站天线部署成本。

4 系统级性能评估

系统级仿真过程所涉及的基站将分别装配 64-UPA、52-SPA、32-SPA 天线阵列进行性能对比分析。

4.1 仿真参数

为评估 mMIMO 应用稀布阵的实际性能, 系统级性能评估基于时分双工 (time division duplexing, TDD) 移动通信系统以及宏蜂窝 (urban macro cell, UMA) 应用场景展开, 并根据 3GPP TR 38.901^[17] 构建 5G 信道模型。如图 5 所示, 网络拓扑采用蜂窝六边形结构, 每个蜂窝结构的中心为宏基站, 分别覆盖当前蜂窝结构内的 3 个扇区。终端用户在每个扇区内随机分布且具有一定移动



表 2 系统仿真参数

变量	数值	变量	数值
基站数/小区数	19/57	64-UPA: 64Tx64Rx	
站间距	350 m	基站天线配置	52-SPA: 52Tx52Rx
基站高度	25 m	32-SPA: 32Tx32Rx	
系统带宽	100 MHz	基站发射功率	53 dBm
载频	2.4 GHz	终端天线配置	2Tx2Rx
子载波间隔	30 kHz	终端发射功率	23 dBm
业务模型	full buffer, 50%加扰	终端移动速度	3 km/h

性。对于 64-UPA、52-SPA、32-SPA 天线阵列，每个天线阵元均配备一套发送和接收射频通道。为保证功率公平，所有系统级仿真中，对于配置不同天线阵列的基站，其发射总功率保持相同。其他系统级仿真参数见表 2。

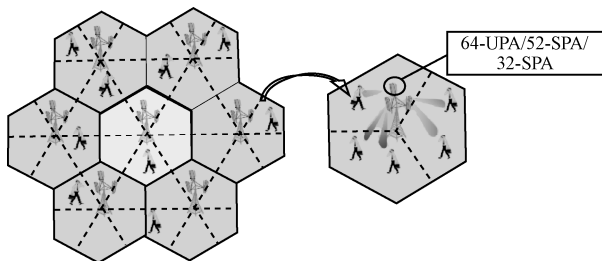


图 5 蜂窝拓扑结构

4.2 仿真结果

性能评估的主要评价指标包括小区平均吞吐量和小区边缘用户吞吐量。系统级仿真过程中，通过 1 000 次循环试验获得用户净吞吐量的累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)。小区边缘用户吞吐量通过累积用户净吞吐量的前 5%计算得到，小区平均吞吐量通过系统的总吞吐量除以小区数计算得到。

图 6 给出 64-UPA、52-SPA、32-SPA 3 种阵列应用系统的 CDF 曲线。可以观察到，相比于 64-UPA 应用系统，52-SPA 应用系统、32-SPA 应用系统均存在一定性能损失，而 52-SPA 应用系统与 32-SPA 应用系统表现相近。

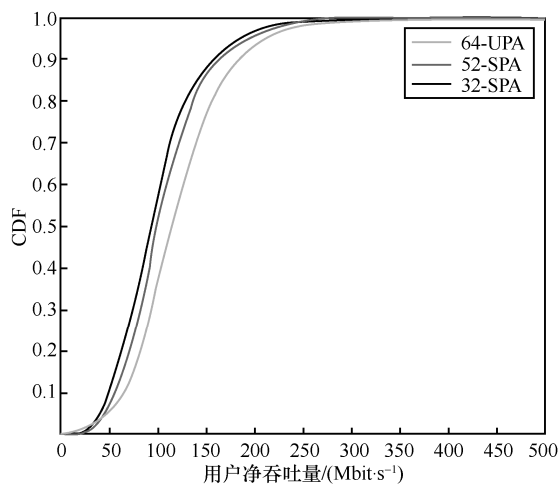


图 6 不同阵列应用系统的吞吐量 CDF 曲线

表 3 归纳了 3 种阵列应用系统的小区边缘用户吞吐量和小区平均吞吐量。当天线阵元数为 52 时，其小区边缘用户吞吐量性能损失约为 3.73%，当天线阵元数进一步缩减至 32 时，其系统性能损失约为 10.64%。对于小区平均吞吐量，52-SPA 应用系统的性能损失约为 11.53%，32-SPA 应用系统的性能损失约为 16.72%。

出现上述性能损失的原因是扫描过程中旁瓣以及栅瓣引入的干扰。对于移动通信系统中处于远离阵轴线方向的用户，基站的天线阵列需要采用较大扫描角度的波束服务，此时稀布阵的旁瓣甚至栅瓣将对本小区的其他用户甚至邻小区用户造成干扰，导致系统性能下降。值得注意的是，虽然 32-SPA 应用系统的性能损失略高于 52-SPA

表 3 不同阵列应用系统的小区
平均吞吐量、小区边缘用户吞吐量

平面阵	稀疏度	小区边缘用户 吞吐量/(Mbit·s ⁻¹)	小区平均 吞吐量/(Mbit·s ⁻¹)
64-UPA	—	45.60	1 201.90
52-SPA	18.75%	43.90	1 063.25
32-SPA	50.00%	40.75	1 000.95

应用系统,但 32-SPA 的稀疏度高达 50%,大幅降低了天线数以及射频通道数。

5 结束语

本文结合实际部署的限制条件,提出了在大规模天线系统中引入稀布阵技术,更好地支持未来超大规模天线技术演进。基于凸优化的稀布阵天线综合方案,可同时优化天线阵元位置和激励幅度,具有良好的稀疏效果。此外,通过参数调节可获取不同稀疏度的稀布阵,能够满足不同系统对于稀布阵规模的需求。

本文通过链路级性能评估分析了稀布阵的相关特性,并通过系统级性能评估验证了 mMIMO 系统应用稀布阵的性能,对实际部署应用稀布阵进行了有益探索。评估结果显示,稀布阵技术可有效降低天线阵元数,但天线阵元数的缩减是以牺牲扫描能力为代价的。在实际移动通信环境中,稀布阵可在小幅性能损失的情况下,大幅降低射频通道数(可高达 50%),进而大幅降低整机成本和系统复杂度,因此实际部署可综合权衡性能下降和天线数降低两者之间的关系。面向未来 B5G 和 6G 移动通信网络,实际部署稀布阵可优先考虑定向覆盖区域,降低其扫描产生的旁瓣或栅瓣带来的不利影响,保证用户在覆盖区域内的通信体验。

参考文献:

- [1] ZHOU Y Q, TIAN L, LIU L, et al. Fog computing enabled future mobile communication networks: a convergence of communication and computing[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(5): 20-27.
- [2] ZHOU Y Q, LIU L, WANG L, et al. Service-aware 6G: an intelligent and open network based on the convergence of communication, computing and caching[J]. Digital Communications and Networks, 2020, 6(3): 253-260.
- [3] SUN B L, ZHOU Y Q, YUAN J H, et al. Interference cancellation based channel estimation for massive MIMO systems with time shifted pilots[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(10): 6826-6843.
- [4] BJÖRNSON E, SANGUINETTI L, WYMEERSCH H, et al. Massive MIMO is a reality—what is next? : five promising research directions for antenna arrays[J]. Digital Signal Processing, 2019(94): 3-20.
- [5] SUN B L, ZHOU Y Q, YUAN J H, et al. High order PSK modulation in massive MIMO systems with 1 bit ADCs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(4): 2652-2669.
- [6] JOSEFSSON L, PERSSON P. Conformal array antenna theory and design[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [7] BALANIS C A. Antenna theory: analysis and design[EB]. 1996.
- [8] ARES-PENA F J, RODRIGUEZ-GONZALEZ J A, VILLANUEVA-LOPEZ E, et al. Genetic algorithms in the design and optimization of antenna array patterns[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(3): 506-510.
- [9] PATHAK N, MAHANTI G K, SINGH S K, et al. Synthesis of thinned planar circular array antennas using modified particle swarm optimization[J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2009, 12: 87-97.
- [10] CAORSI S, MASSA A, PASTORINO M, et al. Optimization of the difference patterns for monopulse antennas by a hybrid real/integer-coded differential evolution method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(1): 372-376.
- [11] KEIZER W P M N. Large planar array thinning using iterative FFT techniques[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(10): 3359-3362.
- [12] LIU Y H, NIE Z P, LIU Q H. Reducing the number of elements in a linear antenna array by the matrix pencil method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(9): 2955-2962.
- [13] LIU Y H, LIU Q H, NIE Z P. Reducing the number of elements in the synthesis of shaped-beam patterns by the forward-backward matrix pencil method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(2): 604-608.
- [14] ZHAO X W, YANG Q S, ZHANG Y H. Compressed sensing approach for pattern synthesis of maximally sparse non-uniform linear array[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2014, 8(5): 301-307.
- [15] LOU M T, JIN J, WANG H N, et al. Applying sparse array in massive MIMO via convex optimization[C]//Proceedings of 2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 721-723.
- [16] FUCHS B, SKRIVERVIK A, MOSIG J R. Shaped beam syn-



thesis of arrays via sequential convex optimizations[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12: 1049-1052.

[17] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: TR38.901[S]. 2017.

[作者简介]



楼梦婷（1993-），女，中国移动通信有限公司研究院研究员，主要研究方向为无线通信、MIMO、稀布阵等。



王菡凝（1992-），女，中国移动通信有限公司研究院研究员，主要研究方向为无线通信、MIMO、稀布阵、可见光等。



王启星（1978-），男，中国移动通信有限公司研究院主任研究员，主要研究方向为无线通信、MIMO 等。



金婧（1986-），女，中国移动通信有限公司研究院高级研究员、高级工程师，主要研究方向为无线通信、MIMO、多用户波束成形、干扰消除等。



王江舟（1961-），男，肯特大学终身教授、英国皇家工程院院士，主要研究方向为移动通信等。