

# 低空信道下大规模 MIMO 信道模型与通信性能分析

王天雄<sup>1</sup>, 唐韬略<sup>2</sup>, 纪金伟<sup>1</sup>

(1. 中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081;

2. 中国人民解放军 94691 部队, 福建 龙岩 366202)

**摘要:** 面向低空宽带上行业务场景, 研究低空信道条件下 Massive MIMO 技术的适用性; 针对低空用户视距传播概率高、空间分布具有三维特性且信道时变性较强的特点, 建立了考虑 Rician 衰落、空间相关性和 CSI 老化效应的上行信道模型, 分析了 LoS 强度、用户角度分布和信道时变性对阵列接收增益、多用户可分性及系统总频谱效率的影响, 并对 MRC 与 ZF 两种线性接收方式进行了比较分析; 结果显示 LoS 增强有利于提升阵列接收增益, 但当用户方向集中时, 会因信道相关性升高而削弱空间复用收益; 较大的角度分散有助于提高系统频谱效率; 同时 CSI 老化会显著降低接收性能, 且在大规模阵列条件下性能损失更为突出; 此外低空强 LoS 环境中 Massive MIMO 的有利传播特性弱化, MRC 接收性能明显弱于 ZF 接收。

**关键词:** 低空通信; 大规模多输入多输出; 空间相关性; CSI 老化; 频谱效率

## Analysis of Massive MIMO Channel Models and Communication Performance in Low-Altitude Channels

WANG Tianxiong<sup>1</sup>, TANG Taolue<sup>2</sup>, JI Jinwei<sup>1</sup>

(1. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Shijiazhuang 050081, China;

2. Unit 94691 of the People's Liberation Army, Longyan 366202, China)

**Abstract:** For low-altitude broadband uplink scenarios, research on the applicability of massive multiple-input multiple-output (MIMO) in realistic channel conditions is conducted. For low-altitude users characterized by high line-of sight (LoS) propagation probability, three-dimensional spatial distribution, and significant temporal channel variation, an uplink channel model incorporating Rician fading, spatial correlation, and channel state information (CSI) aging effects is established, which analyzes the influences of LoS strength, user angular distribution, and channel temporal variation on reception gain, multi-user separability, and system total spectral efficiency, with a comparative analysis between maximum ratio combining (MRC) and zero-forcing (ZF) linear reception receivers. The results show that the LoS enhancement is beneficial for improving array reception gain, but with the user's direction concentrated, the spatial multiplexing gain is weakened due to increased channel correlation, and a larger angular dispersion is beneficial for system spectral efficiency. Meanwhile, CSI aging significantly degrades its reception performance, with more pronounced performance loss under large-scale array conditions. Furthermore, in low-altitude LoS-dominated environments, the massive MIMO weakens the favorable propagation property, and the MRC reception is significantly weaker than the ZF reception.

**Keywords:** low-altitude communications; massive MIMO; spatial correlation; CSI aging; spectral efficiency

收稿日期: 2026-06-09; 修回日期: 2026-07-07。

作者简介: 王天雄(1986-), 男, 博士, 高级工程师。

通讯作者: 纪金伟(1986-), 男, 博士, 高级工程师。

引用格式: 王天雄, 唐韬略, 纪金伟. 低空信道下大规模 MIMO 信道模型与通信性能分析[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(9): 244-249, 273.

## 0 引言

随着低空经济快速发展,无人机物流、城市巡检、应急救援和空中感知等应用场景不断拓展,低空通信网络正成为新一代移动通信系统的重要延伸方向<sup>[1-4]</sup>。目前主要依托现有蜂窝移动通信网络为低空飞行器提供接入服务,已成为低空物联网和空地一体化通信的重要发展路径<sup>[4-6]</sup>。大规模多输入多输出(Massive MIMO, massive multiple-input multiple-output)技术作为第五代(5G, fifth-generation)及后续移动通信系统提升频谱效率和覆盖能力的核心手段之一<sup>[7-9]</sup>,已得到广泛应用。

与传统地面移动通信网络相比,低空通信网络在信道特征和业务传输上有显著的差别。信道特征方面,空地链路更容易形成视距传播,信道通常呈现视距(LoS, line-of-sight)主导和强莱斯(Rician)衰落特征;同时,低空场景中的散射体主要分布于地表及建筑物周边,角度扩展相对有限,容易导致用户间信道相关性增强<sup>[10-12]</sup>;此外,低空用户具有更加明显的三维分布和更强的移动性,其俯仰角变化、多普勒效应以及信道状态信息(CSI, channel state information)时变性均可能对接收合并和多用户检测性能产生影响<sup>[13-15]</sup>。业务传输方面,低空通信业务具有明显的强上行弱下行的特征。上行链路除飞行状态回传外,还需承载图像、视频及其他载荷数据传输,对系统吞吐量、频谱效率和多用户接入能力提出了更高要求<sup>[5-6]</sup>。

现有 Massive MIMO 相关理论大多建立在地面用户场景及理想化瑞利衰落信道基础上,其关于信道硬化、有利传播及线性处理有效性的经典结论,不能直接推广到低空通信场景<sup>[8-9,16]</sup>。目前关于 Massive MIMO 在低空场景中的应用研究,多聚焦于覆盖增强和波束赋形等单一性能提升问题<sup>[3,5,10-12]</sup>,对于 LoS 增强、空间相关性提高和信道时变性增强等特征如何影响 Massive MIMO 的阵列接收增益、多用户可分性和系统频谱效率,仍缺乏系统分析。因此有必要针对低空宽带上行业务场景研究 Massive MIMO 技术的适用性问题。

## 1 系统模型与低空信道建模

### 1.1 场景与系统模型

考虑蜂窝网络支持低空飞行器接入的上行通信场景。地面基站配置大规模天线阵列,用于接收多个低空用户的上行信号。低空用户为无人机终端,其上行业务除飞行状态回传外,还包括图像、视频及其他载荷数据传输,因此对系统容量和多用户接入能力具有较高要求。

为突出低空信道特征对 Massive MIMO 适用性的影响,本文采用单小区多用户模型进行分析。设基站配置

$M$  根接收天线,小区内同时接入的低空用户数为  $K$ 。基站位置表示为  $\mathbf{p}_B = [x_B, y_B, h_B]^T$ ,第  $k$  个低空用户的位置表示为  $\mathbf{p}_k = [x_k, y_k, h_k]^T$  则基站与该用户之间的三维传播距离为  $d_k = \|\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_B\|$ 。

与传统地面用户主要分布在二维平面不同,低空用户在空域中呈三维分布,其空间可分性不仅与水平方位有关,也与俯仰角分布密切相关。为描述基站在方位域和俯仰域的空间分辨能力,假设基站采用均匀平面阵列(UPA, uniform planar array)<sup>[17]</sup>。

在上行传输过程中,各低空用户采用单天线发送信号。设第  $k$  个用户的发送符号为  $s_k$ ,满足  $E\{|s_k|^2\} = 1$ ,发送功率为  $p_k$ 。则基站接收信号向量可表示为  $\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} \mathbf{h}_k s_k + \mathbf{n}$ ,其中,  $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  为第  $k$  个低空用户到基站的上行信道向量,  $\mathbf{n} \sim \text{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I})$  为复高斯白噪声向量。

基站采用线性接收方式检测用户信号。设第  $k$  个用户对应的检测向量为  $\mathbf{v}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ ,则其检测输出为  $\hat{s}_k = \mathbf{v}_k^H \mathbf{y}$  将接收信号展开,有:

$$\hat{s}_k = \sqrt{p_k} \mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_k s_k + \sum_{i \neq k} \sqrt{p_i} \mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_i s_i + \mathbf{v}_k^H \mathbf{n} \quad (1)$$

因此,第  $k$  个用户的上行接收信干噪比为:

$$\text{SINR}_k^{\text{UL}} = \frac{p_k |\mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_k|^2}{\sum_{i \neq k} p_i |\mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_i|^2 + \sigma^2 |\mathbf{v}_k|^2} \quad (2)$$

上述模型能够刻画低空宽带上行业务中的期望信号增强、用户间干扰及噪声影响,为后续分析提供基础。

### 1.2 低空 Rician 信道模型

低空飞行器在较高空域飞行时,基站与用户之间更容易形成视距传播,因此低空环境下空地信道通常不同于传统地面场景下的富散射瑞利信道。为表征低空链路中 LoS 增强与局部散射共存的传播特性,本文采用三维 Rician 衰落模型<sup>[18]</sup>描述第  $k$  个用户的上行信道,即:

$$\mathbf{h}_k = \sqrt{\beta_k} \left( \sqrt{\frac{K_k}{K_k + 1}} \mathbf{h}_{k, \text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{K_k + 1}} \mathbf{R}_k^{1/2} \mathbf{g}_k \right) \quad (3)$$

其中:  $\beta_k$  为大尺度衰落系数,  $K_k$  为 Rician 因子,  $\mathbf{h}_{k, \text{LoS}}$  为 LoS 分量对应的阵列响应向量,  $\mathbf{R}_k$  为非视距(NLoS, non-line-of-sight)分量的空间相关矩阵,  $\mathbf{g}_k \sim \text{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_M)$  为独立复高斯随机向量。

该模型同时包含确定性 LoS 分量和随机散射分量。当  $K_k$  较大时,LoS 分量占主导地位,信道方向性更强;当  $K_k$  较小时,散射分量占比增加,信道随机性增强。与地面用户相比,低空用户通常具有更高的 LoS 概率和更大的 Rician 因子,因此其信道统计特性会对 Massive MIMO 的阵列接收增益和多用户分离能力产生显著影响。

### 1.3 阵列响应与空间相关性建模

考虑基站采用 UPA 结构,LoS 分量由用户相对于

基站的方位角和俯仰角共同决定。设第  $k$  个用户的方位角和俯仰角分别为  $\varphi_k$  和  $\theta_k$ ，则其 LoS 阵列响应可表示为：

$$\mathbf{h}_{k,\text{LoS}} = \mathbf{a}_{\text{az}}(\varphi_k) \otimes \mathbf{a}_{\text{el}}(\theta_k) \quad (4)$$

其中： $\mathbf{a}_{\text{az}}(\varphi_k)$  和  $\mathbf{a}_{\text{el}}(\theta_k)$  分别表示方位域和俯仰域导向向量， $\otimes$  表示 Kronecker 积。

为表征该特性，对于 LoS 分量，用户间的空间相关性由导向向量  $\mathbf{a}_{\text{az}}(\varphi_k)$  和  $\mathbf{a}_{\text{el}}(\theta_k)$  的相似性决定。用户角度越接近，其 LoS 阵列响应向量的内积越大，空间相关性越强，该效应隐含于信道模型的结构中。对于 NLoS 分量，采用空间相关矩阵  $\mathbf{R}_k$  描述其在阵列天线间的相关性。一般而言，角度扩展越小<sup>[17,19]</sup>， $\mathbf{R}_k$  的特征值越集中，信道自由度越有限，多用户并发接收能力越容易受限。

因此，低空信道中的 LoS 增强具有双重影响。一方面，较强的 LoS 分量有利于提升期望信号功率和阵列接收增益；另一方面，若多个用户在空间方向上过于接近，则可能导致用户间干扰增强，削弱 Massive MIMO 的空间复用能力。因此，分析低空场景下的空间相关性和用户可分性，是评价 Massive MIMO 适用性的关键问题。

#### 1.4 大尺度衰落与时间选择性建模

第  $k$  个低空用户的大尺度衰落系数由路径损耗和阴影衰落共同决定，可表示为  $\beta_k = C_0 d_k^{-\alpha_k} \xi_k$  其中， $C_0$  为参考距离处的路径损耗常数， $\alpha_k$  为路径损耗指数， $\xi_k$  为对数正态阴影衰落项<sup>[10-11]</sup>。由于低空用户高度增加后更易形成视距传播，其路径损耗特性与传统地面场景存在差异。在实际环境中，路径指数损耗和阴影衰落强度均可能随飞行高度、环境类型和地物分布变化而变化。为突出核心问题，本文以大尺度衰落系数、Rician 因子和空间相关矩阵的变化共同反映不同低空传播环境特征。

Rician 因子  $K_k$  同样随飞行高度和环境类型发生变化。在城区环境中，建筑物密集导致散射丰富，低空飞行器在较低高度（如 50 m）时 LoS 概率相对较低， $K_k$  因子通常较小（约 0~5 dB）；随着飞行高度升高，地物遮挡减弱，LoS 链路增强， $K_k$  因子随之增大（约 5~15 dB）。在郊区环境中，由于建筑物稀疏， $K_k$  因子整体偏高且随高度变化幅度相对较小。3GPP TR 36.777<sup>[5]</sup> 给出了不同高度和环境下的  $K_k$  因子典型取值范围。本文在数值分析中通过设置不同  $K_k$  因子水平（0~15 dB）覆盖上述典型场景，以反映传播环境差异对系统性能的影响。

除空间特性外，低空飞行器的运动还会引起明显的信道时变。设第  $k$  个用户在时刻  $t$  的信道向量为  $\mathbf{h}_k[t]$ ，则考虑 CSI 老化时，可采用一阶时间相关模型<sup>[14-16]</sup>表示：

$$\mathbf{h}_k[t] = \rho_k \mathbf{h}_k[t - \tau] + \sqrt{1 - \rho_k^2} \mathbf{e}_k[t] \quad (5)$$

其中： $\rho_k \in [0,1]$  为时间相关系数， $\tau$  为信道估计与实际数据传输之间的时间间隔， $\mathbf{e}_k[t]$  为与  $\mathbf{h}_k[t - \tau]$  独立的误差向量。用户速度越高，多普勒频移越显著，则  $\rho_k$  越小，CSI 老化效应越明显。由于 Massive MIMO 上行检测高度依赖准确 CSI，增强的信道时变性将直接影响接收合并和多用户检测性能。

#### 1.5 关键参数和性能指标

##### 1.5.1 关键参数

为分析 Massive MIMO 在低空宽带上行业务中的适用性，本文考虑如下关键参数。

###### 1) 阵列接收增益：

阵列接收增益用于衡量基站利用多天线合并提升期望信号功率的能力，可由有效接收增益  $|\mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_k|^2$  表征。该参数反映了大规模阵列对低空上行链路增强的基本作用。

###### 2) 用户间信道相关性：

为刻画不同低空用户的空间可分性，定义用户  $i$  与用户  $j$  的归一化信道相关系数为：

$$\eta_{ij} = \frac{|\mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_j|}{\|\mathbf{h}_i\| \|\mathbf{h}_j\|} \quad (6)$$

$\eta_{ij}$  越大，说明两个用户的信道方向越接近，基站越难以实现有效的多用户分离。

###### 3) CSI 老化性能损失：

通过比较理想 CSI 与过时 CSI 条件下的接收信干噪比或系统总频谱效率，可评估飞行器机动性和信道时变性对 Massive MIMO 性能的影响，从而分析其在不同飞行状态下的鲁棒性与适用边界。

##### 1.5.2 性能指标

围绕上述 3 个关键模型参数，本文通过上行频谱效率评估低空信道条件下 Massive MIMO 的性能和适用性。第  $k$  个用户的上行频谱效率定义为  $R_k^{\text{UL}} = \log_2(1 + \text{SINR}_k^{\text{UL}})$ ，则系统总上行频谱效率为  $R_{\text{sum}}^{\text{UL}} = \sum_{k=1}^K R_k^{\text{UL}}$ ，该指标能够综合反映 Massive MIMO 在低空宽带业务中对单用户增益和多用户接入能力的提升效果。

#### 2 低空信道下 Massive MIMO 性能分析

##### 2.1 LoS 增强条件下的阵列增益分析

Massive MIMO 的核心优势之一在于利用大规模天线阵列对期望信号进行相干合并，从而获得显著的阵列增益<sup>[7-9]</sup>。在传统地面瑞利散射信道中，随着基站天线数  $M$  增加，接收端可通过线性合并有效提升期望信号功率，并在一定条件下实现用户间干扰的渐近平均化。然而，在低空场景中，由于飞行器与基站之间更容易形成稳定的 LoS 链路，信道传播结构由以随机散射为主转变为 LoS 分量与散射分量并存，这使得 Massive MIMO 的阵列增益机理呈现出不同特征。

由第 1.2 节的 Rician 信道模型可知, 当  $K_k$  较大时, LoS 分量在信道中占主导地位, 与传统地面场景相比, 低空 LoS 增强通常能够进一步提升阵列合并的稳定性。其原因在于 LoS 分量具有较强方向性, 信道随机起伏相对减弱, 使得接收端更容易通过阵列波束对用户能量进行集中获取。从单用户角度看, 较高的 Rician 因子有利于提高有效信号接收功率<sup>[18]</sup>, 从而改善接收信干噪比。

## 2.2 空间相关性对多用户分离能力的影响

Massive MIMO 能够支持多用户并发接入的关键前提是不同用户信道在高维空间中具有足够的可分离性。在理想独立同分布瑞利信道条件下, 当基站天线数  $M$  足够大时, 不同用户信道向量趋于渐近正交<sup>[8-9]</sup>, 即:

$$\frac{1}{M} \mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_j \rightarrow 0, i \neq j \quad (7)$$

从而使线性接收方法即可获得良好的多用户检测性能。然而, 低空场景中的 LoS 增强和有限角域分布会削弱这种“有利传播”条件。根据 1.3 节建立的阵列响应模型, 第  $k$  个低空用户的 LoS 分量由其方位角  $\varphi_k$  和俯仰角  $\theta_k$  决定。当多个用户在空域中集中分布, 或沿相近飞行航迹接入同一基站时, 其阵列响应向量可能表现出较高相似性, 即  $\eta_{ij}$  显著增大, 基站难以在空间域内有效区分各用户信号。

在此条件下, 即使基站天线数持续增加, 多用户干扰项  $\sum_{i \neq k} p_i |\mathbf{v}_i^H \mathbf{h}_k|^2$  也不能够像理想独立散射场景中那样快速衰减。进一步地, 在空间相关性较强条件下, 不同用户信道矩阵的秩特性可能恶化, 导致有效空间自由度下降。换言之, 尽管基站物理上配置了大量天线, 但由于低空用户入射角域集中, 可供区分用户的“有效维数”并未随  $M$  成比例增长。这意味着低空场景下 Massive MIMO 的性能上限可能更多受制于用户空间分布而非天线规模本身。

## 2.3 CSI 老化对接收性能的影响

除 LoS 结构和空间相关性外, 低空飞行器的高速运动还会引入更显著的信道时间选择性, 进而导致 CSI 老化问题。Massive MIMO 上行接收通常依赖导频估计得到的信道状态信息来设计线性接收向量。若数据传输时刻的真实信道与估计时刻的信道存在偏差, 则接收向量与实际信道之间将发生失配, 导致期望信号合并增益下降, 并使干扰抑制能力减弱。

根据 1.4 节采用的一阶时间相关模型, 当飞行器速度升高或载波频率增加时, 多普勒频移增强<sup>[13-15]</sup>,  $\rho_k$  将减小, 从而使历史 CSI 对当前信道的表征能力下降。若基站仍基于过时 CSI 构造接收向量  $\mathbf{v}_k$ , 则目标用户的有效信号项  $|\mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_k[t]|^2$  将小于理想 CSI 条件下的对应值。同时, 由于接收向量未能准确匹配当前多用户信道方向, 其他用户在该接收向量上的投影也可能增大, 导致

干扰项上升。二者共同作用, 将造成接收信干噪比下降, 即  $SINR_k^{\text{outdated}} < SINR_k^{\text{ideal}}$  对于低空宽带上行业务而言, 这一影响尤为重要。一方面, 视频回传、图像传输等业务往往要求较稳定的上行吞吐性能; 另一方面, 飞行器机动性增强会使信道相干时间缩短, 从而增加导频更新频率和 CSI 维护开销。若系统无法及时完成信道跟踪, 则 Massive MIMO 依赖精确信道实现高效接收的优势将被削弱。为缓解 CSI 老化带来的性能损失, 已有研究提出利用信道时间相关性对 CSI 进行预测<sup>[13]</sup>, 通过预测值替代过时 CSI 设计接收向量, 可部分恢复老化损失的性能。

## 2.4 MRC 和 ZF 接收方法对接收性能的影响

最大信噪比合并 (MRC, maximum ratio combining) 接收通过最大化目标用户信号功率来提升接收信干噪比, 其接收向量与目标信道共轭对齐。第  $k$  个用户的 MRC 检测向量为:

$$\mathbf{v}_k = \hat{\mathbf{h}}_k \quad (8)$$

则接收 SINR 为:

$$SINR_k = \frac{p_k |\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{h}_k|^2}{\left( \sum_{i \neq k} p_i |\mathbf{w}_i^H \mathbf{h}_k|^2 + \sigma^2 |\hat{\mathbf{h}}_k|^2 \right)} \quad (9)$$

在 LoS 增强条件下, MRC 能获得较大的阵列增益, 但该方法未考虑对其他用户的干扰抑制, 当多用户信道方向接近时, 干扰项将显著上升。

零迫 (ZF, zero-forcing) 接收通过迫零准则消除用户间干扰, 即接收向量满足  $\mathbf{W}^H \mathbf{H} = \mathbf{I}$  的条件, 其中  $\mathbf{W}$  为检测矩阵,  $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K]$  为信道矩阵。

第  $k$  个用户的 ZF 检测向量为:

$$\mathbf{w}_k = \mathbf{e}_k^T (\hat{\mathbf{H}}^H \hat{\mathbf{H}})^{-1} \hat{\mathbf{H}}^H \quad (10)$$

当 CSI 准确时接收 SINR 为:

$$SINR_k = \frac{p_k}{\sigma^2 [(\hat{\mathbf{H}}^H \hat{\mathbf{H}})^{-1}]_{kk}} \quad (11)$$

即此时 ZF 能完全消除多用户干扰, 性能优于 MRC。然而, ZF 对 CSI 误差更为敏感, 基于过时 CSI 构造的迫零向量无法准确消除当前信道的用户间干扰, 不仅干扰抑制能力退化, 还可能因向量范数放大效应导致噪声增强, 此时性能可能低于 MRC。

## 3 仿真性能分析

在前文系统建模与低空信道特征分析的基础上, 本章结合典型低空上行场景, 对 Massive MIMO 系统性能进行数值分析。重点考察 LoS 强度、用户空间分布以及信道时变特性对上行频谱效率的影响, 并比较不同接收方式在低空场景中的性能差异。

### 3.1 仿真参数设置

考虑单小区低空上行场景, 基站配置  $M$  根接收天线, 同时服务  $K$  个低空用户。各用户在同一时频资源

块上进行上行传输,发射功率相同。基站采用 MRC 和 ZF 两种线性接收方式进行多用户检测。信道模型采用第 1 章建立的 Rician 衰落模型,其中 LoS 强度由 Rician 因子  $K_k$  表征,用户空间相关性由入射角分布刻画,信道时变性通过时间相关系数  $\rho_k$  描述。

除特别说明外,主要仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 主要仿真参数设置

| 参数          | 取值                           |
|-------------|------------------------------|
| 场景          | 单小区上行                        |
| 基站天线数       | 64~1 024(二维面阵)               |
| 用户数         | 64                           |
| 接收方式        | MRC,ZF                       |
| 信道模型        | Rician 衰落                    |
| Rician 因子   | 0~15 dB                      |
| 用户方位角度分布(°) | -30~30、-15~15 或 -5~5<br>均匀分布 |
| 用户俯仰角度分布(°) | 10~40 均匀分布                   |
| 时间相关系数      | 0.2~1                        |
| 用户发射功率      | 等功率                          |
| 噪声功率        | 归一化                          |
| 结果获取方式      | 蒙特卡洛平均                       |

3.2 低空信道下系统性能分析

图 1 给出了不同 Rician 因子条件下 64 用户频谱效率随基站天线数变化的结果,此时  $\rho_k$  取 0.9。作为参考,当  $K=0$  dB(纯瑞利衰落)时,系统性能退化为传统地面场景下的 Massive MIMO 基准<sup>[9]</sup>,与低空 LoS 增强情形形成对比。可以看出,随着  $M$  增加,用户频谱效率整体呈现上升趋势,说明在低空场景中,增加阵列规模能够带来稳定的接收增益。与此同时,较大的  $M$  对应更高的频谱效率,表明 LoS 分量增强后,信道能量更加集中,有利于提高相干合并效果。

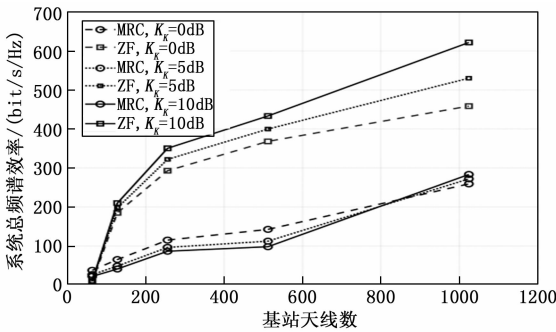


图 1 不同 Rician 因子下 64 用户频谱效率随基站天线数的变化

进一步观察可发现,当天线数较小时,不同  $K_k$  条件下的性能差异相对有限;随着阵列规模增大,各曲线之间的间隔逐渐拉开。这说明 LoS 增强带来的性能收益在较大阵列规模下更加明显,即基站能够更充分地利用低空信道中的方向性结构。

图 2 仿真分析了系统总频谱效率随方位角度间隔变化情况,其中用户数量固定设置为 64,天线数量设置为 128,时间相关系数取 1。图中现象与频分 MIMO 系统中用户空间分布对复用增益的影响规律一致<sup>[18]</sup>。随着用户角度间隔减小,系统总频谱效率明显下降,表明当多个低空用户在基站视角下方向逐渐接近时,用户间信道相关性增强,空间复用能力受到限制。相比于弱 LoS 场景,较强 LoS 条件下这一趋势更加突出,说明方向性增强会进一步放大用户空间接近所带来的干扰影响。同时可以看到 10 度和 30 度角度分布条件下随着 LoS 强度增大,64 用户总频谱效率呈下降趋势,这也表明 128 天线数量下波束宽度较大,64 用户在小角度区间分布时大 LoS 强度导致了用户间干扰增强,削弱了 Massive MIMO 的空间复用能力。

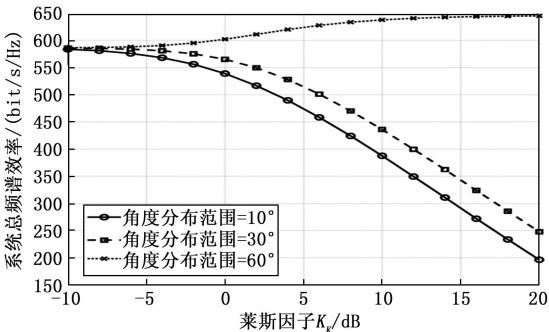


图 2 系统总频谱效率随用户角度间隔的变化

图 3 给出了不同时间相关系数下 64 用户频谱效率的变化情况。随着终端与基站的相对速度逐渐增大,逐渐减小,频谱效率持续下降,说明信道时变会削弱接收端对目标用户信号的有效合并能力。在较大阵列规模下,这种性能差异更加明显,即理想 CSI 条件下的阵列优势越大,CSI 失配带来的损失也越突出。

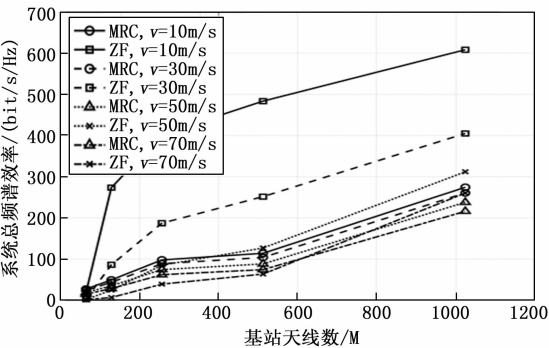


图 3 不同用户速度下 64 用户频谱效率随基站天线数的变化

综合分析图 1 和图 3 可见,当用户方向夹角大于基站阵列波束角,即低空用户在基站视角下方向较为分散时,ZF 接收性能与天线规模和 LoS 强度正相关,且天线规模越大,波束方向性越好,LoS 强度带来的频谱效率

收益越高, 但其对 CSI 老化适配更敏感。相对的 MRC 接收在天线规模较小时, 由于波束较宽, LoS 强度越高, 其他用户波束旁瓣的固定干扰越强, 频谱效率越低。随着天线规模不断增加, 波束逐渐收窄, 用户间干扰逐渐被抑制, LoS 强度的收益才逐步显现。不同于地面富散射环境, 在强 LoS 环境下由于用户之间波束固定干扰的存在, 随着天线规模增加并不能形成有利传播条件, 即使 CSI 老化严重 ZF 接收性能仍优于 MRC 接收。

3.3 综合场景分析

依据 LoS 强度、用户角度分布情况以及 CSI 老化程度设置 4 个典型低空场景, 场景条件如表 2 所示。用户数固定为 64, 天线数量固定为 128。

表 2 典型低空场景参数表

| 场景编号 | Rician 因子 /dB | 用户角度分布范围/(°)             | 时间相关系数 |
|------|---------------|--------------------------|--------|
| 1    | 10            | 方位-30°~30°<br>俯仰 10°~40° | 1      |
| 2    | 10            | 方位-5°~5°<br>俯仰 10°~40°   | 1      |
| 3    | 10            | 方位-30°~30°<br>俯仰 10°~40° | 0.7    |
| 4    | 5             | 方位-30°~30°<br>俯仰 10°~40° | 1      |

图 4 对不同场景条件下的系统总频谱效率进行了对比。可以看出, 在 LoS 较强、用户角度分散且 CSI 较新的条件下, 系统能够获得较高频谱效率; 而当用户方向集中或时间相关性降低时, 系统性能明显受限。相比之下, 单纯增强 LoS 分量并不能始终保证总频谱效率持续提升, 用户空间分布和信道时变特性对低空场景中的多用户性能同样具有重要影响。

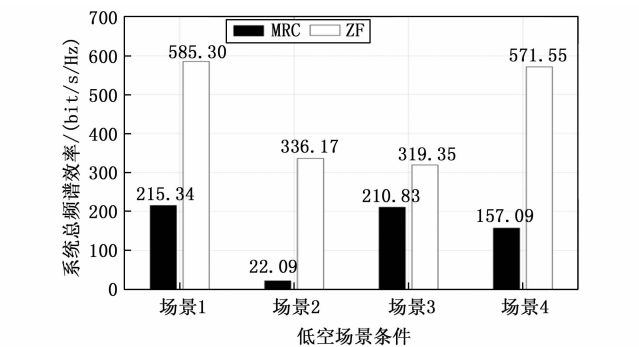


图 4 典型低空场景下系统总频谱效率对比

4 结束语

本文面向低空宽带上行业务场景, 研究了低空信道条件下 Massive MIMO 的适用性问题。针对低空用户视距传播概率高、空间分布具有三维特性以及信道时变性较强等特点, 建立了考虑 Rician 衰落、空间相关性和

CSI 老化效应的上行信道模型, 并分析了相关信道特征对阵列接收增益、多用户分离能力及系统总频谱效率的影响。

研究结果表明, LoS 增强有利于提升阵列接收增益, 但当用户方向集中时会增强信道相关性, 从而限制空间复用收益; 用户空间分布越分散, 系统多用户分离能力越强, 频谱效率越高; CSI 老化会显著降低系统接收性能, 且 ZF 对信道失配更为敏感, 但由于强 LoS 环境下用户间固定干扰存在, 有利传播条件不适用, MRC 难以趋近最优接收。总体来看, Massive MIMO 在低空宽带上行业务中具有应用潜力, 但其性能发挥受传播条件、用户空间分布和 CSI 获取能力等因素共同制约。

因此, 在低空通信网络设计中, 需要综合考虑 LoS 特性、用户调度、导频设计和信道跟踪等关键问题, 以更好发挥 Massive MIMO 的阵列增益和空间复用优势。

参考文献:

[1] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges [J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54 (5): 36-42.

[2] FOTOUHI A, QIANG H, DING M, et al. Survey on UAV cellular communications: practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21 (4): 3417-3442.

[3] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. A tutorial on UAVs for wireless networks: applications, challenges, and open problems [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21 (3): 2334-2360.

[4] ZHANG N, ZHANG S, YANG P, et al. Software defined space-air-ground integrated vehicular networks: challenges and solutions [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55 (7): 101-109.

[5] 3GPP TR 36.777. Study on enhanced LTE support for aerial vehicles [S]. 2017.

[6] ZHANG S, ZHANG H, DI B, et al. Cellular UAV-to-X communications: design and optimization for multi-UAV networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18 (2): 1346-1359.

[7] MARZETTA T L. Massive MIMO: an introduction [J]. Bell Labs Technical Journal, 2015, 20: 11-22.

[8] BJORNSON E, HOYDIS J, SANGUINETTI L. Massive MIMO networks: spectral, energy, and hardware efficiency [M]. Delft: Foundations and Trends in Signal Processing, 2017.

(下转第 273 页)