

基于随机几何的毫米波有限协作传输 覆盖性能分析*

武 帅¹, 姜 逸², 黄 威^{1,3}

(1. 内蒙古大学电子信息工程学院, 呼和浩特 010070; 2. 内蒙古大学计算机学院, 呼和浩特 010021;
3. 内蒙古自治区智慧通信感知与信号处理重点实验室, 呼和浩特 010070)

摘要:随着5G向6G演进,通信系统对超高吞吐量与海量连接能力的需求日益提升。凭借丰富的频谱资源,毫米波(Millimeter wave, mmWave)频段成为未来无线通信的重要技术方向。然而,毫米波网络存在传播损耗大、易受阻塞影响等问题,通常需要通过高密度基站部署来保障覆盖性能,这进一步加剧了小区间干扰。基站协作传输作为一种有效的干扰抑制与覆盖增强手段,在毫米波通信中具有重要应用前景。但由于毫米波信道中视距/非视距(Line of sight/Non-line of sight, LoS/NLoS)传播特性差异显著,面向该特性的协作传输机制设计及其性能分析仍需进一步研究。为此,基于随机几何理论,构建毫米波网络下的有限协作传输模型,系统分析协作策略对典型用户覆盖性能的影响。具体而言,推导了典型用户到服务基站(区分LoS和NLoS)的距离分布与关联概率,并通过对干扰信号进行拉普拉斯变换,得到了覆盖概率的闭合表达式。在此基础上,进一步分析了基站密度、协作阈值和虚拟小区半径等关键参数对系统覆盖性能的影响。

关键词:随机几何; 毫米波通信; 有限协作; 覆盖概率

中图分类号: TN928 **文献标志码:** A

毫米波(Millimeter wave, mmWave)是第五代移动通信及后续通信系统中的关键技术之一^[1]。然而,由于mmWave信号对阻塞高度敏感,其在视距/非视距(Line of sight/Non-line of sight, LoS/NLoS)条件下的路径损耗存在明显差异。为保障网络覆盖与服务质量,运营商通常需要密集部署mmWave基站(Base station, BS)^[2]。尽管该方法可有效提升网络覆盖能力,但同时也加剧了小区间干扰。基站协作被认为是缓解小区间干扰的有效手段之一,在该机制下,多个基站可对同一用户进行联合传输,将原本作为干扰的部分信号转化为有用信号,从而提升通信可靠性^[3]。以用户为中心的基站协作方案能够满足高流量需求并减弱小区边缘效应,在提升用户吞吐量和网络容量方面具有显著优势^[4-5]。

针对mmWave网络中的基站协作性能分析,现有研究主要围绕全协作机制展开,并可分为固定簇与自适应簇两类。固定簇方案通常假设用户与固定数量的基站协作接收信号,文献[6]针对异构网络,采用固定簇大小的协作机制,通过引入第 K 近微基站的平均距离,推导了关联概率、覆盖概率及能效的理论表达式,并表明最优协作簇大小随LoS概率和微基站密度的增加而增大。文献[7]对

* 收稿日期:2026-01-31; 修回日期:2026-03-30

基金项目:国家自然科学基金面上项目(62371264);国家自然科学基金项目(62561043);内蒙古自治区高校
青年科技人才发展项目(创新团队)(NMGIRT2503)

作者简介:武 帅(1999—),男,内蒙古鄂尔多斯人,2023级硕士研究生。E-mail:ws15849747746@163.com

通信作者:黄 威(1978—),女,内蒙古呼伦贝尔人,教授,硕士。主要从事无线通信及其应用、FPGA硬件加速研究。E-mail:huangwei@imu.edu.cn

固定距离、固定数量和自适应分簇3种基站协作的传输策略进行了统一分析,分别推导了3种协作方案的覆盖概率和局部平均延迟的表达式,结果表明天线单元结构对不同协作方案的网络性能具有显著影响,且在不同基站密度条件下,各协作方案的适用性存在差异。相比之下,自适应簇方案依据网络状态和信道条件动态选择服务基站,从而能够更灵活地适应网络负载变化,提升系统整体性能^[8]。针对无人机辅助的异构网络,文献[9]研究了灵活的用户关联与协作策略。尽管全协作模型在提升网络性能方面具有显著优势,但其计算复杂度高、资源消耗大,限制了实际部署。此外,从用户性能收益的角度来看,随着协作基站数量增加,系统性能增益会逐渐趋于饱和,因此有必要对协作规模进行合理限制。相关研究表明,有限协作模式可有效降低信道状态信息反馈、回程链路负载和信令开销^[10-12]。

综上,本文对以用户为中心分簇中mmWave通信模式进行性能分析,主要贡献有:

1) 提出了一个基于随机几何的mmWave密集网络有限协作性能分析架构。根据虚拟小区内基站数量来决定小区类型,并通过比较相邻基站的路径损耗比值与协作阈值判断是否协作。不同于传统的全协作模型,该框架能够综合考虑基站密度和协作阈值等多个网络参数,并支持对协作规模的动态调整。

2) 系统推导了mmWave通信协作场景下的多个关键性能指标,包括服务基站距离分布、用户关联概率和覆盖概率的理论表达式。分析了虚拟小区半径、基站密度、协作阈值和信干噪比阈值等网络参数对用户关联概率和覆盖概率的影响。

3) 通过蒙特卡洛仿真实验验证了理论和系统建模的有效性,并确认了协作方案在mmWave密集网络中的适用性。结果表明,协作簇内基站数量、大尺度衰落模型会显著影响用户覆盖概率。

1 系统模型

1.1 网络与信道模型

如图1所示,考虑一个mmWave密集网络的下行链路,其中基站被建模为有限齐次泊松点过程,表示为 Φ_b ,其密度为 λ_b 。基站由近到远依次可表示为 $C = \{BS_1, BS_2, \dots, BS_n\}$ 。不失一般性,根据Slivnyak定理,假设典型用户位于原点,以其为圆心,以 R 为半径构建虚拟小区,在虚拟小区中选择为用户服务的基站。 $\mathcal{B}$ 表示虚拟小区,其中基站数量为 $N(\mathcal{B})$,虚拟小区内基站集合记为 Φ_c ,协作基站集合记为 Φ_s ($\Phi_s \in \Phi_c$)。 R 作为可调参数,与基站密度联合控制着虚拟小区内基站的数量。每个用户都由一个传输相同数据的协作基站簇提供服务。

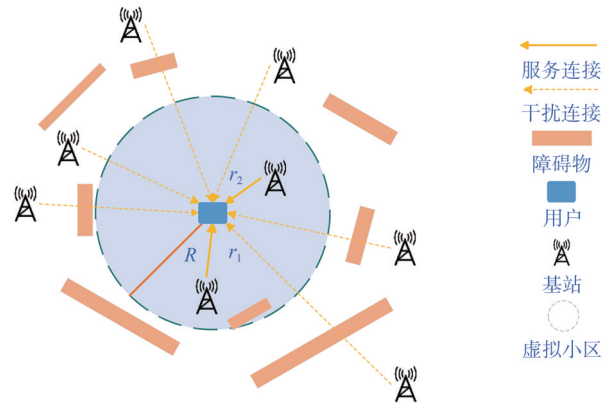


图1 系统模型

Fig. 1 System model

利用Nakagami- m 衰落模型刻画小尺度衰落,即 $h_i \sim \Gamma(m_v, 1/m_v)$, $v \in \{L, N\}$, m_L 和 m_N 分别是LoS和NLoS传输的Nakagami- m 参数。小尺度信道增益 h_i 的概率密度函数(Probability density function, PDF)为

$$f_{h_i}(x) = \frac{m_v^{m_v}}{\Gamma(m_v)} x^{m_v-1} e^{-m_v x}, x > 0,$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 为Gamma函数。

对于典型用户来说,记 Φ_L 为LoS基站点过程, Φ_N 为NLoS基站点过程, $\Phi_N = \Phi_b \setminus \Phi_L$ 。给定一个长度为 r 的链路,路径损耗可以建模为

$$L(r) = \begin{cases} r^{-\alpha_L}, & \text{LoS链路} \\ r^{-\alpha_N}, & \text{NLoS链路} \end{cases},$$

其中, α_L 和 α_N 分别为 LoS 基站和 NLoS 基站的路径损耗指数。

1.2 分簇模型

根据虚拟小区内基站数量进行分类,如果 $\mathcal{B}$ 中的基站数量为 0,该区域被称为空小区(Void-cell, Void-C);如果 $\mathcal{B}$ 中基站数量为 1,该区域被称为单基站小区(Single-base station cell, SBS-C);如果 $\mathcal{B}$ 中基站数量大于或等于 2,该区域被称为多基站小区(Multi-base station cell, MBS-C)。这种分簇方案是将相邻基站间的路径损耗比与预设协作阈值相比,以判断备选基站是否参与协作,进而明确参与协作的基站数量。具体来说, MBS-C 分为第 n 个基站参与协作(Multi-base station cell with the n th BS cooperating, MBS-C_{C-n})和第 n 个基站不参与协作(Multi-base station cell without the n th BS cooperating, MBS-C_{NC-n})。用 Type 表示虚拟小区的小区类型,根据虚拟小区内基站数量和相邻节点的协作阈值对所设置的小区进行分类,具体表达式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Void-C}, N(\mathcal{B}) = 0 \\ \text{SBS-C}, N(\mathcal{B}) = 1 \\ \text{MBS-C}_{\text{NC-2}}, N(\mathcal{B}) \geq 2, \frac{L(r_1)}{L(r_2)} > \theta_1 \\ \text{MBS-C}_{\text{C-2}}, N(\mathcal{B}) \geq 2, \frac{L(r_1)}{L(r_2)} \leq \theta_1 \\ \dots \\ \text{MBS-C}_{\text{NC-}n}, N(\mathcal{B}) \geq n, \frac{L(r_1)}{L(r_2)} \leq \theta_1, \dots, \frac{L(r_{n-2})}{L(r_{n-1})} \leq \theta_{n-2}, \frac{L(r_{n-1})}{L(r_n)} > \theta_{n-1} \\ \text{MBS-C}_{\text{C-}n}, N(\mathcal{B}) \geq n, \frac{L(r_1)}{L(r_2)} \leq \theta_1, \dots, \frac{L(r_{n-2})}{L(r_{n-1})} \leq \theta_{n-2}, \frac{L(r_{n-1})}{L(r_n)} \leq \theta_{n-1} \end{array} \right.,$$

其中, $\theta_1, \dots, \theta_{n-2}, \theta_{n-1}$ 表示协作阈值。协作阈值用于调控协作簇规模:增大阈值会纳入更多基站,从而提升覆盖概率,但同时也会增加资源消耗,对于协作增益提升有限;减小阈值则减少协作基站数量,虽可降低开销,却可能削弱覆盖性能。因此,需动态调整阈值,以平衡性能提升与资源消耗。首先确定第 1 近基站为用户服务,当 $L(r_1)/L(r_2) \leq \theta_1$, 表明来自第 1 近基站的有用信号功率不足以满足用户服务质量,因此需要协作;当 $L(r_1)/L(r_2) > \theta_1$, 表明来自第 1 近基站的有用信号功率足以满足用户服务,则第 2 近基站就不为用户提供服务。如果第 2 近基站也为用户服务,则考虑第 3 近基站是否参与协作,以此类推。第 n 近基站则需要考虑前 $n-1$ 近基站是否参与协作,如果前 $n-1$ 近基站参与协作,判断第 $n-1$ 近基站和第 n 近基站的路径损耗比值是否小于等于预设协作阈值,满足该条件就参与协作,否则只有 $n-1$ 个基站参与协作。该分簇方法根据网络配置和用户信道条件(如路径损耗)对协作基站进行动态选择,使不同用户对应的协作簇规模具有一定差异性。与基于全局路径损耗比的传统分簇策略不同,本文以相邻基站之间的路径损耗比作为判据,从而实现更加局部化与自适应的协作范围划分。该策略能够更好地匹配 mmWave 信道对阻塞敏感的传播特性,在空间上形成信号强度逐渐衰减的紧凑协作簇,有效避免了弱链路参与协作所带来的性能损失及额外干扰。同时,该方法在以用户为中心的分簇框架下,通过链式纳入机制逐步扩展协作集合,在保证协作增益的同时控制系统开销,并提高后续理论分析的可处理性。协作阈值范围的选择在保证适当邻近基站参与协作以获得有效覆盖增益的同时,又能避免过多远端基站带来的资源浪费,是覆盖性能与系统开销的折中选择。表 1 给出相应的伪代码,用于说明协作判定的具体实现流程。

1.3 信噪比模型

假设所有基站都配备定向波束成形天线阵列,用户配备全向天线模型。基站的天线增益为

$$G(\varphi) = \begin{cases} G_1, & |\varphi| \leq \frac{\omega}{2\pi}, \\ G_2, & \text{其他} \end{cases}$$

其中, φ 是偏离视距方向的角度且 $\varphi \in [-\pi, \pi]$, ω 为半功率波束宽度, G_1 和 G_2 分别为主瓣和旁瓣的阵列增益。假设所有的服务基站都可以完美地估计信道衰落和到达角, 并能够相应地调整其天线转向方向, 以提供最大的天线增益 G_1 。而干扰基站的天线增益以概率 p_1 ($p_1 \in \{1, 2\}$) 随机选择, 当概率为 p_1 ($p_1 = \omega/2\pi$) 时, 天线增益为 G_1 , 当概率为 p_2 ($p_2 = 1 - \omega/2\pi$) 时, 天线增益为 G_2 。

表 1 基于虚拟小区基站数量的动态分簇算法

Table 1 Dynamic clustering algorithm based on the number of base stations in a virtual cell

基于虚拟小区基站数量的动态分簇算法	
输入: 协作阈值集合 $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$, 路径损耗集合 $L = \{L(r_1), L(r_2), \dots, L(r_n)\}$	
输出: 小区类型 Type, 协作基站集合 C	
1: $N \leftarrow \mathcal{B}$	// 统计虚拟小区内基站数量
2: if $N = 0$ then	
3: Type $\leftarrow$ 空小区 (Void-C)	
4: C $\leftarrow \emptyset$	
5: return Type, C	
6: end if	
7: if $N = 1$ then	
8: Type $\leftarrow$ 单基站小区 (SBS-C)	
9: C $\leftarrow \{BS_1\}$	
10: return Type, C	
11: end if	
12: // 多基站情况 ($N \geq 2$): 链式纳入第 2 近、第 3 近……第 n 近基站	
13: Type $\leftarrow$ 多基站小区 (MBS-C) // 初始类型	
14: // 将基站按路径损耗大小升序排序: $C = \{BS_1, BS_2, \dots, BS_n\}$	
15: C $\leftarrow \{BS_1\}$	// 第 1 近基站默认服务用户
16: for $i = 2$ to n do	// 依次检查第 2 近、第 3 近……第 n 近基站
17: if $L(r_{i-1})/L(r_i) \leq \theta_{i-1}$ then	// 核心条件: 相邻路径损耗比值 $\leq$ 预设协作阈值
18: C $\leftarrow C \cup \{BS_i\}$	// 满足 $\rightarrow$ 纳入协作
19: else	
20: break	// 不满足 $\rightarrow$ 停止, 后续基站均不协作
21: end if	
22: end for	
23: // ===== 协作/非协作的最终判定条件(关键步骤) =====	
24: if $C \geq 2$ then	
25: Type $\leftarrow$ 多基站协作小区 (MBS-C _{C-n})	
27: Type $\leftarrow$ 多基站非协作小区 (MBS-C _{NC-n})	
28: end if	
29: return Type, C	

典型用户接收到的信干噪比 (Signal-to-interference-plus-noise ratio, S_{INR}) 可表示为

$$S_{INR} = \frac{\sum_{k \in \Phi_s} G_1 h_k L(r_k)}{\sigma_s^2 + I_L + I_N} \quad (1)$$

其中, σ_s^2 表示在 mmWave 频段发送基站产生的热噪声, $I_L = \sum_{i \in \Phi_L \setminus \Phi_s} G(\varphi) h_i r_i^{-\alpha_L}$ 表示来自非协作 LoS 基站的总干扰, $I_N = \sum_{j \in \Phi_N} G(\varphi) h_j r_j^{-\alpha_N}$ 表示来自非协作 NLoS 基站的总干扰。

2 性能分析

2.1 关联概率

采用以用户为中心的分簇策略, 典型用户将关联前 n 个基站, 定义 $r_1 \leq r_2 \leq \dots \leq r_n \leq R$ 为所有服务基站到典型用户的距离, 并且假设除了服务基站外其余均为干扰基站。如图 2 所示, 类似于文献[2]和[13], 考虑采用阶跃函数近似一般的 LoS 概率函数。考虑堵塞模型为 LoS 球模型, 在该模型中, 固定半径 D 内的 LoS 概率函数为 $P_{\text{LoS}}(d) = 1 (\forall d \leq D)$, 其余则为 0。LoS 球模型也被证明更适合室外密集部署的场景, 可以捕捉 mmWave 网络中的堵塞效应。如果虚拟小区半径满足 $R \leq D$, 服务基站都位于 LoS 球内部, 因此可以假设服务基站都为 LoS 基站。总干扰分为两部分, 一部分来自位于 LoS 球和虚拟小区之间的基站产生的干扰, 即 $r_n \leq r \leq D$, 基站与典型用户之间的链路处于 LoS 状态; 另一部分来自 LoS 球外部基站所造成的干扰, 即 $r > D$, 干扰基站与典型用户之间的链路为 NLoS 状态。

虚拟小区中至少有 n 个基站和恰好有 n 个基站的概率表达式分别为

$$Q_{\geq n} = \Pr(\geq n, \pi R^2) = 1 - \sum_{i=0}^{n-1} \left([\lambda_b \pi R^2]^i e^{-\lambda_b \pi R^2} / i! \right),$$

$$Q_n = \Pr(n, \pi R^2) = \frac{[\lambda_b \pi R^2]^n e^{-\lambda_b \pi R^2}}{n!}.$$

服务基站到典型用户的距离满足 $r_1 \leq r_2 \leq \dots \leq r_n \leq R$, 在这种情况下, 考虑的服务基站都位于 LoS 球内部, 下面给出基站参与协作的概率。

给定虚拟小区内至少有 n 个基站, 则前 n 个基站参与协作的概率为

$$\Delta_{S-n} = \int_0^R \int_{r_n \theta_n^{-\frac{1}{\alpha_L}}}^{r_n} \dots \int_{r_2 \theta_1^{-\frac{1}{\alpha_L}}}^{r_2} f(r_1, \dots, r_n) dr_1 \dots dr_{n-1} dr_n.$$

第 n 个基站不为用户服务的概率为

$$\Delta_{S_N-n} = \int_0^R \int_0^{r_n \theta_n^{-\frac{1}{\alpha_L}}} \dots \int_{r_{n-1} \theta_{n-2}^{-\frac{1}{\alpha_L}}}^{r_{n-1}} f(r_1, \dots, r_n) dr_1 \dots dr_{n-1} dr_n,$$

其中, $f(r_1, \dots, r_n)$ 表示虚拟小区内至少有 n 个基站时, 前 n 近基站的联合距离分布为

$$f(r_1, \dots, r_n) = \frac{(2\lambda_b \pi)^n e^{-\lambda_b \pi r_n^2} r_1 \dots r_n}{Q_{\geq n}}.$$

2.2 服务基站的距离分布

空小区中没有基站, 因此不存在服务基站的距离分布。单基站小区中只有一个基站, 因此典型用户与其服务基站之间距离分布的概率密度函数为 $f_s(r_1) = 2r_1/R^2$ 。

根据第 n 个基站是否参与协作, 给出虚拟小区中第 n 近服务基站的距离分布的概率密度函数, 以及虚拟小区中第 n 近服务基站不参与协作, 而第 $n-1$ 近服务基站的距离分布的概率密度函数分别为

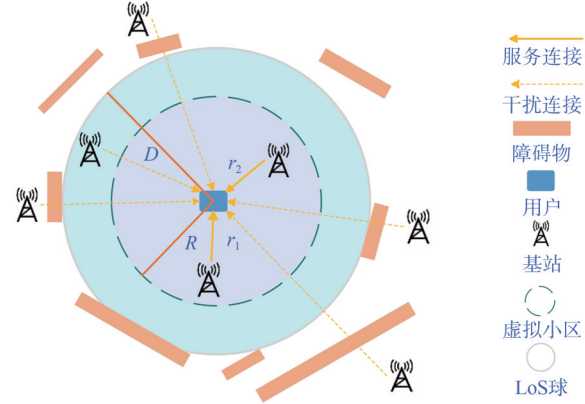


图2 系统场景

Fig. 2 System scenario

$$f_S(r_n) = \frac{\lambda_b^n \pi^n r_n^{2n-1}}{\Lambda_{S-n} \Gamma(n) Q_{\geq n} \exp(\pi \lambda_b r_n^2)},$$

$$f_{S_N}(r_{n-1}) = \frac{2\lambda_b^{n-1} \pi^{n-1} r_{n-1}^{2n-3} \Lambda_{S-(n-1)}}{\Gamma(n-1) Q_{\geq n} \Lambda_{S_N-n}} \left(e^{-\pi \lambda_b \theta_{n-1}^2 r_{n-1}^2} - e^{-\pi \lambda_b R^2} \right).$$

2.3 信号的拉普拉斯变换

在分析覆盖概率之前,首先给出信号和干扰的拉普拉斯变换表达式,假设式(1)重写为 $S_{INR} = S/(I + \sigma_s^2)$,其中 S 和 I 分别表示接收信号和总干扰。所有的协作基站都为 LoS 基站,则总接收功率可以写为 $S = \sum_{k=1}^n G_1 h_k r_k^{-\alpha_L}$,如果第 n 个基站不为用户服务,则总接收功率可以表示为 $S_N = \sum_{k=1}^{n-1} G_1 h_k r_k^{-\alpha_L}$ 。总干扰 $I = I_L + I_N$,其中 LoS 基站产生的干扰为 $I_L = \sum_{i \in \Phi_L \setminus \Phi_S} G(\varphi) h_i r_i^{-\alpha_L}$,NLoS 基站产生的干扰为 $I_N = \sum_{j \in \Phi_N} G(\varphi) h_j r_j^{-\alpha_N}$ 。

考虑不为用户服务的 LoS 基站和 NLoS 基站为干扰基站。在这种情况下,对于 S, S_N, I_L 和 I_N 的拉普拉斯变换 $\mathcal{L}_S(s), \mathcal{L}_{S_N}(s), \mathcal{L}_{I_L}(s)$ 和 $\mathcal{L}_{I_N}(s)$ 分别为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_S(s) &= \mathbb{E}_{h,r} \left(e^{-s \sum_{k=1}^n G_1 h_k r_k^{-\alpha_L}} \mid r_n \right) \\ &\stackrel{(a)}{=} \int_0^R f_S(r_n) \exp \left[-\lambda_b \int_{\mathbb{R}^2} 1 - \mathbb{E}_h \left(e^{-s G_1 h r^{-\alpha_L}} \right) dx dy \right] dr_n \\ &\stackrel{(b)}{=} \int_0^R f_S(r_n) \exp \left(-2\pi \lambda_b \int_0^{r_n} \left(1 - \mathbb{E}_h \left(e^{-s G_1 h r^{-\alpha_L}} \right) \right) r dr \right) dr_n \\ \mathcal{L}_{S_N}(s) &= \mathbb{E}_{h,r} \left(e^{-s \sum_{k=1}^{n-1} G_1 h_k r_k^{-\alpha_L}} \mid r_{n-1} \right) \\ &= \int_0^{r_n \theta_n^{-\frac{1}{\alpha_L}}} f_{S_N}(r_{n-1}) \exp \left[-\lambda_b \int_{\mathbb{R}^2} 1 - \mathbb{E}_h \left(e^{-s G_1 h r^{-\alpha_L}} \right) dx dy \right] dr_{n-1} \\ &= \int_0^{r_n \theta_n^{-\frac{1}{\alpha_L}}} f_{S_N}(r_{n-1}) \exp \left[-2\pi \lambda_b \int_0^{r_{n-1}} \left(1 - \mathbb{E}_h \left(e^{-s G_1 h r^{-\alpha_L}} \right) \right) r dr \right] dr_{n-1}, \\ \mathcal{L}_{I_L}(s) &= \mathbb{E}_{G,h,r} \left(e^{-s \sum_{i \in \Phi_L \setminus \Phi_S} G(\varphi) h_i r_i^{-\alpha_L}} \right) \\ &= \exp \left\{ -2\pi \lambda_b \sum_{t=1}^2 p_t \int_R^D \left[1 - \mathbb{E}_h \left(e^{-s G_t h r^{-\alpha_L}} \right) \right] r dr \right\} \\ &= \exp \left\{ -2\pi \lambda_b \sum_{t=1}^2 p_t \int_R^D \left[1 - \left(1 + s G_t r^{-\alpha_L} / m_L \right)^{-m_L} \right] r dr \right\}, \\ \mathcal{L}_{I_N}(s) &= \exp \left\{ -2\pi \lambda_b \sum_{t=1}^2 p_t \int_D^\infty \left[1 - \left(1 + s G_t r^{-\alpha_N} / m_N \right)^{-m_N} \right] r dr \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)为在虚拟小区中至少有 n 个基站,前 n 个基站为用户提供服务产生的信号功率的拉普拉斯变换,其中 $\mathbb{E}_h \left(e^{-s G_1 r^{-\alpha_L}} \right) = \left(1 + s G_1 r^{-\alpha_L} / m_L \right)^{-m_L}$,则①应用概率生成泛函,并且 h_k 独立同分布,有 $\mathbb{E}_{h_k} (f(h_k)) = \mathbb{E}_h (f(h))$;②将其转化到极坐标系下进行分析,然后交换积分。

在单基站小区中,最近基站信号功率的拉普拉斯变换为

$$\Delta_{F_1}(s) = \mathbb{E}_h \left(e^{-s G_1 h_1 r_1^{-\alpha_L}} \right) = \left(1 + \frac{s G_1 r_1^{-\alpha_L}}{m_L} \right)^{-m_L}.$$

2.4 覆盖概率

利用前面提到的分簇模型分别给出基站协作方案和非协作传输方案的覆盖概率的数学表达式。给定典型用户的 SINR 阈值 T , 覆盖概率定义为 $P_{\text{Cov}} = \Pr(S_{\text{INR}} \geq T)$ 。

由于空小区中没有基站, 则其覆盖概率为零。多基站小区以至少有两个基站为例, 单基站小区、多基站协作小区和多基站非协作小区的覆盖概率表达式分别为

$$\begin{aligned} P_{\text{SBS}} &= \int_0^R f_S(r_1) \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i T s \sigma_s^2} \mathcal{L}_{I_L}(2\pi i T s) \mathcal{L}_{I_N}(2\pi i T s) \frac{\Delta_{F_1} - 1}{2\pi i s} ds dr_1, \\ P_{S-n} &= \int_0^R f_S(r_n) \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i T s \sigma_s^2} \mathcal{L}_{I_L}(2\pi i T s) \mathcal{L}_{I_N}(2\pi i T s) \frac{\mathcal{L}_S(-2\pi i s) - 1}{2\pi i s} ds dr_n \\ P_{S_{N-n}} &= \int_0^R f_{S_N}(r_{n-1}) \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i T s \sigma_s^2} \mathcal{L}_{I_L}(2\pi i T s) \mathcal{L}_{I_N}(2\pi i T s) \frac{\mathcal{L}_{S_N}(-2\pi i s) - 1}{2\pi i s} ds dr_{n-1} \end{aligned} \quad (3)$$

在多基站小区中, 利用分簇模型来确定有多少个基站为用户服务, 如果前 n 个基站为用户提供服务, 则采用式(3); 如果第 n 个基站不为用户服务, 则只有前 $n-1$ 个基站为用户提供服务, 相应的信号的拉普拉斯变换也变为 $n-1$ 个基站协作。

根据全概率公式, 总覆盖概率的表达式为 $P_{\text{Cov-}n} = Q_0 P_0 + Q_1 P_{\text{SBS}} + Q_2 \Lambda_{S-2} P_{S-2} + Q_{\geq 2} \Lambda_{S_N-2} P_{S_N-2} + \dots + Q_{\geq n} \Lambda_{S-n} P_{S-n} + Q_{\geq n} \Lambda_{S_N-n} P_{S_N-n}$, 其中, P_0 是空小区覆盖概率。由于计算复杂度和数值仿真的难度, 这里只考虑至少有两个基站的情况, 则总覆盖概率为 $P_{\text{Cov-}2} = Q_0 P_0 + Q_1 P_{\text{SBS}} + Q_2 \Lambda_{S-2} P_{S-2} + Q_{\geq 2} \Lambda_{S_N-2} P_{S_N-2}$ 。

3 仿真分析

通过蒙特卡洛实验验证了本文方法理论推导的正确性, 分析了虚拟小区范围内网络参数以及决定相邻节点是否参与协作的协作阈值对覆盖概率的影响。在单基站小区中, 典型用户只与最近基站关联; 在有限协作方案中, 参与协作的基站个数由基站位置和协作阈值共同决定, 通过这种协作筛选机制可以避免簇内基站与用户距离过远而无法为用户提供有效服务的情况。仿真参数如表2所示。

表2 仿真参数值
Table 2 Simulation parameters

参数	参数值
Nakagami 参数 (m_L, m_N)	(3, 2)
LoS 和 NLoS 路径损耗指数 (α_L, α_N)	(2, 4)
基站天线阵列参数 (G_1, G_2, ω)	(20 dB, 0 dB, 30°)
基站密度 λ_b /(BSs/km ²)	10~100
平均 LoS 区域 D /m	200
虚拟小区半径 R /m	50~200
噪声功率 σ_s^2 /dBm	-94
协作阈值 θ /dB	1~20
仿真区域 B /km ²	4

虚拟小区半径和基站密度直接影响着虚拟小区内基站的数量和服务基站的距离分布, 并联合协作阈值共同决定用户的性能。图3(a)给出了不同虚拟小区半径下的关联概率变化情况(Sim 和 Theo 分别表示仿真和理论的实验结果)。设定 $\lambda_b = 86.3$ BSs/km², $\theta_1 = 10$ dB。当虚拟小区半径较小时, 空小区和单基站小区的概率较高, 而随着虚拟小区半径的增加, 这两类小区的概率逐渐下降, 多基站协作小区

的概率显著上升。这是由于随着虚拟小区半径的增加,虚拟小区内的候选基站增加。这表明适度扩大虚拟小区半径有助于增加协作基站数量,从而提高用户处于协作状态的概率。

图 3(b)给出了不同基站密度下的关联概率的变化情况。设定 $\theta_1 = 10$ dB, $R = 100$ m。结果显示,随着基站密度的增加,空小区和单基站小区的概率显著下降,而多基站协作小区的概率稳步上升,多基站非协作小区概率缓慢下降。这表明高密度部署能够提升用户接入协作服务的可能性,改善整体覆盖性能。但与此同时,基站密度的增加也会导致干扰水平上升。

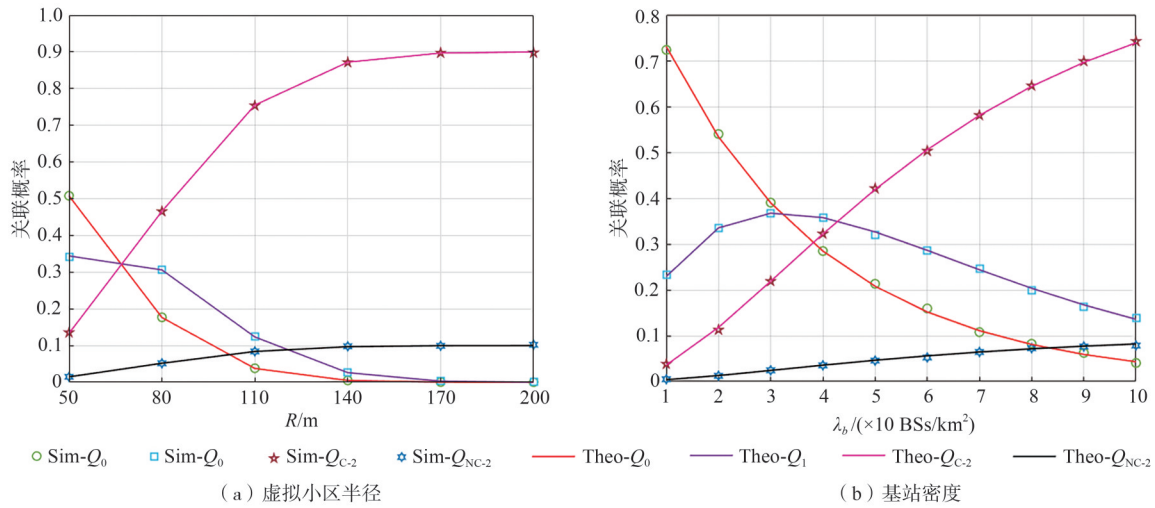


图 3 关联概率与虚拟小区半径和基站密度的关系
Fig. 3 Association probability versus cluster's radius and base station's density

图 4 展示了关联概率与协作阈值的关系。设定 $R = 100$ m, $\lambda_b = 86.3$ BSs/km²。随着协作阈值的增大,多基站协作小区的概率逐渐升高,而多基站非协作小区的概率则呈现明显下降趋势。与此同时,单基站小区和空小区的关联概率在整个阈值变化范围内基本保持不变。该结果表明,协作阈值在调节系统协作规模方面起着关键作用:较小的阈值限制了参与协作的基站数量,有助于降低系统资源消耗,但相应地会削弱协作带来的性能增益;而较大的阈值虽然能够显著提高多基站协作的发生概率,从而改善用户性能,但也会引入额外的信令开销和计算复杂度。

图 5 展示了覆盖概率随 SINR 阈值的变化情况。设定 $R = 100$ m, $D = 200$ m, $\lambda_b = 86.3$ BSs/km², $\theta_1 = 10$ dB。随着阈值的增加,覆盖概率逐渐下降。其中单基站小区的下降最为迅速,相比之下,多基站小区在整个阈值范围内均优于单基站小区,表现出明显的性能提升,特别是在中高阈值区间能够显著延缓覆盖概率的下降。多基站非协作小区在低阈值区间具有相对较高的覆盖概率,但随着阈值的增加,其性能逐渐下降,并且非协作小区覆盖概率比协作小区覆盖概率更高。这说明第 1 近基站已能够提供较强的服务信号,因此该类用户本身具有更有利的链路条件。相比之下,协作情形通常对应于仅依靠第 1 近基站难以满足性能要求、需要额外协作支持的用户。这是因为,尽管协作能够引入额外基站的信号支持,但第 2 近及更远基站由于路径损耗较大,其对有用信号的贡献通常较为有限,因此随着协作基站数量的增加,系统性能提升并不显著。

图 6 展示了覆盖概率与虚拟小区半径的关系。设定 $D = 200$ m, $\lambda_b = 86.3$ BSs/km², $T = 0, 10$ dB, $\theta_1 = 10$ dB。在低 SINR 阈值下覆盖概率都接近 1。随着虚拟小区半径增大,覆盖概率下降,但幅度不大。这是因为阈值较低时,用户只需要较小的 SINR 即可满足覆盖条件。在较高 SINR 阈值(10 dB)下,随着典型用户与基站的距离增加,多基站协作小区和多基站非协作小区的覆盖概率逐渐下降,对于单基站小区来说,在较高 SINR 阈值下,覆盖概率随虚拟小区半径 R 的变化呈现先下降后上升的趋势。其原因在于,当 R 较小时,用户通常能够与距离较近的服务基站建立连接,因此接收信号较强,

覆盖概率较高。随着虚拟小区半径 R 的增大,用户与最近服务基站之间的距离逐渐增加,有用信号功率下降,而此时干扰抑制效应尚不明显,导致 SINR 降低,覆盖概率随之下降。当 R 进一步增大并逐渐接近 LoS 球半径时,位于虚拟小区外但仍处于 LoS 球内的 LoS 干扰基站数量减少,从而使整体干扰水平下降,覆盖概率出现一定程度的回升。

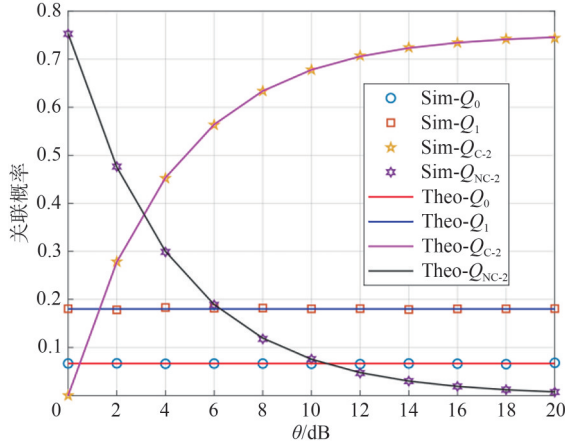


图4 关联概率与协作阈值的关系

Fig. 4 Association probability versus cooperation threshold

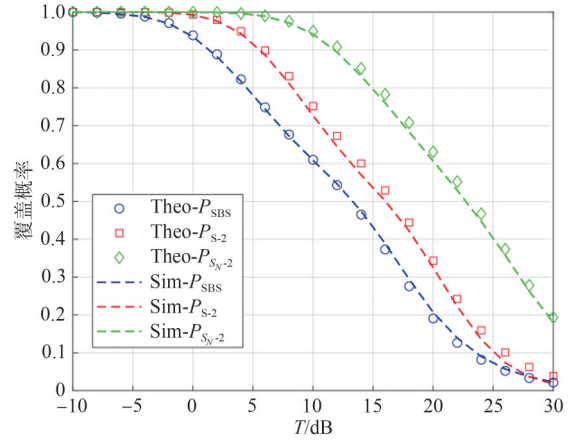
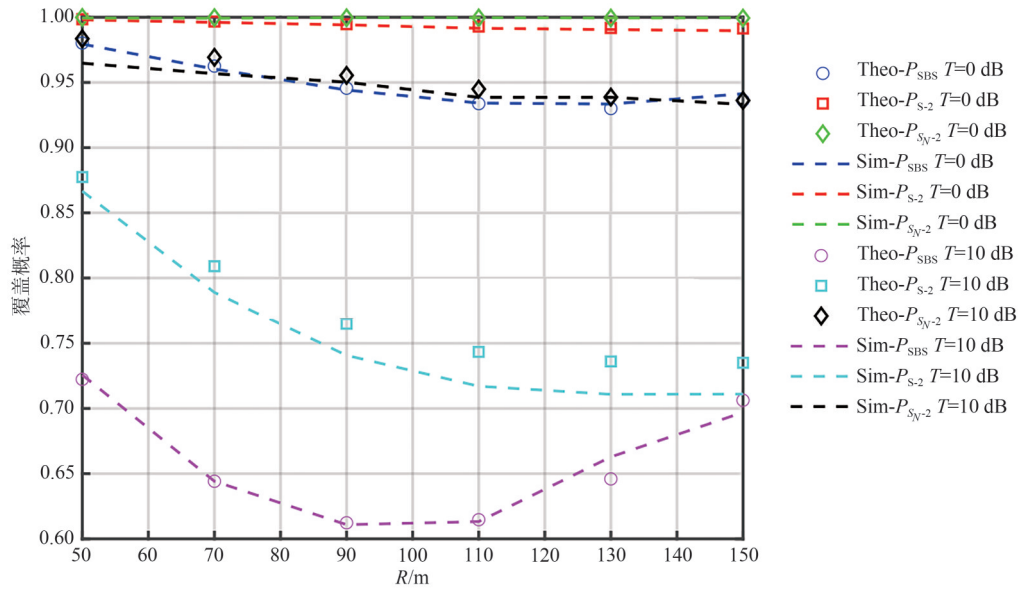
图5 覆盖概率与SINR阈值 T 的关系Fig. 5 Coverage probability versus T 

图6 覆盖概率与虚拟小区半径的关系

Fig. 6 Coverage probability versus the cell radius

图7展示了覆盖概率与协作阈值的关系。设定 $R = 100 \text{ m}$, $D = 200 \text{ m}$, $\lambda_b = 86.3 \text{ BSs/km}^2$, $T = 0, 10 \text{ dB}$ 。在低协作阈值下,单基站小区的覆盖概率 P_{sbs} 保持稳定,多基站协作小区的覆盖概率 $P_{\text{s-2}}$ 几乎不受协作阈值影响而维持较高值,多基站非协作小区的覆盖概率 $P_{\text{sN-2}}$ 随协作阈值增大逐渐上升并趋于饱和。这是因为在较低的正信干比阈值下,信号要求较低,多基站小区无论协作阈值如何变化都能保证覆盖概率接近于1。多基站非协作小区中,随着协作阈值增大,典型用户被判定为非协作,第1近基站信号本身就足够满足低门限,从而覆盖概率逐渐升高。在较高的正信干比阈值下,3类场景的覆盖概率整体明显降低。多基站协作小区覆盖概率仍然维持相对较高且稳定的状态,而多基站非协作小区覆盖概率则随协作阈值增大逐步提升,最后与多基站协作小区覆盖概率趋近,单基站覆盖概率则保持不变。

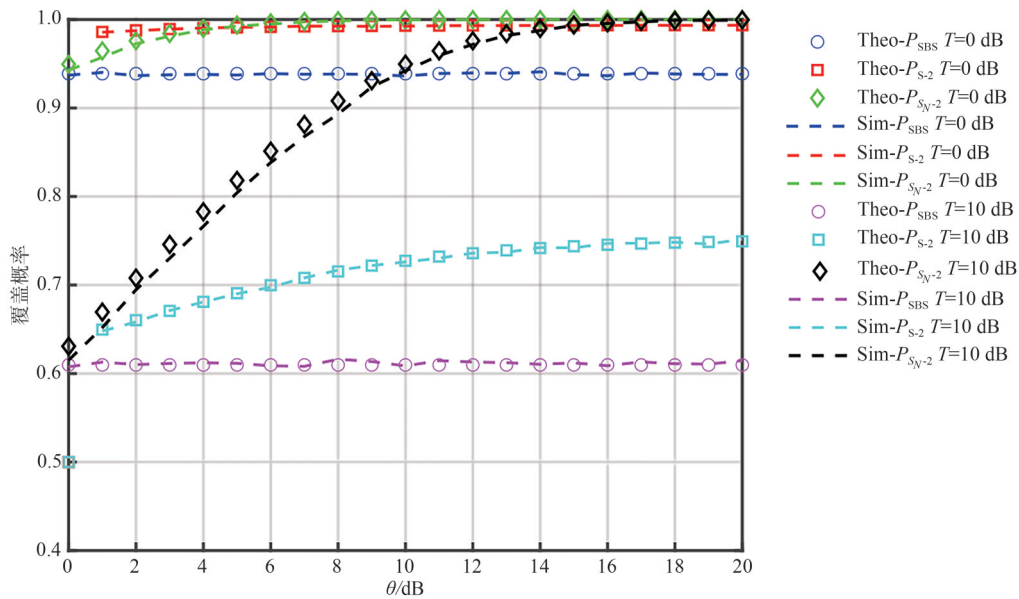


图7 覆盖概率与协作阈值的关系

Fig. 7 Coverage probability versus cooperation threshold

4 结语

围绕 mmWave 网络中基站密集部署所引发的小区干扰问题,研究了以用户为中心的有限协作的性能分析,并以典型用户覆盖概率为核心性能指标,对系统性能进行了理论分析与仿真验证。通过建立 mmWave 密集部署条件下的随机几何模型,系统刻画了 mmWave 网络中的用户关联行为和干扰特性,从而得到覆盖概率的解析表达式。通过仿真实验验证了理论推导的正确性,并分析了不同网络参数对用户性能的影响。结果表明,与单基站小区相比,多基站小区能显著提升系统覆盖性能。此外,小区内基站数量决定了用户与服务基站的距离分布,进而影响着小区类型和覆盖概率。

参考文献:

- [1] Moltchanov D, Sopin E, Begishev V, et al. A tutorial on mathematical modeling of 5G/6G millimeter wave and terahertz cellular systems[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(2): 1072-1116.
- [2] Humadi K, Trigui I, Zhu W P, et al. Dynamic base station clustering in user-centric mmWave networks: Performance analysis and optimization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(7): 4847-4861.
- [3] 刘超, 黄威. 基于 D2D 通信的用户模式选择性能研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2024, 55(3): 292-301.
- [4] Zhang C, Lu H, Chen C W. Caching optimization in user-centric networks: A stochastic geometry perspective[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(5): 8187-8200.
- [5] Chen Y, Haenggi M, Zhu Q, et al. Performance analysis of joint NOMA and JT-CoMP based on Stienen model[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2025, 24(6): 5114-5128.
- [6] Fang S, Chen G, Xu X, et al. Millimeter-wave coordinated beamforming enabled cooperative network: A stochastic geometry approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 69(2): 1068-1079.
- [7] Zhao J, Yang L, Xia M, et al. Unified analysis of coordinated multipoint transmissions in mm-Wave cellular networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 9(14): 12166-12180.
- [8] Humadi K, Trigui I, Zhu W P, et al. Simultaneous wireless information and power transfer in mmWave networks under user-centric base station clustering[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 22(3): 1823-1840.
- [9] Zhao C, Liu Y, Cai Y, et al. Non-orthogonal multiple access for UAV-aided heterogeneous networks: A stochastic

- geometry model[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 72(1):940-956.
- [10] Ammar H A, Adve R, Shahbazpanahi S, et al. Downlink resource allocation in multiuser cell-free MIMO networks with user-centric clustering[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 21(3):1482-1497.
- [11] Martín-Vega F J, Gómez G, Morales-Jiménez D, et al. Joint distribution of distance and angles in finite wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(10):13281-13297.
- [12] Jiang Y, Sun K, Huang W, et al. Performance analysis of user-centric clustering and limited cooperation in cell free architecture[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(7):4401-4413.
- [13] Armeniakos H K, Kanatas A G, Dhillon H S. Comprehensive analysis of maximum power association policy for cellular networks using distance and angular coordinates[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(9):12189-12205.

(责任编辑 孙 锴)

Stochastic Geometry-Based Coverage Analysis for Millimeter Wave Coordinated Transmission under Limited Cooperation

WU Shuai¹, JIANG Yi², HUANG Wei^{1,3}

(1. School of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China;

2. School of Computer Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China;

3. Inner Mongolia Key Laboratory of Intelligent Communication Sensing and Signal Processing, Hohhot 010070, China)

Abstract: With the evolution from 5G to 6G, wireless communication systems are facing ever-increasing demands for ultra-high throughput and massive connectivity. Owing to its abundant spectrum resources, the millimeter-wave band has emerged as a key enabling technology for future wireless communications. However, mmWave networks suffer from severe propagation loss and high sensitivity to blockage, and therefore usually rely on dense base station deployment to ensure coverage performance, which in turn aggravates inter-cell interference. As an effective approach for interference mitigation and coverage enhancement, cooperative transmission has shown great potential in mmWave communications. Nevertheless, due to the significant differences between line-of-sight (LoS) and non-line-of-sight (NLoS) propagation characteristics in mmWave channels, the design and performance analysis of cooperative transmission schemes tailored to such characteristics still require further investigation. To this end, a finite cooperative transmission model for mmWave networks based on stochastic geometry is developed and the impact of cooperative strategies on the coverage performance of a typical user is systematically investigated. Specifically, the distance distributions and association probabilities between the typical user and its serving base stations under both LoS and NLoS conditions are derived. Furthermore, by applying the Laplace transform to the aggregate interference, a closed-form expression for the coverage probability is obtained. Based on this, the effects of key system parameters, including base station density, cooperation threshold, and virtual cell radius, on the coverage performance are further analyzed.

Key words: stochastic geometry; millimeter-wave communication; limited cooperation; coverage probability