

# 面向6G动态场景的可移动去蜂窝网络覆盖性能分析



## Coverage Performance Analysis of Movable Cell-Free Networks for 6G Dynamic Scenarios

翟浩雅/ZHAI Haoya, 郑家康/ZHENG Jiakang,  
章嘉懿/ZHANG Jiayi, 艾渤/AI Bo

(北京交通大学, 中国 北京 100044)  
(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202501005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20250219.1611.006.html>

网络出版日期: 2025-02-20

收稿日期: 2024-12-20

**摘要:** 6G动态场景面临频繁切换、覆盖不均匀及信道快速变化等挑战,严重影响用户体验。去蜂窝网络通过分布式节点协作实现连续覆盖,可移动天线通过小尺度位移主动改变信道环境,两者已成为解决上述问题的使能技术。基于可移动去蜂窝网络系统,采用一种可实时调整天线辐射端口的可移动天线架构,通过动态适配机制以适应网络立体覆盖与高动态需求。通过构建信道相关性模型,表征移动速度对系统性能的影响机理,分析用户中断概率及网络中断速率的准确表达式,评估不同系统参数下的覆盖性能,并推导中断概率的近似闭式表达式,为6G移动通信技术的研究和工程实践提供参考。

**关键词:** 6G移动通信; 去蜂窝大规模MIMO; 可移动天线; 网络中断速率

**Abstract:** The sixth-generation dynamic scenarios face challenges such as frequent handovers, uneven coverage, and rapid channel variations, which severely affect the user experience. The cell-free network achieves continuous coverage through the cooperation of distributed nodes, and the movable antenna actively changes the channel environment via small-scale displacements, both of which have become enabling technologies to solve the above problems. This paper is based on the movable cell-free network system and adopts a movable antenna architecture that can adjust the antenna radiation ports in real time. It adapts to the requirements of network three-dimensional coverage and high dynamics through a dynamic adaptation mechanism. By constructing a channel correlation model, the influence mechanism of moving speed on system performance is characterized, the accurate expressions of user outage probability and network outage rate are analyzed, the coverage performance under different system parameter settings is evaluated, and the approximate closed-form expression of outage probability is derived, which provides a reference for the research and engineering practice in the field of 6G mobile communication.

**Keywords:** sixth-generation mobile communication; cell-free massive MIMO; movable antenna; network outage rate

**引用格式:** 翟浩雅, 郑家康, 章嘉懿, 等. 面向6G动态场景的可移动去蜂窝网络覆盖性能分析 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 20-27. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501005

**Citation:** ZHAI H Y, ZHENG J K, ZHANG J Y, et al. Coverage performance analysis of movable cell-free networks for 6G dynamic scenarios [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(1): 20-27. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501005

在迈向6G移动通信全场景无缝覆盖以及广域覆盖连续性<sup>[1]</sup>的进程中,未来6G通信网络将深度融合地面与非地面通信网络,以拓展其覆盖范围并提升性能<sup>[2]</sup>。通过构建以蜂窝网络为核心的多维立体覆盖网络架构,6G网络的服务边界将不断延伸。6G网络可为各类用户群体提供服务,

实现全球立体覆盖的目标。然而,由于移动通信网络覆盖技术和建设成本的限制,目前网络覆盖范围仍然有限。此外,在动态场景下,6G网络还面临频繁切换、覆盖不均及信道快速变化的问题,现有基于相对稳定信道的通信技术难以确保通信业务的质量<sup>[3]</sup>。

去蜂窝大规模多输入多输出(CF-mMIMO)系统<sup>[4]</sup>通过分布式部署大量接入点(AP),拉近AP与用户(UE)的距离,并由此带来宏分集增益。此外,相比于传统的蜂窝基站

**基金项目:** 北京交通大学人才基金项目(2024XKRC085); 中国博士后科学基金项目(2024M760195); 中兴通讯产学研合作项目(IA20240709018)

部署, 分布式AP能够改善网络边缘用户性能, 扩大网络覆盖范围。CF-mMIMO系统凭借其架构与技术优势, 能够实现高速移动场景下的无缝切换, 在移动场景中高效处理干扰并减少切换频次<sup>[5]</sup>。可移动天线作为一种新兴的天线构型, 通过动态调整天线的位置和方向, 在小范围位移内主动选择最佳信道环境, 从而改善信道衰落问题, 有效提升移动通信网络容量。在配置固定天线的CF-mMIMO系统中, 受限于固定天线的方向恒定, 系统无法始终对准最佳的信号传输方向, 导致信号强度减弱、传输速率降低以及误码率上升等问题, 限制了CF-mMIMO的系统性能。可移动去蜂窝网络<sup>[6]</sup>能够有效解决这些问题。在可移动蜂窝网络中, 可移动天线借助动态调整端口选择的方式, 实现系统信道重构, 从而提升系统的灵活性和通信性能。端口选择技术<sup>[7]</sup>的核心在于从大量预设位置中选择一个最佳位置放置辐射单元, 使得天线指向干扰源信道包络与深衰落空间的叠加区域, 以获得空间分集增益, 满足移动通信高质量需求。在网络容量方面, 该系统可有效支持数十或数百个高速移动用户, 提升天线效率并增强通信系统灵活性<sup>[8]</sup>。

目前针对CF-mMIMO系统中可移动天线的研究仍处于初步阶段。LYAEE等首次提出使用可移动天线来提升CF-mMIMO系统的性能<sup>[9]</sup>, 并提供了仿真验证。SHI等创新性地构建了一种六维可移动天线辅助的CF-mMIMO系统<sup>[10]</sup>, 在应对用户空间分布更为多样的场景中, 能够显著提升平均和速率。PI等则聚焦于六维可移动天线的多AP协调系统<sup>[11]</sup>, 通过优化天线位置和方向来提高网络的覆盖范围和干扰抑制能力, 并探讨利用统计信道状态信息设计离线方案的可能性。GUAN等提出在AP处部署可移动天线<sup>[12]</sup>, 通过灵活调整位置以改善信道条件, 并提出一种交替优化框架, 提高了求解精度。HU等利用可移动天线阵列进行协作多点接收的无线通信<sup>[13]</sup>, 通过联合优化发射波束赋形和移动天线阵列的位置来最大化接收信噪比。然而, 目前尚无针对CF-mMIMO系统中用户移动速度的研究。

本文在可移动去蜂窝网络系统下, 采用了一种可实时调整天线辐射端口的可移动天线架构。首先, 基于静态场景下的模型构建全新的信道模型, 考虑到用户移动特性, 并针对行人、车辆、高铁、无人机等不同速度用户的综合建模需求, 构建时间相关系数, 表征用户移动速度在信道相关性方面的影响。其次, 基于构建的模型, 探究用户速度对中断概率的作用机制, 分析用户中断概率及平均网络中断速率准确表达式, 评估不同系统参数设定下的覆盖性能, 进而验证影响性能的关键参数。再次, 为降低计算复杂度, 对中断概率进行近似求解推导出闭式表达式。最后, 对比不同系统参数

下的近似效果, 探寻该表达式适用的最优系统条件。

### 1 系统模型

如图1所示, 考虑由 $L$ 个配置单根固定天线的AP、 $K$ 个配置单根可移动天线的UE共同构成的CF-mMIMO系统。所有AP通过前传链路与中央处理器(CPU)相连, 每个UE配备一个尺寸为 $W\lambda$ 、端口数量为 $N$ 的可移动天线, 其中 $W$ 为归一化天线尺寸,  $\lambda$ 为波长。假设 $L$ 个AP实现时频同步, 共同服务所有UE。UE的可移动性使得信道具有快速变化的特性, 此时通信被分成由时刻瞬间组成的资源块, 其中 $\tau_c$ 个可供信道使用。

本文主要针对下行信道展开分析。将由AP $l$ 发出, 由UE $k$ 的第 $n$ 个端口接收的信号写为:

$$r_{kl,n} = h_{kl,n} s_n + \underbrace{\sum_{\tilde{n} \neq n}^N h_{kl,\tilde{n}} s_{\tilde{n}}}_{\tilde{h}_{kl,n}} + \eta_{kl,n} \quad (1),$$

其中,  $s_n$  端口 $n$ 接收到的发射符号,  $s_{\tilde{n}}$ 表示端口 $\tilde{n}$ 接收到的发射符号, 且 $\tilde{n} \neq n$ ,  $h_{kl,n}$ 表示AP $l$ 到UE $k$ 在端口 $n$ 之间的衰落信道增益,  $\tilde{h}_{kl,n}$ 表示对端口 $n$ 的总干扰信号,  $\eta_{kl,n}$ 表示AP $l$ 到UE $k$ 在端口 $n$ 处间的零均值复加性高斯白噪声。

在移动通信的场景中, AP和UE之间的相对移动会导致传播环境的变化, 引发信道状态的改变。本文重点考虑多普勒效应对系统产生的影响。由于速度因素会导致信道相关系数的变化, 本文引入时间相关系数 $\rho_{kl}[m]$ 来表征这种相关性变化, 如公式(2)所示:

$$h_{kl}[m] = \rho_{kl}[m] \tilde{h}_{kl}[0] + \bar{\rho}_{kl}[m] h_{kl}[m] \quad (2),$$

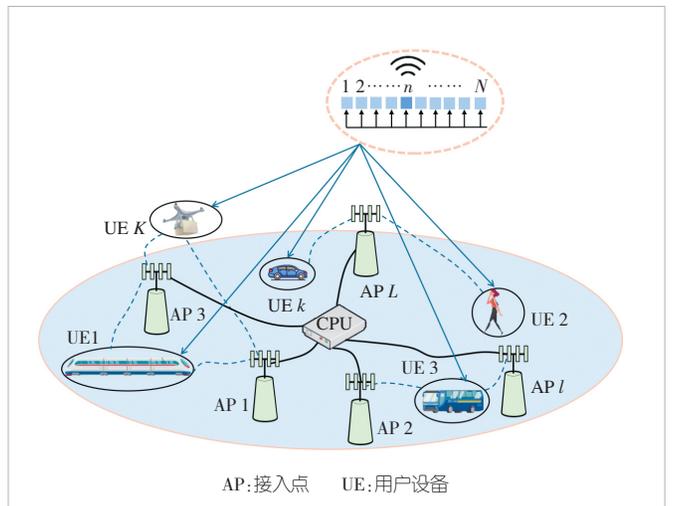


图1 可移动去蜂窝网络系统模型

其中,  $\rho_{kl}[m]$ 表示时刻0与 $m$ 的信道在实现UE  $k$ 和AP  $l$ 时的时间相关系数,  $\rho_{kl}[m] = J_0(2\pi f_{D,k} T_s m)$ ,  $J_0(\cdot)$ 是零阶贝塞尔函数,  $T_s$ 是采样时间,  $f_{D,k} = v_k f_c / c$ 是速度为 $v_k$ 的UE产生的多普勒频移, 其中 $f_c$ 是载频频率,  $c$ 是光速且数值为 $3 \times 10^8$  m/s.  $h_{kl}[0]$ 表示时刻0时信道的增益,  $h_{kl}[m]$ 表示 $m$ 时刻信道的增益,  $\bar{\rho}_{kl}[m] = \sqrt{1 - \rho_{kl}^2[m]}$ .

## 2 相关性分析

对于每个UE, 我们为其配置一个长度为 $W\lambda$ 的 $N$ 端口线性可移动天线, 即在天线上有均匀分布的 $N$ 个可切换的辐射单元. 可移动天线的端口位置可以沿天线移动, 图2描述了可移动天线的物理结构.

以第一个端口为参考, 则第 $n$ 个端口到第1个端口的距离表示为<sup>[14]</sup>:

$$\Delta d_{n,1} = \left( \frac{n-1}{N-1} \right) W\lambda, n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

本文定义最佳端口为能够使端口接收信号的信号干扰比(SIR)达到最大的端口<sup>[15]</sup>, 并选择最佳端口 $n^*$ 进行通信.  $n^*$ 定义为:

$$n^* = \arg \max_n \text{SIR}_n \equiv \arg \max_n \frac{|h_{kl,n}|^2}{|\tilde{h}_{kl,n}|^2} \quad (4)$$

每个AP给UE提供的信道是相互独立的, 将端口信道振幅 $|h_{kl,n}|$ 建模为瑞利分布的随机变量, 其概率密度为<sup>[14]</sup>:

$$p_{|h_{kl,n}|}(r) = re^{-\frac{r^2}{\sigma^2}} \quad (5)$$

$$E\left[|h_{kl,n}|^2\right] = \sigma^2 \quad (6)$$

通常在建模信道相关系数时, 我们会以第一个端口为参考, 如公式(7)所示:

$$h_{kl,n} = \sigma \left( \sqrt{1 - \mu_n^2} x_{kl,n} + \mu_n x_{00,n} \right) + j\sigma \left( \sqrt{1 - \mu_n^2} y_{kl,n} + \mu_n y_{00,n} \right) \quad (7)$$

$k = 1, 2, \dots, K; l = 1, 2, \dots, L$

其中 $x_{00,n}, \dots, x_{kl,n}, \dots, x_{KL,n}, y_{00,n}, \dots, y_{kl,n}, \dots, y_{KL,n}$ 都是独立的高斯随机变量, 均值为0, 方差为0.5. 参数 $\mu_n$ 用于表示端口 $n$ 上信道的相关性, 将 $\mu_n$ 表示为:

$$\mu_n = J_0\left(\frac{2\pi kW}{N-1}\right) \quad (8)$$

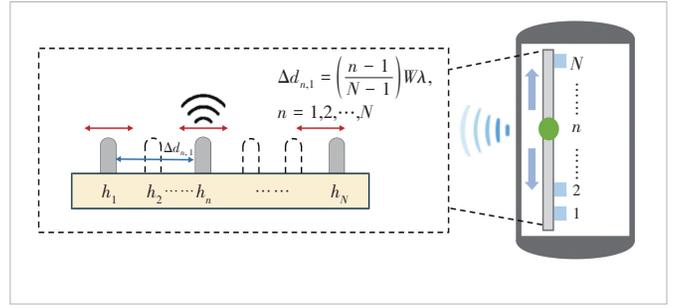


图2 可移动天线物理结构图

其中,  $W$ 是归一化天线尺寸,  $\mu_n$ 反映了端口 $n$ 和参考端口之间的相关性. 这里我们假设端口 $n$ 和参考端口之间的距离是 $nW\lambda/(N-1)$ .

尽管公式(8)能够有效地将空间相关性纳入端口建模, 但无法在没有参考端口的情况下建模任意两个端口间的相关性. 为了解决这一问题, 需要通过相关系数 $\mu_n$ 直接关联任意两个端口, 而无须指定参考端口.

将任意两个端口 $p$ 和 $q$  ( $p \neq q$ )之间的相关系数表示为:

$$\rho_{p,q} = \mu_p \mu_q = J_0\left(\frac{2\pi(p-q)W}{N-1}\right) \quad (9)$$

公式(9)表示距离为 $(p-q)W\lambda/(N-1)$ 的两个端口的空间相关性, 然而求出 $\mu_n$ 的解是不可实现的. 为简化运算, 假设所有端口对之间的相关性是均匀分布的. 在公式(9)中令 $\mu_p = \mu_q = \mu$ , 用相关系数平方的平均值 $\mu^2$ 代替任意两个端口间的相关系数, 无须使用参考端口.

$$\rho_{p,q} = \mu^2 = \left| \frac{2}{N(N-1)} \sum_{k=1}^{N-1} (N-k) J_0\left(\frac{2\pi kW}{N-1}\right) \right| \quad (10)$$

当 $N \rightarrow \infty$ 时, 将相关系数 $\mu$ 写为:

$$\mu = \sqrt{2} \sqrt{{}_1F_2\left(\frac{1}{2}; 1, \frac{3}{2}; -\pi^2 W^2\right) - \frac{J_1(2\pi W)}{2\pi W}} \approx \begin{cases} 1 - \frac{\pi^2 W^2}{12}, & W \leq 0.6 \\ \frac{1}{\sqrt{\pi W}}, & W \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

其中,  ${}_1F_b(\cdot; \cdot; \cdot)$ 为广义超几何函数,  $J_1(\cdot)$ 为第一类一阶贝塞尔函数. 经过上述计算, 可以确保对于归一化天线尺寸为 $W$ 的线性可移动天线具有相同的平均相关系数.

## 3 性能分析

中断概率<sup>[6]</sup>是指无线通信系统中接收信号质量低于某个给定阈值的概率. 较低的中断概率表征在更广泛范围内, 接

收信号的质量能够保持在可接受的水平，即表明系统具有较好的覆盖性能；反之，较高的中断概率会导致覆盖范围缩小。这是因为高中断概率意味着在更多区域内，信号质量难以达到阈值标准要求，无法保证可靠的通信，导致系统的有效覆盖区域缩减。

根据中断概率的含义，相关定义式可写为：

$$p_{\text{out}}(\gamma) = \text{Prob}(\text{SIR} = \max_k \text{SIR}_k < \gamma) \quad (12)$$

一般地，根据文献[16]和[17]，当SIR阈值为 $\gamma$ 时，UE的中断概率表示为：

$$p_{\text{out}}(\gamma) = \int_0^\infty e^{-z} \int_0^\infty e^{-t} \left[ 1 - \left[ Q_1 \left( \sqrt{\frac{2\mu^2 t}{(1-\mu^2)(a^2+1)}}, a \sqrt{\frac{2\mu^2 z}{(1-\mu^2)(a^2+1)}} \right) - \left( \frac{a^2}{a^2+1} \right) e^{-\frac{\mu^2(a^2 z + t)}{(1-\mu^2)(a^2+1)}} \times I_0 \left( \frac{2\mu^2 a \sqrt{zt}}{(1-\mu^2)(a^2+1)} \right) \right]^N \right] dt dz \quad (13)$$

其中， $Q_1(\cdot, \cdot)$ 是一阶 Marcum Q 函数， $a = \sqrt{(K-1)\gamma L}$ 。

为简化表达形式及方便后续近似求解，令

$$Z = Q_1 \left( \sqrt{\frac{2\mu^2 t}{(1-\mu^2)(a^2+1)}}, a \sqrt{\frac{2\mu^2 z}{(1-\mu^2)(a^2+1)}} \right) - \left( \frac{a^2}{a^2+1} \right) e^{-\frac{\mu^2(a^2 z + t)}{(1-\mu^2)(a^2+1)}} \times I_0 \left( \frac{2\mu^2 a \sqrt{zt}}{(1-\mu^2)(a^2+1)} \right) \quad (14)$$

将公式(14)代入公式(13)，则中断概率可简化写为：

$$p_{\text{out}}(\gamma) = \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-z} e^{-t} (1-Z)^N dt dz \quad (15)$$

平均网络中断速率是关于固定阈值 $\gamma$ 的函数，表示为<sup>[17]</sup>

$$C(\gamma) = K [1 - p_{\text{out}}(\gamma)] \log_2(1 + \gamma) \quad (16)$$

对于通信网络，根据公式(16)进行分析，一方面，如果 $\gamma$ 很小，每个UE的传输速率很低，整体网络速率 $C(\gamma)$ 会处于较低的水平；另一方面，如果 $\gamma$ 太大，大部分UE的SIR阈值无法达到 $\gamma$ ，导致通信中断的概率增大。当 $p_{\text{out}}(\gamma) \rightarrow 1$ 时，平均网络中断速率会很低，网络的可靠性也会降低，这导致无法有效保障通信服务的连续性与质量。因此，对于平均网络中断速率来说，应该有一个最优的 $\gamma$ 使得 $C(\gamma)$ 取得峰值。

实际计算 $C(\gamma)$ 时，信道的概率密度函数和累积分布函

数难以处理，计算复杂度高，需要消耗较多的计算资源，严重影响系统的运行效率。为降低计算复杂度，下面推导一种封闭表达式来近似 $C(\gamma)$ ，并将推导的近似结果用 $C'(\gamma)$ 表示。

中断概率是 $N$ 的递减函数，一般 $Z < 1$ ，对于一个较小的 $Z$ ，使用 $(1-Z)^N \approx 1 - NZ$ 进行线性化近似：

$$p_{\text{out}}(\gamma) = \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-z} e^{-t} (1 - NZ) dt dz \quad (17)$$

运用已知的数学定理(18—20)对公式(17)进行计算：

$$\int_0^\infty e^{-\alpha t} I_0(\beta \sqrt{t}) dt = \frac{1}{\alpha} e^{\frac{\beta^2}{4\alpha}}, \alpha, \beta > 0 \quad (18)$$

$$\int_0^\infty e^{-t} Q_1(\alpha \sqrt{t}, \beta) dt = Q_1 \left( 0, \frac{\sqrt{2} \beta}{\sqrt{\alpha^2 + 2}} \right) \quad (19)$$

$$\int_0^\infty e^{-t} Q_1(0, \alpha \sqrt{t}) dt = \frac{2}{\alpha^2 + 2} \quad (20)$$

在假设 $\mu$ 比较小的条件下， $\mu^2 \ll 1 - \mu^2$ 成立，可忽略 $N\mu^2/(a^2+1)$ 对结果的影响，并假设 $(K-1)\gamma \gg 1$ ，使用 $[\cdot]^+$ 保证结果的非负性，最终近似计算中断概率为：

$$p_{\text{out}}(\gamma) \approx \left[ 1 - \frac{N(1-\mu^2)}{a^2+1} - \frac{N\mu^2}{a^2+1} \right]^+ \quad (21)$$

将 $a^2 = (K-1)\gamma L$ 和公式(21)代入公式(16)中，求得近似的平均网络中断速率 $C'(\gamma)$ 为：

$$C'(\gamma) = \begin{cases} \frac{KN \left( 1 - \frac{1}{\pi W} \right)}{(K-1)\gamma} \log_2(1 + \gamma), & \gamma > \frac{N \left( 1 - \frac{1}{\pi W} \right)}{K-1} \\ K \log_2(1 + \gamma), & \gamma \leq \frac{N \left( 1 - \frac{1}{\pi W} \right)}{K-1} \end{cases} \quad (22)$$

平均网络中断速率的结果是关于SIR阈值 $\gamma$ 的函数，为求出 $C'(\gamma)$ 取最大值时对应的 $\gamma$ ，对 $C'(\gamma)$ 求 $\gamma$ 下的偏导数：

$$\frac{\partial C'(\gamma)}{\partial \gamma} = \begin{cases} C'_1(\gamma), & \gamma > \frac{N \left( 1 - \frac{1}{\pi W} \right)}{K-1} \\ \frac{K}{\ln 2(1 + \gamma)}, & \gamma \leq \frac{N \left( 1 - \frac{1}{\pi W} \right)}{K-1} \end{cases} \quad (23)$$

其中，

$$C'_i(\gamma) = \frac{K[1 - p_{out}(\gamma)]}{\ln 2(1 + \gamma)} - \frac{K \ln(1 + \gamma)}{\ln 2} \left[ \frac{\partial p_{out}(\gamma)}{\partial \gamma} \right] \quad (24),$$

$$\frac{\partial p_{out}(\gamma)}{\partial \gamma} = \frac{N \left(1 - \frac{1}{\pi W}\right)}{(K - 1)\gamma^2} \quad (25).$$

将公式 (25) 代入公式 (24) 中, 得到:

$$C'_i(\gamma) = \frac{KN \left(1 - \frac{1}{\pi W}\right)}{\ln 2(K - 1)\gamma} \left( \frac{1}{1 + \gamma} - \frac{\ln(1 + \gamma)}{\gamma} \right) < 0 \quad (26).$$

当  $\gamma > \frac{N \left(1 - \frac{1}{\pi W}\right)}{K - 1}$  时,  $C'_i(\gamma) < 0$ 。同时根据公式

$$(23), \gamma \leq \frac{N \left(1 - \frac{1}{\pi W}\right)}{K - 1} \text{ 时, } \frac{\partial C'_i(\gamma)}{\partial \gamma} = \frac{K}{\ln 2(1 + \gamma)} > 0。 \text{ 因此, } C(\gamma) \text{ 最大值出现在 } \gamma^* \text{ 处。}$$

$$\gamma^* = \frac{N \left(1 - \frac{1}{\pi W}\right)}{K - 1} \quad (27).$$

#### 4 仿真结果及讨论

实际上,  $C(\gamma)$  取决于多个参数因素, 如用户数量、AP 数量、可移动天线的长度和端口数量。为了验证这些参数因素如何影响  $C(\gamma)$ , 我们需要进一步仿真分析。这里我们假设信道模型为瑞利衰落信道。若无特别说明, 假设 AP 数量  $L = 50$ , 且 AP 采用均匀随机撒放方式, UE 数量  $K = 3$ , UE 移动速度  $v_k = 1 \text{ m/s}$ , 载波频率  $f_c = 0.25 \text{ GHz}$ , 则波长为  $\lambda = 1.2 \text{ m}$ 。可移动归一化天线尺寸  $W = 0.1$ , 天线尺寸为  $0.1\lambda = 12 \text{ cm}$ , 这些尺寸均符合移动设备的典型尺寸要求。此外, 可移动天线端口数  $N = 5$ 。假设在通信过程中, 可移动天线在每个时隙时快速切换到最佳端口  $n^*$ , 且几乎没有延迟。在本节中, 我们将提供仿真结果并分析系统性能。

图3探讨了不同UE移动速度下, 改变UE数量  $K$  与 AP 数量  $L$  对中断概率的影响。当UE速度为0时, 中断概率较小, 且在  $10^{-3}$  数量级。此时UE的通信状况几乎不受中断影响。随着UE速度的增加, 中断概率会迅速上升到  $10^{-1}$  量级, 之后在  $10^{-1} \sim 1$  之间持续增加, 表现出相对稳定的增大趋势, 并最终接近于1。此外, 在固定端口数和归一化天线尺寸的情况下, 保持  $L$  不变。随着  $K$  的增大, 中断概率会增大。相反, 在固定  $K$  的条件下, 增大  $L$  则会导致中断概率的降低。当天线尺寸  $L$  较大时, 天线端口之间的距离相对较大, 导致

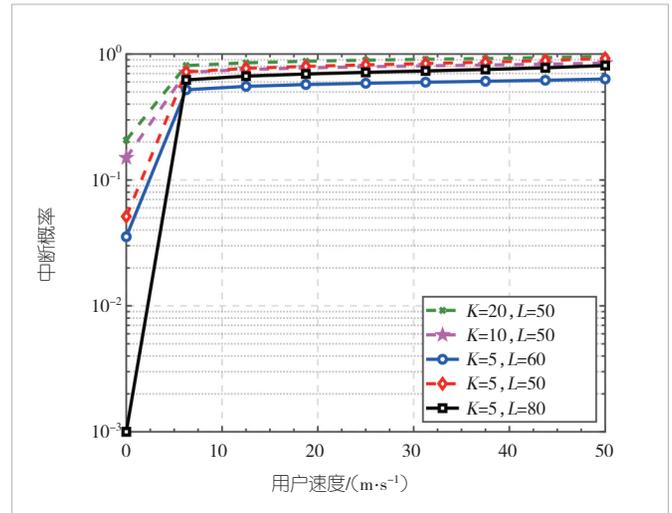


图3 不同速度下改变  $K$  和  $L$  对中断概率的影响

端口之间的空间相关性降低, 信号衰落更加独立。系统可以通过选择最佳端口来获得更好的信号质量, 从而降低中断概率。反之, 当  $L$  较小时, 端口之间的空间相关性较高, 信号衰落较为相似, 系统难以准确选择最佳通信端口, 中断概率会升高。值得一提的是, 减少  $K$  和增加  $L$  虽然都有助于提高系统的稳定性和可靠性, 但增大  $L$  对中断概率的改变程度大于增加  $K$  对中断概率的改变程度。这意味着在实际工程中, 提高 AP 的部署密度能够有效提高通信质量。另外, 用户移动速度对中断概率有显著影响, 尤其是在速度变化的初期阶段。而在高速情况下, 不同参数组合对中断概率的影响逐渐减小。此时用户移动速度成为影响系统性能的主要因素, 因此需要采取其他技术来降低中断概率, 保障通信质量。

图4和图5均考虑在不同SIR 阈值下的平均网络中断速率。图4描述了改变用户数量对平均网络中断速率的影响,

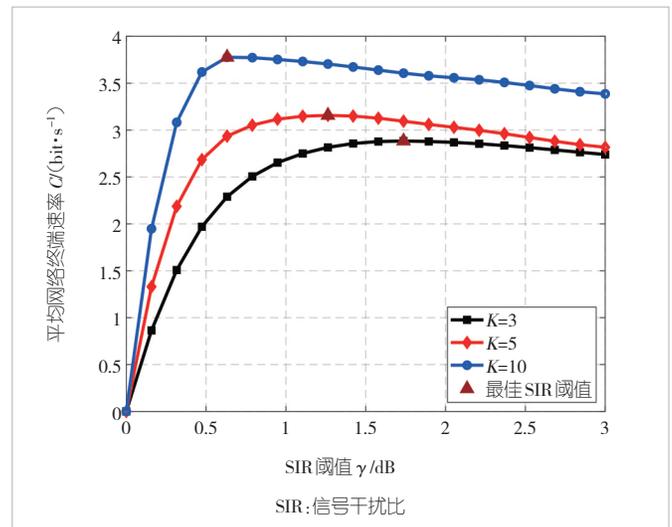


图4 改变  $K$  时系统相对 SIR 阈值的平均网络中断速率

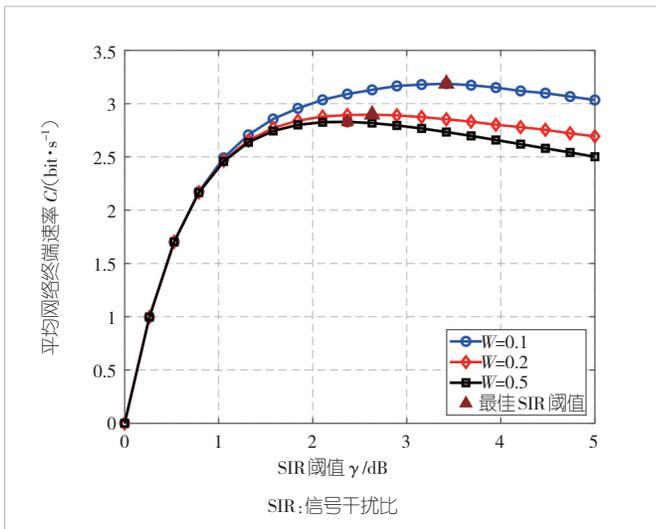


图5 改变W时系统相对于SIR阈值的平均网络中断速率

取  $K = 3, 5, 10$ ，红色三角形表示实际最佳SIR阈值  $\gamma^*$ 。对于每一根曲线来说，总体趋势均为先上升后下降，符合依据公式(16)所做的理论分析结果。因此，存在一个使平均网络中断速率达到峰值的点，对应的SIR阈值即为最佳阈值  $\gamma^*$ 。此外，随着UE数量  $K$  的增加，平均网络中断速率也随之增大，而  $\gamma^*$  却相应减小。在  $K$  取值从3增大到5时，其对平均网络中断速率的改变幅度，相较于从5增大到10时的改变幅度要小。在高SIR阈值水平时，这种增大所带来的改变程度还会进一步缩减。在UE数量增加的情况下，为了确保所有UE能够获得更优的通信质量，最佳SIR阈值  $\gamma^*$  需要适当降低。这种调整有助于在高用户密度的环境中，优化网络性能，提高覆盖性能，确保通信质量。

图5则描绘了在不同可移动归一化天线尺寸条件下，系统的平均网络中断速率水平。当归一化天线尺寸  $W = 0.1, 0.2, 0.5$  时， $f$  的取值分别为0.25、0.50、1.25 GHz。整体来看，图线也呈现出先上升后下降的变化趋势。随着  $W$  的增大，平均网络中断速率减小，并且  $W$  从0.1增大到0.2时  $C(\gamma)$  的增大幅度比  $W$  从0.2增大到0.5时更显著。结果表明，较小的天线尺寸对应较小的载波频率，这有助于提高中断速率，从而有助于提升系统的整体性能。此外，随着  $W$  的增加， $\gamma^*$  相应减小。因此，在归一化天线尺寸增大（即载波频率增大）时，合理地降低SIR阈值有助于提高系统性能。在设计、优化无线通信系统时，只有合理地设定SIR阈值和天线尺寸，才能在不同条件下使网络性能与覆盖效果达到最佳状态。

将本文公式(21)提出的闭式表达结果和公式(13)求得的中断概率结果分别代入公式(16)中，可分别求得近似

的平均网络中断速率  $C'(\gamma)$  和准确的平均网络中断速率  $C(\gamma)$ 。我们使用  $C'(\gamma)/C(\gamma)$  的比值结果来表现闭式表达式的准确性。比值越接近1，说明闭式表达式的结果与真实值越接近。从图6—8的结果可以看出，随着目标SIR的增大，比值结果逐渐升高，这表明近似效果在变好。这是因为，SIR阈值  $\gamma$  的升高可以更好地满足  $(K - 1)\gamma \gg 1$  的假设条件，使得闭式表达式结果更精准。

图6分析了不同可移动天线端口数  $N$  对结果的影响。随着端口数量的增加，近似效果下降。在进行近似计算的过程中，所需忽略的部分  $N\mu^2/(a^2 + 1)$  会增大。这对近似效果产生了干扰，使得近似结果与精确计算结果之间的偏差扩大，从而在整体上降低了近似的准确性。

图7考虑了不同可移动归一化天线尺寸  $W$  对于近似

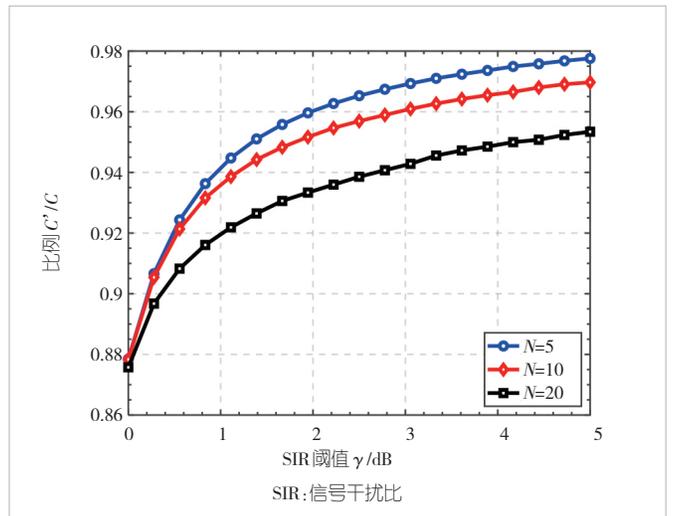


图6 不同N下C'(gamma)/C(gamma)相对于SIR阈值的结果

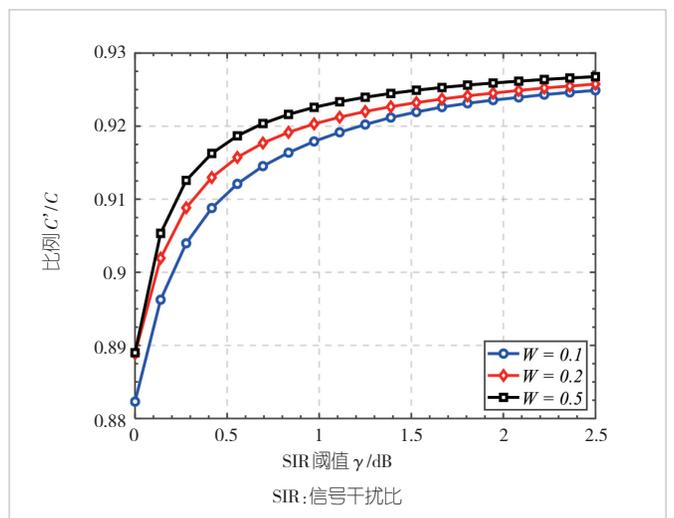


图7 不同W下C'(gamma)/C(gamma)相对于SIR阈值的结果

结果的影响。结果显示,随着天线尺寸的增大,端口间的距离会增大,相关系数 $\mu$ 会减小且更趋于满足近似条件 $\mu^2 \ll 1 - \mu^2$ ,近似效果最终得到改善。因此,闭式表达在大尺寸天线条件下具备更优的性能表现。

图8则分析了不同用户数量 $K$ 的影响。随着 $K$ 的增加,比例结果上升,近似效果变好。由于 $K$ 增大时,可以更好地满足 $(K-1)\gamma \gg 1$ 的假设条件,因此闭式表达式结果更精准。因此,合理选择阈值、天线端口数量与尺寸,以及用户数量,可以优化闭式表达的效果,从而更准确地预测系统性能,减少计算复杂度。

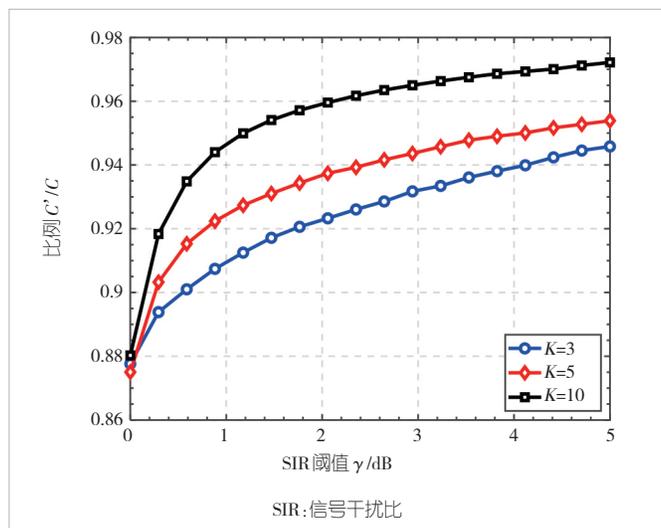


图8 不同 $K$ 下 $C'(\gamma)/C(\gamma)$ 相对于SIR阈值的结果

## 5 结束语

本文基于动态CF-mMIMO系统框架,构建了一种端口切换的可移动天线系统模型,通过改变系统的多个参数,将中断概率和平均网络中断速率作为性能指标,探究了不同参数对系统性能的影响。为降低计算复杂度,本文还推导了中断概率的近似闭式表达式,通过将闭式表达式与真实值进行比较,分析了不同场景下两者的接近程度,确定闭式表达适用的最佳场景。

仿真结果表明,用户移动速度对中断概率有显著影响,尤其是在速度变化的初期阶段。此外,减少用户数量、增加AP数量均有助于提升系统的稳定性与可靠性。当SIR阈值 $\gamma$ 增大,平均网络中断速率 $C(\gamma)$ 总体呈现出一种先上升后下降的趋势。对推导的闭式表达式的探究表明,在提高SIR阈值 $\gamma$ ,且端口数量相对较少、天线尺寸较大以及用户数量较多的情境下,闭式表达式所得到的结果展现出更高的准确

性,为系统的优化设计与性能评估提供了极具价值的理论依据与数据支撑。

## 参考文献

- [1] YANG B, LIANG X, LIU S N, et al. Intelligent 6G wireless network with multi-dimensional information perception [J]. ZTE communications, 2023, 21(2): 3-10. DOI: 10.12142/ZTECOM.202302002
- [2] WANG H L, SUN D S, SUN C Y, et al. A physical air-to-ground modeling method with dynamic investigations for integrated sensing and communication [J]. Journal of communications and networks, 2024, 26(5): 509-520. DOI: 10.23919/JCN.2024.000041
- [3] GHARODE D, NELLA A, RAJAGOPAL M. State-of-the-art design aspects of wearable, mobile, and flexible antennas for modern communication wireless systems [J]. International journal of communication systems, 2021, 34(15): e4934. DOI: 10.1002/dac.4934
- [4] BUZZI S, D'ANDREA C. User-centric communications versus cell-free massive MIMO for 5G cellular networks [EB/OL]. (2017-03-15) [2024-12-25]. [https://iris.unicas.it/bitstream/11580/67185/2/User-Centric\\_Communications\\_versus\\_Cell-free\\_Massive\\_MIMO\\_for\\_5G\\_Cellular\\_Networks.pdf](https://iris.unicas.it/bitstream/11580/67185/2/User-Centric_Communications_versus_Cell-free_Massive_MIMO_for_5G_Cellular_Networks.pdf)
- [5] BUZZI S, D'ANDREA C. Cell-free massive MIMO: user-centric approach [J]. IEEE wireless communications letters, 2017, 6(6): 706-709. DOI: 10.1109/LWC.2017.2734893
- [6] ZHU L P, MA W Y, ZHANG R. Movable antennas for wireless communication: opportunities and challenges [J]. IEEE communications magazine, 2024, 62(6): 114-120. DOI: 10.1109/MCOM.001.2300212
- [7] CHAI Z, WONG K K, TONG K F, et al. Port selection for fluid antenna systems [J]. IEEE communications letters, 2022, 26(5): 1180-1184. DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3152451
- [8] WONG K K, TONG K F, SHEN Y J, et al. Bruce Lee-inspired fluid antenna system: six research topics and the potentials for 6G [J]. Frontiers in communications and networks, 2022, 3: 853416. DOI: 10.3389/frcmn.2022.853416
- [9] OLYAEE M, BUZZI S. User-centric cell-free massive MIMO with access points empowered by fluid antennas [C]// Proceedings of IEEE 25th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2024: 666-670. DOI: 10.1109/SPAWC60668.2024.10694457
- [10] SHI X, SHAO X, ZHENG B, et al. 6DMA-aided cell-free massive MIMO communication [EB/OL]. (2024-12-02) [2024-12-10]. <https://arxiv.org/abs/2412.01270>
- [11] PI X Y, ZHU L P, MAO H B, et al. 6D movable antenna enhanced multi-access point coordination via position and orientation optimization [EB/OL]. (2024-12-14) [2024-12-25]. <https://arxiv.org/abs/2412.10736v1>
- [12] GUAN J Y, LYU B, LIU Y, et al. Secure transmission for movable antennas empowered cell-free symbiotic radio communications [C]// Proceedings of 16th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). IEEE, 2024: 578-584. DOI: 10.1109/WCSP62071.2024.10827177
- [13] HU G J, WU Q Q, OUYANG J, et al. Movable-antenna-array-enabled communications with CoMP reception [J]. IEEE communications letters, 2024, 28(4): 947-951. DOI: 10.1109/LCOMM.2024.3358762

- [14] WONG K K, SHOJAEIFARD A, TONG K F, et al. Fluid antenna systems [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(3): 1950–1962. DOI: 10.1109/TWC.2020.3037595
- [15] ZHU L P, MA W Y, NING B Y, et al. Movable-antenna enhanced multiuser communication via antenna position optimization [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(7): 7214–7229. DOI: 10.1109/TWC.2023.3338626
- [16] NEW W K, WONG K K, XU H, et al. Fluid antenna system: new insights on outage probability and diversity gain [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(1): 128–140. DOI: 10.1109/TWC.2023.3276245
- [17] WONG K K, TONG K F. Fluid antenna multiple access [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(7): 4801–4815. DOI: 10.1109/TWC.2021.3133410

作者简介



**翟浩雅**，北京交通大学在读硕士研究生；主要研究方向为大规模MIMO系统中的可移动天线技术。



**郑家康**，北京交通大学副教授；主要研究领域为多天线传输理论和关键技术；已发表论文30余篇，获美国授权专利1项。



**章嘉懿**，北京交通大学教授；主要研究领域为大规模MIMO基础理论和关键技术；先后主持和参加基金项目10余项，获得3项科研成果奖；已发表论文100余篇，获授权国家发明专利10余项。



**艾渤**，北京交通大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长，IEEE Fellow，IET Fellow，IEEE VTS杰出讲师，国家自然科学基金委创新群体负责人，国家杰青、优青，牛顿高级学者基金获得者，国家6G总体组专家，工信部5G AIA综合轨道交通工作组组长，中国电子学会智慧交通信息工程分会副主任兼秘书长，入选2020、2021、2022年全球前2%顶尖科学家；主要从事宽带移动通信和轨道交通专用移动通信的研究。