通过D2D辅助协作边缘缓存增强毫米波密集蜂窝网络

Wen Wu，*IEEE*学生会员，Ning Zhang，*IEEE*高级会员，Nan Cheng，*IEEE*会员，Yujie Tang，*IEEE*会员，Khalid Aldubaikhy，*IEEE*学生会员，以及Xuemin (Sherman) Shen，*IEEE*会士

arXiv:2301.01141v1 [eess.SY] 2 Jan 2023

摘要——**通过在小基站（SBS）中主动缓存热门内容，边缘缓存正成为降低内容检索时延、减轻超密集网络中回程链路巨大负担的最有前景的解决方案。然而，单个小基站的缓存资源受限，严重制约了边缘缓存的性能。本文针对毫米波密集网络提出一种**设备到设备（***D2D***）辅助协作边缘缓存（***DCEC***）**策略，协同利用邻近用户和小基站的缓存资源。在所提出的DCEC策略中，可根据内容流行度将内容缓存于用户设备或小基站中；用户则可通过D2D链路从邻近用户处，或通过蜂窝链路从邻近小基站处检索请求的内容，从而有效利用缓存多样性。不同于低频频段中需要采用复杂干扰管理技术来抑制干扰的现有协作缓存策略，我们利用毫米波系统中的定向天线，在确保高传输速率的同时减小干扰范围。考虑实际的定向天线模型和网络密度后，我们基于网络拓扑的随机信息，推导出回程卸载性能和内容检索时延的闭式表达式。此外，解析结果表明，随着网络密度增加，通过D2D链路检索内容的时延显著增加，而通过蜂窝链路检索内容的时延仅略有增加。全面的仿真验证了我们的理论分析，并表明与最先进的**最热门缓存（***MPC***）**策略相比，所提出的策略能够更有效地卸载回程流量并降低内容检索时延。**

索引词 **–D2D通信、协作边缘缓存、毫米波密集网络。**

I. 引言

随着虚拟现实、增强现实游戏和高清视频流等数据密集型无线应用日益普及，预计在可预见的未来，蜂窝网络的容量将面临巨大压力 [1], [2]。为满足无线数据流量激增的需求，毫米波（mmWave）通信作为当前5G网络事实上的候选技术，有望利用大范围频谱资源提供准有线无线连接服务 [3], [4]。借助高增益定向天线，当前毫米波网络可提供近 7 吉比特/秒的极高数据速率，预计在不久的将来将提升至 40 吉比特/秒。由于毫米波网络的传播特性不利于信号传输，网络还可进一步加密部署。在密集网络中部署不受限制的有线回传链路成本高昂，因此难以实现，并会导致回传拥塞。未来，缓解毫米波密集网络的回传压力至关重要。

边缘缓存利用移动应用中内容请求的重复模式，是实现这一目标的一种有效方案 [5], [6]。具体而言，可在非高峰时段将热门内容缓存到小基站（SBS）中，以便在高峰时段为邻近用户提供服务，这有望减少多达 35% 的回程流量[7]–[9]。此外，由于内容从边缘而非远程服务器获取，边缘缓存能够提供低时延服务。然而，单个小基站的缓存容量有限，因此边缘缓存的性能可能受到制约。要扩充缓存内容，一种直接的方法是以协作方式利用缓存资源，即采用协作缓存。协作缓存可分为两类：a) 协作边缘缓存，即将内容缓存在由多个邻近小基站组成的小基站集群中；b) 设备到设备（*D2D*）缓存，即将内容缓存在邻近用户的设备中。在协作边缘缓存中，小基站集群内的每个小基站缓存不同的内容，以提高缓存多样性并为用户提供服务；而在 D2D 缓存中，每个用户及其邻近用户缓存不同的内容，并通过高速 D2D通信交换缓存内容。

在毫米波密集网络中引入协作缓存，可以显著减轻回传负担并降低内容检索时延。此外，它还带来一项额外优势。在低频段系统中，协作缓存的性能受全向传输模式所导致的多用户干扰制约，而毫米波系统中的定向天线则能自然地解决干扰问题。然而，毫米波网络中的协作缓存也带来了新的挑战。目前尚无可处理的解析模型，能够综合考虑定向天线、网络密度和内容缓存对毫米波网络的影响。此外，这种难以处理的特性使得推导闭式表达式变得困难，也就难以为系统设计提供有价值的见解。

本文提出一种新颖的毫米波蜂窝网络协作缓存策略，该策略协同利用用户、其D2D对等节点以及邻近

W. Wu、N. Cheng、Y. Tang、A. Khalid 和 X. Shen 任职于滑铁卢大学电气与计算机工程系，地址：加拿大安大略省滑铁卢市，邮编 N2L 3G1（电子邮箱：{w77wu、n5cheng、y59tang、kaldubai、sshen}@uwaterloo.ca）。通讯作者：*Nan Cheng*。N. Zhang 任职于美国德克萨斯农工大学科珀斯克里斯蒂分校计算科学系（电子邮箱：ning.zhang@tamucc.edu）。

小基站的缓存资源。具体而言，根据内容检索时延缓存内容。由于内容检索时延较低，最热门的内容缓存在用户及其D2D对等节点中，而较不热门的内容则缓存在小基站集群中。基于这一设计的缓存策略，我们推导出回程卸载增益。此外，我们考虑了一种实用的毫米波定向天线模型，其中主瓣天线增益可变，且旁瓣天线增益非零，这使干扰分析更加复杂。利用网络拓扑的随机信息，我们从理论上分析了所提策略在毫米波系统中的平均内容检索时延。解析结果揭示了网络密度和实用定向天线对缓存性能的影响，而现有文献对此考虑不足。主要贡献总结如下：

- 本文提出并分析了一种D2D辅助协作边缘缓存（DCEC）策略，该策略协同利用用户和小基站的缓存资源，适用于毫米波密集网络。
- 基于网络拓扑的随机信息，我们推导了毫米波密集网络中回程卸载增益和内容检索时延的闭式表达式。
- 我们分别分析了网络密度和实际方向性天线对缓存性能的影响。解析结果表明，随着网络密度增加，通过D2D通信获取内容的检索时延显著增加，而通过蜂窝通信获取内容的检索时延仅略有增加。此外，解析结果表明，性能随方向性天线增益线性提升。
- 解析结果揭示了毫米波密集网络中传输效率与缓存多样性之间的权衡关系，并据此考察了最优小基站簇大小。

本文其余部分安排如下。第二节回顾相关研究，第三节介绍系统模型。随后，我们提出DCEC策略并分析其回程卸载增益。第五节分析所提策略的内容检索时延性能。第六节给出大量仿真结果。最后，第七节总结全文。

II. 文献综述

移动边缘计算（MEC）兼具计算与存储功能，可为附近的移动用户提供高质量的体验（QoE）。近期大量文献聚焦于 MEC 的计算功能 [10]–[12]。Rodrigues 等人提出了一种结合虚拟机迁移与发射功率控制的混合方法，旨在最大限度地降低服务时延 [10]。一项扩展研究以提高可扩展性为目标，对边缘服务器进行了重新配置 [11]。此外， [12] 的作者近期还联合优化了移动边缘网络中的计算与缓存资源，以实现效用最大化。

协作缓存通过协同利用 MEC 的存储功能，是提升 QoE 的另一种方法。文献中主要有两种方法：D2D缓存和协作边缘缓存。在微波频段，这两种缓存策略都已得到大量研究。首先，通过利用用户之间的缓存资源和高速 D2D通信， [13]–[15], D2D缓存能够卸载蜂窝流量、提高蜂窝传输速率并降低小基站的功耗。研究在 D2D缓存网络中推导出一条标度定律：在 D2D传输范围随网络密度调整这一不切实际的条件下，吞吐量会随着网络中节点数量的增加而提升 [16]。Wang 等人研究了移动场景下 D2D缓存的性能；在这些场景中，用户会频繁与邻近用户联系，通过 D2D通信交换内容 [17]。在 [18], 中，提出了三种适用于具有 D2D连接的边缘缓存的调度方案，这些方案能够以较低的复杂度最大化 D2D链路的吞吐量。其次，对于协作边缘缓存，研究利用 SBS 集群中的缓存资源来扩充缓存内容。Chen 等人首次提出一种协作缓存策略，在不同小基站中协同缓存较不热门内容的不同部分，以提高内容多样性，并揭示了传输多样性与内容多样性之间的权衡关系 [19]。为最大化协作边缘缓存的性能，研究对内容放置和缓存容量进行了优化。Zhang 等人通过优化内容放置研究时延最优问题，并提出一种贪心算法来优化协作边缘缓存策略中的内容放置 [20]。另一项研究则考虑异构网络中缓存部署的预算，对缓存容量优化问题进行了研究 [21]。近期研究 [22] 采用内存存储和处理来提升边缘缓存的能效。此外，作者最近在 [23] 中提出了一种基于内容流行度分布和用户偏好的协作缓存策略，该策略能够提高内容命中率并降低传输时延。此外，鉴于热门内容与用户位置高度相关，近期研究 [24]通过在线学习方法提出了一种位置感知缓存策略。

尽管这些研究颇有价值，但它们仅关注工作于微波频段的协作缓存策略，未考虑毫米波通信的能力。此外，多用户干扰给低频频段的协作缓存带来了挑战，在超密集网络中尤其如此。D2D缓存和协作边缘缓存都需要采用复杂的干扰管理技术（如功率控制和干扰对齐）来降低干扰 [20], [25]。然而，在毫米波系统中，这一挑战很容易得到解决，因为定向天线能够显著降低多用户干扰。针对毫米波频段缓存的研究十分有限。Semiari 等人提出了一种主动缓存策略，以减少移动毫米波网络中的切换失败 [26]。他们着重于利用设备缓存，并未考虑协作边缘缓存。Ji 等人首次在毫米波网络中采用 D2D缓存以提升网络性能 [27]。然而，文献 [27]未提供任何解析结果来表征 D2D缓存性能。随后，在一项最新研究 [28],

表 I 变量与符号说明。

符号	描述
$\mathcal{F}$	请求文件库
Φ_{BS}	小基站的泊松点过程
λ_{BS}	SBS密度
Φ_{UE}	用户的泊松点过程
λ_{UE}	用户密度
W	系统带宽
ϕ	带宽分配比例
α	路径损耗指数
K	SBS簇大小
r	物理距离
R	传输速率
σ^2	背景噪声功率
D	平均内容检索时延
S	信号功率
I	干扰功率
ξ	内容流行度偏斜
G	定向天线增益
F	回程卸载增益
h	内容命中率
$\mathcal{B}_o$	关联小基站

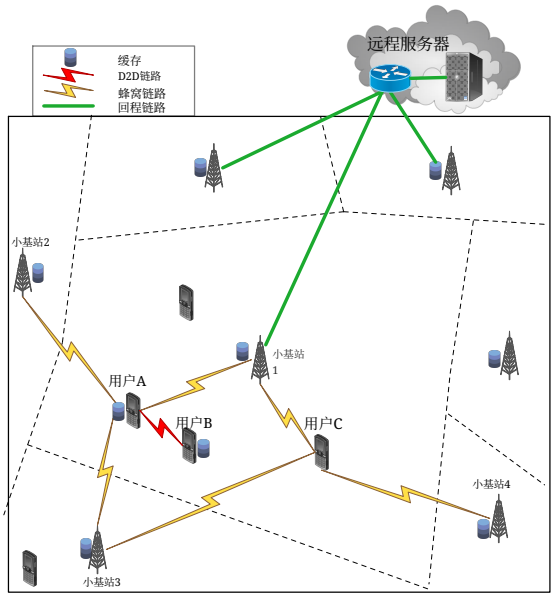


图1. 缓存使能边缘网络拓扑。

Giatsoglou 等人基于随机几何框架提出并分析了 D2D 缓存策略。然而，该缓存策略没有利用邻近小基站的缓存资源。此外，解析结果无法表征定向天线对毫米波通信的影响。文献 [27] 和 [28] 中的两种方案都仅在毫米波网络中采用 D2D缓存来卸载回传流量，却未考虑网络密度。此外，协作边缘缓存策略和实际的毫米波天线特性尚未得到研究，而它们可能对网络性能产生重大影响。

III. 系统模型

本节分别介绍网络模型、内容流行度模型、定向天线模型、毫米波信道模型和传输模型。重要符号汇总见表 I。

A. 网络模型

如图1所示，我们考虑一种缓存使能边缘网络，其中每个实体都可以缓存热门内容。小基站和用户在平面上分别遵循密度为λ_{BS} 和 λ_{UE}的齐次泊松点过程（泊松点过程）Φ_{BS} 和 Φ_{UE} [28], [29]。所有小基站共享相同的频谱，并通过受限的回程链路连接到远程服务器。每个小基站采用时分多址模式为关联用户提供服务。小基站和用户均配备可转向定向天线。在数据传输之前，用户与关联小基站之间会进行完美的波束成形训练。

考虑以用户为中心的架构 [20], , 每个用户都可以由 K 个小基站提供服务，这些小基站组成一个小基站集群，记为 $\{\text{SBS}_1, \text{SBS}_2, ...\text{SBS}_K\}$。例如，如图1所示，用户 A 由包含三个小基站的小基站集群提供服务，即 $\{\text{SBS}_1, \text{SBS}_2, \text{SBS}_3\}$。用户分为两类：未配对用户和配对用户。未配对用户服从密度为 λ_u 的齐次泊松点过程 Φ_u ，仅由小基站提供服务，例如图1所示的用户 C 。配对用户不仅由小基站集群提供服务，也由其 D2D对等节点提供服务。配对用户服从密度为 λ_p 的齐次泊松点过程 Φ_p ，并通过高速 D2D通信交换缓存内容。例如，用户 A 和用户 B 组成一个 D2D用户对，并通过 D2D链路相互连接。对于配对用户，其 D2D对等节点在半径为 r_d^{max} 的圆盘内均匀分布。因此，用户与其 D2D对等节点之间的距离 r_d 服从以下分布 [28]

$$f(r_d) = \frac{2r_d}{\left(r_d^{max}\right)^2}, 0 < r_d < r_d^{max}. \tag{1}$$

由于系统中D2D通信与蜂窝通信共存，我们采用叠加方案，即D2D通信与蜂窝通信使用不同的频段以避免干扰。假设 W 是毫米波系统可用的带宽， ϕW带宽分配给D2D通信。

B. 内容流行度模型

令 $\mathcal{F} = \{f_1, f_2, ..., f_i, ...f_{|\mathcal{F}|}\}$ 和 $\mathcal{Q} = \{q_1, q_2, ..., q_i, ..., q_{|\mathcal{F}|}\}$ 分别表示请求内容集合及其对应的流行度分布。 $|\mathcal{F}|$为内容总数。使用齐夫分布来刻画流行度分布 [20], , 第 i个内容的流行度为

$$q_i = \frac{i^{-\xi}}{\sum_{j=1}^{|\mathcal{F}|} j^{-\xi}}, 1 \le i \le |\mathcal{F}| \tag{2}$$

其中， $\xi \ge 0$ 表示内容流行度偏斜，其值因内容类型而异。内容流行度偏斜值越大，表示内容请求越集中。

C. 定向天线模型

文献中广泛采用理想化的“平顶”模型来简化干扰分析 [30]。该模型假设主瓣内的天线增益恒定，其他方向的增益为零。然而，在实际的定向天线中，主瓣天线增益会发生变化，且旁瓣天线增益不为零，这使得干扰分析与管理变得困难。本文采用一种实用模型，根据相对于其视轴的相对角度 θ 来表征定向天线增益，其表达式为

$$G(\theta)=\begin{cases}G_m 10^{-c\left(\frac{2\theta}{\omega_m}\right)^2} & |\theta|\le\frac{\theta_m}{2}\\ G_s & \frac{\theta_m}{2}<|\theta|\le\pi.\end{cases} \tag{3}$$

G_m 和 G_s 分别表示主瓣的最大天线增益和旁瓣的平均天线增益。ω_m 和 θ_m 分别表示半功率波束宽度和主瓣波束宽度。c 是一个经验常数，其取值为 0.3 [1]。

D. 毫米波信道模型

对于信道模型，毫米波链路的大尺度信道衰落（单位为 dB）建模如下：

$$PL(dB)=20\log_{10}\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right)+10\alpha\log_{10}\left(\frac{r}{d_0}\right),r\ge d_0 \tag{4}$$

其中，r 和 α 分别表示传播距离和路径损耗指数。λ 为波长，d_0 为自由空间参考距离 [31], [32]。当传播距离大于参考距离时，该模型效果良好。为便于表述，平均路径损耗可改写为：

$$\beta=Cr^{-\alpha} \tag{5}$$

其中，$C=\frac{\lambda^2}{d_0^2\,4\pi()^2}$ 是一个常数。

对于小尺度衰落，本文考虑快速瑞利衰落，即 $h\sim\exp(1)$，其信道功率增益是一个均值为单位均值的指数随机变量。

E. 传输模型

毫米波链路的传输速率表示为

$$R=\frac{W}{N_{cell}}\log_2\left(1+\frac{S}{I+\sigma^2}\right) \tag{6}$$

其中，N_{cell} 为小区负载。背景热噪声功率可建模为 $\sigma^2=WN_o$，其中 N_o 为噪声功率谱密度。S 和 I 分别表示信号功率和干扰功率。

在毫米波网络中，每个用户都会受到除其关联小基站 $\mathcal{B}_o$ 之外的所有其他小基站的干扰。因此，考虑定向天线模型和信道模型，干扰功率为

$$\begin{aligned}I&=\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o}I_i\\&=\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o}P_BG(\theta_{t,i})G(\theta_{r,i})h_iCr_i^{-\alpha}\end{aligned} \tag{7}$$

其中，$G(\theta_{t,i})$ 和 $G(\theta_{r,i})$ 分别表示发射和接收定向天线增益。$\theta_{t,i}$ 和 $\theta_{r,i}$ 分别表示用户与第 i 个受干扰小基站之间干扰链路的出发角（AOD）和到达角（AOA）。r_i 表示用户与第 i 个受干扰小基站之间的物理距离。为便于分析，我们假设干扰链路的到达角和出发角在 $(0,2\pi]$ [33] 内均匀分布，从而得到干扰信号的平均定向天线增益。平均定向天线增益为

$$\begin{aligned}\bar{G}&=\int_0^{2\pi}G(\theta)f(\theta)d\theta\\&=\int_0^{\frac{\theta_m}{2}}G_m10^{-c\left(\frac{2\theta}{\omega_m}\right)^2}\frac{1}{\pi}d\theta+\int_{\frac{\theta}{2}}^{\pi}G_s\frac{1}{\pi}d\theta\\&=\frac{\omega_mG_m}{\sqrt{2c\pi\ln 10}}\mathrm{erfc}\left(\frac{\theta_m\sqrt{c\ln 10}}{\omega_m}\right)-\frac{G_s\theta_m}{2\pi}+G_s\end{aligned} \tag{8}$$

其中，$\mathrm{erfc}(x)=\int_0^x e^{-t^2}dt$ 表示高斯误差函数。考虑干扰链路的平均定向天线增益，式（7）中的平均干扰功率可改写为

$$\mathbb{E}[I]=\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o}P_B\bar{G}^2C\mathbb{E}[h_i]\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}]. \tag{9}$$

本文后续分析中使用这一干扰模型。

IV. D2D辅助协作边缘缓存（DCEC）策略

本节首先提出 DCEC 策略以利用缓存多样性，然后分析其回程卸载性能。

A. 方案设计

在 DCEC策略中，用户、其 D2D对等节点和 SBS集群的缓存资源以协作方式加以利用，用于存储多样化内容，从而卸载回程流量。请注意，用户会查询其 D2D对等节点和 SBS集群，以确定请求内容缓存的位置。对于请求内容，如果内容缓存在用户的本地存储中，用户便可在本地检索内容，延迟可忽略不计。其次，如果内容缓存在其 D2D对等节点中，用户便通过 D2D通信检索内容。然后，如果内容缓存在 SBS集群中的任意小基站中，用户便与该小基站建立关联，再通过蜂窝通信检索内容。与通过 D2D通信检索内容相比，通过蜂窝通信检索内容会产生更高的延迟，因为 D2D通信的传输速率高于蜂窝通信，这是由于其通信距离更短。否则，如果内容未能命中缓存，用户便与最近小型基站 B_o 建立关联，并通过受限的回程链路从远程服务器检索内容，这会造成较长的延迟。因此，对于特定用户，按照延迟升序排列的内容检索优先级集合为 {用户 $\le$ 其 D2D对等节点 $\le$ SBS

集群 $\leq$ 远程服务器}。此内容检索优先级集合应用于我们提出的缓存策略中的内容放置，以最大限度地缩短内容检索延迟，具体分为以下两个步骤。

首先，由于内容检索时延较短，用户及其 D2D 对等节点都会缓存最热门的内容。假设每个用户的缓存容量相同，记为 C_u。注意，用户分为配对用户和未配对用户。对于配对用户，最热门的 $2C_u$内容，即 $\{f_1, f_2, ..., f_{2C_u}\}$，会缓存在由该用户及其 D2D 对等节点组成的 D2D用户对中。为保证公平性，这些$2C_u$ 内容会根据内容流行度在用户及其 D2D 对等节点之间均匀分配，使 D2D用户对中的两个用户具有几乎相同的内容命中率。例如，D2D用户对中的用户A和用户B具有相同的内容命中率，即 $h_A = h_B$。因此，配对用户的内容命中率为

$$h_p = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2C_u} q_i. \tag{10}$$

对于未配对用户，由于没有 D2D 对等节点的协助，未配对用户只能缓存最热门的 C_u 内容，即$\{f_1, f_2, ..., f_{C_u}\}$。因此，未配对用户的内容命中率为

$$h_u = \sum_{i=1}^{C_u} q_i. \tag{11}$$

其次，由于通过蜂窝通信检索内容的时延较长，SBS集群会缓存流行度较低的内容。请注意，用户由规模为 K 的 SBS集群提供服务。假设每个小基站具有相同的缓存容量 C_s。SBS集群缓存接下来的 KC_s 个热门内容，即 $\{f_{2C_u+1}, f_{2C_u+2}, ..., f_{2C_u+KC_s}\}$。类似地，为了保证公平性和实现小区负载均衡，这些 KC_s 个内容会根据内容流行度平均分配到 SBS集群中的每个小基站，使每个小基站具有相同的内容命中率，该命中率表示为

$$h_s = \frac{1}{K}\sum_{i=2C_u+1}^{2C_u+KC_s} q_i. \tag{12}$$

请注意，对于未配对用户而言，一些公平的热门内容未被缓存。然而，在密集网络场景中，由于用户很可能与邻近用户建立关联，未配对用户仅占所有用户的一小部分。具体而言，在我们的仿真中，假设 80% 的用户为配对用户，而只有 20% 的用户为未配对用户。因此，未配对用户对所有用户的影响相对较小。

B. 回程卸载分析

采用所提出的缓存策略后，用户可以从边缘网络中获取缓存内容，而无需依赖容量受限的回程链路，从而显著减轻回传负担。本文将回程卸载增益定义为未通过回传链路传输的数据流量与总数据流量之比。本小节分析DCEC策略的回程卸载增益。

对于配对用户，两名用户的缓存容量与SBS集群的缓存容量协同用于存储最热门的$2C_u + KC_s$ 内容，因此回程卸载增益为 $2h_p + Kh_s$。对于未配对用户，在没有D2D对等节点协助的情况下，回程卸载增益为 $h_u + Kh_s$ 。因此，DCEC策略的平均回程卸载增益为

$$F = h_u(1-\delta) + 2h_p\delta + Kh_s \tag{13}$$

其中，$\delta = \frac{\lambda_p}{\lambda_p+\lambda_u}$ 表示配对用户占所有用户的比例。显然，由于缓存多样性增益，回程卸载增益会随簇大小 K 的增加而提高。

相应的缓存未命中概率，即请求内容未缓存在边缘网络中的概率，为

$$P_m = 1 - F. \tag{14}$$

未命中的缓存内容可通过最近的蜂窝链路和受限的回程链路从远程服务器获取。

V. 内容检索时延分析

本节分析 DCEC 策略的平均内容检索时延。由于用户通过不同的通信链路检索请求内容，因此分别分析这些通信链路的传输性能，以得到平均内容检索时延。如果请求内容未命中缓存，用户通过两条通信链路检索内容。首先，以平均回传传输速率 $\mathbb{E}[R_B]$ 将内容从远程服务器下载到最近小型基站，然后以最近小型基站的平均传输速率 $\mathbb{E}[R_N]$ 将内容传输给用户。如果内容缓存在 SBS 集群或其 D2D对等节点中，用户则以 SBS 集群平均传输速率 $\mathbb{E}[R_C]$ 或平均 D2D传输速率 $\mathbb{E}[R_D]$ 检索内容。假设平均内容大小表示为 ν，则 DCEC 策略的平均内容检索时延为

$$D = \frac{P_m\nu}{\mathbb{E}[R_B]} + \frac{P_m\nu}{\mathbb{E}[R_N]} + \frac{P_s\nu}{\mathbb{E}[R_C]} + \frac{P_d\nu}{\mathbb{E}[R_D]} \tag{15}$$

其中，$P_s = Kh_s$ 和 $P_d = \delta h_p$ 分别表示请求内容缓存在SBS集群和D2D对等节点中的概率。接下来，我们分别对这些传输速率的下界进行解析推导，从而得到平均内容检索时延的上界。

A. 回传传输速率分析

本小节分析平均回传传输速率。根据泊松点过程的性质，网络中各部分的流量也服从泊松点过程。将由受限回程链路服务的用户视为平面上的齐次泊松点过程 Φ_B，其密度为 $P_m\lambda_{UE}$。假设每个小基站具有相同的回程容量 B，并以时分多址模式为其关联用户提供服务。

引理 *1*： 每个用户的平均回传传输速率为

$$\mathbb{E}[R_B] = \frac{B\lambda_{BS}}{P_m\lambda_{UE}} \frac{\left(1+\frac{P_m\lambda_{UE}}{\kappa\lambda_{BS}}\right)^{\kappa+1}}{\left(1+\frac{P_m\lambda_{UE}}{\kappa\lambda_{BS}}\right)^{\kappa+1}-1} \tag{16}$$

其中 $\kappa = 3.5$ 是一个常数。

证明 *1*： 由于回程资源平均分配给每个用户，因此每个用户的平均回程速率为 $B/\mathbb{E}[N_B]$。N_B 是回传负载，它是一个取决于 SBS 小区面积的随机变量。SBS 小区面积服从参数为 κ 的伽马分布。小区面积的概率密度函数（PDF） a 为 [34]

$$f(a) = a^{\kappa-1}e^{-\kappa\lambda_{BS}a}\frac{(\kappa\lambda_{BS})^{\kappa}}{\Gamma(\kappa)}. \tag{17}$$

因此，平均回传负载为

$$\begin{aligned}
\mathbb{E}[N_B] &= \int_a^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty} n\Pr\{N_B = n|a\}f(a)da \\
&\overset{(a)}{=} \int_a^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty} n\frac{(P_m\lambda_{UE}a)^n}{n!}e^{-P_m\lambda_{UE}a}f(a)da \\
&= \int_a^{\infty} P_m\lambda_{UE}a\left(1-e^{-P_m\lambda_{UE}a}\right) \\
&\quad a^{\kappa-1}e^{-\kappa\lambda_{BS}a}\frac{(\kappa\lambda_{BS})^{\kappa}}{\Gamma(\kappa)}da \\
&\overset{(b)}{=} \frac{P_m\lambda_{UE}}{\kappa\lambda_{BS}}\frac{\Gamma(\kappa+1)}{\Gamma(\kappa)}\left(1-\left(\frac{\kappa\lambda_{BS}}{\kappa\lambda_{BS}+P_m\lambda_{UE}}\right)^{\kappa+1}\right) \\
&= \frac{P_m\lambda_{UE}}{\lambda_{BS}}\left(1-\frac{1}{\left(1+\frac{P_m\lambda_{UE}}{\kappa\lambda_{BS}}\right)^{\kappa+1}}\right).
\end{aligned} \tag{18}$$

(*a*) 根据 N_B 是均值为 $P_m\lambda_{UE}a$ [35] 的泊松分布随机变量这一事实得出。(*b*) 根据伽马函数 $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} x^{z-1}e^{-x}dx$ 的定义得出。因此，引理 1 得证。

B. 最近 *SBS* 传输速率分析

当请求内容通过回程链路从远程服务器下载时，用户通过关联到最近的小型基站来获取内容，该基站可提供最高的蜂窝传输速率。本小节旨在分析最近小型基站的传输速率。

由于系统采用叠加方案，$(1-\phi)W$带宽分配给蜂窝通信，每个小基站以时分多址模式为其关联用户提供服务。每个小基站的关联用户分为两类：请求内容未缓存的缓存未命中用户，以及请求内容缓存在 SBS 集群中的 SBS 集群缓存命中用户。因此，每个小基站的关联用户被建模为密度为 $\lambda_C = (P_m + P_s)\lambda_{UE}$ 的泊松点过程 Φ_C。小基站总数为 N_{BS}。与.....中的结果类似

(18)中，平均小区负载为

$$\mathbb{E}[N_C] = \frac{(P_m+P_s)\lambda_{UE}}{\lambda_{BS}}\left(1-\frac{1}{\left(1+\frac{(P_m+P_s)\lambda_{UE}}{\kappa\lambda_{BS}}\right)^{\kappa+1}}\right). \tag{19}$$

引理 *2*： 当用户关联到最近小型基站$\mathcal{B}_o$时，平均传输速率的下界为

$$\mathbb{E}[R_N] \geq \frac{(1-\phi)W}{\mathbb{E}[N_C]\ln 2}\left(2\ln\frac{G_m}{\bar{G}} + \frac{(\alpha-2)\gamma}{2} - \ln J_1(\alpha)\right) \tag{20}$$

其中

$$J_1(\alpha) = \begin{cases} \frac{\Gamma(N_{BS}+1-\frac{\alpha}{2})}{(1-\frac{\alpha}{2})\Gamma(N_{BS})} - \Gamma\left(1-\frac{\alpha}{2}\right), & \alpha \neq 2 \\ \ln(N_{BS}-1)+\gamma, & \alpha = 2 \end{cases} \tag{21}$$

且 γ 为欧拉–马歇罗尼常数，其值约为 0.577。

证明 *2*： 假设用户与其关联的最近小型基站之间的定向天线对准良好，则接收信号功率为

$$S = P_B G_m^2 h_1 C r_1^{-\alpha} \tag{22}$$

其中 r_1 为用户与最近小型基站之间的距离。干扰信号功率包括来自所有其他小基站的干扰信号，且这些干扰信号是相互独立的随机变量 [36]。

根据式 (6) 中的传输模型，平均传输速率为

$$\begin{aligned}
\mathbb{E}[R_N] &= \mathbb{E}\left[\frac{(1-\phi)W}{N_C}\log_2\left(1+\frac{S}{I+\sigma^2}\right)\right] \\
&= \frac{(1-\phi)W}{\mathbb{E}[N_C]\ln 2}\mathbb{E}\left[\ln\left(1+\frac{S}{\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o} I_i+\sigma^2}\right)\right] \\
&\geq \frac{(1-\phi)W}{\mathbb{E}[N_C]\ln 2}\mathbb{E}\left[\ln\frac{S}{\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o} I_i}\right] \\
&\geq \frac{(1-\phi)W}{\mathbb{E}[N_C]\ln 2}\left(\mathbb{E}[\ln S] - \ln\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o}\mathbb{E}\left[I_i\right]\right).
\end{aligned} \tag{23}$$

第二步成立是因为接收信号信干噪比（SINR）与蜂窝负载是相互独立的随机变量。第一个不等式成立是因为在高信噪比场景下可以忽略热噪声。由于可靠通信的要求，实际应用能够保证具有较高的信噪比。最后一个不等式由詹森不等式得出。下面分别对 $\mathbb{E}[\ln S]$ 和 $\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o}\mathbb{E}[I_i]$ 进行分析。

首先，将（22）中的期望信号定义代入，$\mathbb{E}[\ln S]$ 可重写为

$$\begin{aligned}
\mathbb{E}[\ln S] &= \mathbb{E}\left[\ln\left(P_B G_m^2 h_1 C r_1^{-\alpha}\right)\right] \\
&= \ln\left(P_B G_m^2 C\right) + \mathbb{E}\left[\ln h_1\right] - \alpha\mathbb{E}\left[\ln r_1\right] \\
&= \ln\left(P_B G_m^2 C\right) - \gamma + \frac{\alpha}{2}\left(\gamma + \ln\pi\lambda_{BS}\right).
\end{aligned} \tag{24}$$

该等式成立是基于以下两个事实:

$$\mathbb{E}[\ln h_1] = \int_0^\infty \ln x e^{-x} dx = -\gamma$$

and

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[\ln r_1] &= \int_0^\infty \ln r_1 f(r_1) dr_1 \\ &\overset{(a)}{=} \int_0^\infty \ln(r_1) 2\pi\lambda_{BS} r_1 e^{-\pi\lambda_{BS} r_1^2} dr_1 \\ &\overset{(b)}{=} \frac{1}{2}\left(\int_0^\infty e^{-y}\ln y dy - \int_0^\infty e^{-y}\ln(\pi\lambda_{BS}) dy\right) \\ &= -\frac{\gamma + \ln \pi\lambda_{BS}}{2}\end{aligned} \tag{25}$$

其中，(*a*)是因为 r_1 服从以下分布： $f(r_1) = 2\pi\lambda_{BS} r_1 e^{-\pi\lambda_{BS} r_1^2}$ [36]。(*b*)通过变量替换 $y = \pi\lambda_{BS} r_1^2$得到。

其次，利用式(9)中的平均干扰模型，$\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o} \mathbb{E}[I_i]$ 可表示为

$$\begin{aligned}\ln \sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o} \mathbb{E}[I_i] &= \ln \sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o} P_B \bar{G}^2 C \mathbb{E}[h_i]\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}] \\ &= \ln\left(P_B\bar{G}^2 C\right) + \ln \sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o} \mathbb{E}[r_i^{-\alpha}].\end{aligned} \tag{26}$$

最后一个等号是因为 $\mathbb{E}[h_i] = 1$。

由于用户与第 i个最近小型基站之间的距离的概率密度函数 r_i 由 [35]给出

$$f(r,i) = \frac{2(\pi\lambda_{BS})^i}{(i-1)!} r^{2i-1} e^{-\pi\lambda_{BS} r^2}, i = 2, 3...$$

r_i 的第 $-\alpha$阶矩可计算如下:

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}] &= \int_0^\infty r^{-\alpha} f(r,i) dr \\ &= \int_0^\infty \frac{2(\pi\lambda_{BS})^i}{(i-1)!} r^{2i-1-\alpha} e^{-\pi\lambda_{BS} r^2} dr \\ &= \frac{(\pi\lambda_{BS})^{\frac{\alpha}{2}}}{(i-1)!}\int_0^\infty y^{\frac{2i-\alpha}{2}-1} e^{-y} dy \\ &= (\pi\lambda_{BS})^{\frac{\alpha}{2}} \frac{\Gamma(i-\frac{\alpha}{2})}{\Gamma(i)}, i > \frac{\alpha}{2}.\end{aligned} \tag{27}$$

接下来，我们旨在求出 r_i的第 $-\alpha$阶矩之和。当 α 取不同值时， r_i 的第$-\alpha$阶矩之和也会发生变化。

- 当 $\alpha \neq 2$ 时，由式 (27) 可得， r_i 的第 $-\alpha$ 阶矩的求和为

$$\begin{aligned}&\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o} \mathbb{E}[r_i^{-\alpha}] \\ &= (\pi\lambda_{BS})^{\frac{\alpha}{2}} \sum_{i=2}^{N_{BS}} \frac{\Gamma(i-\frac{\alpha}{2})}{\Gamma(i)} \\ &= (\pi\lambda_{BS})^{\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{\Gamma(N_{BS}+1-\frac{\alpha}{2})}{(1-\frac{\alpha}{2})\Gamma(N_{BS})} - \Gamma\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)\right).\end{aligned} \tag{28}$$

最后一个等式由以下等式得出 [36]

$$\sum_{j=1}^{n} \frac{\Gamma(j-\beta)}{\Gamma(j)} = \frac{\Gamma(n+1-\beta)}{(1-\beta)\Gamma(n)}, \beta \neq 2. \tag{29}$$

- 当 $\alpha = 2$ 时，求和结果为

$$\begin{aligned}\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o} \mathbb{E}[r_i^{-\alpha}] &= (\pi\lambda_{BS})^{\frac{\alpha}{2}} \sum_{i=2}^{N_{BS}} \frac{\Gamma(i-1)}{\Gamma(i)} \\ &= (\pi\lambda_{BS})^{\frac{\alpha}{2}} \sum_{i=1}^{N_{BS}-1} \frac{1}{i} \\ &\approx (\pi\lambda_{BS})^{\frac{\alpha}{2}} \left(\ln(N_{BS}-1) + \gamma\right)\end{aligned} \tag{30}$$

当 N_{BS} 足够大时，等号成立。因此，这种近似在密集网络中是合理的。

将 (28) 和 (30) 代入 (26)，平均干扰功率求和的对数形式可改写为

$$\ln \sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o} \mathbb{E}[I_i] = \ln P_B \bar{G}^2 C + \frac{\alpha}{2}\ln \pi\lambda_{BS} + \ln J_1(\alpha) \tag{31}$$

其中， $J_1(\alpha)$ 的定义见 (21)。将 (24) 和 (31) 代入 (23)，即可证明引理2。

注释 *1*： 引理 1 根据网络密度、定向天线增益和路径损耗指数等系统参数，刻画了最近小型基站的传输性能。首先，平均传输速率随定向天线增益线性增加，即 G_m/G，这表明定向天线能够提升毫米波系统的吞吐量。其次，平均传输速率随路径损耗指数 α 线性增加，因为毫米波频段严重的路径损耗会显著减轻干扰，并带来空间复用增益。第三，随着网络密度增加，传输性能略有下降，因为 $\ln J_1(\alpha)$ 随小基站数量 N_{BS} 略微增加。原因在于通信距离和干扰距离都会随网络密度调整。

*C. SBS*簇传输速率分析

由于SBS集群中的每个小基站具有相同的内容命中率，因此用户关联到SBS集群中任意一个小基站的概率相同。因此，SBS集群平均传输速率应由所有候选小型基站的传输速率取平均得到。

引理 *3*： SBS集群平均传输速率为

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[R_C] \geq \frac{(1-\phi)W}{\mathbb{E}[N_C]\ln 2}\Bigg(&2\ln\frac{G_m}{\bar{G}} + \frac{(\alpha-2)\gamma}{2} \\ &- \frac{\alpha}{2K}\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{k-1}\frac{1}{i} - \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\ln J_2(\alpha,k)\Bigg)\end{aligned} \tag{32}$$

其中

$$J_2(\alpha,k)=\begin{cases}\dfrac{\Gamma(N_{BS}+1-\frac{\alpha}{2})}{(1-\frac{\alpha}{2})\Gamma(N_{BS})}-\dfrac{\Gamma(k-\frac{\alpha}{2})}{\Gamma(k)},\ \alpha<2\\ E_1(r_0)+\ln(N_{BS}-1)+\gamma-J_4(k),\ \alpha=2\\ \Gamma\left(1-\dfrac{\alpha}{2},r_0\right)+\dfrac{\Gamma(N_{BS}+1-\frac{\alpha}{2})}{(1-\frac{\alpha}{2})\Gamma(N_{BS})}\\ -\Gamma\left(1-\dfrac{\alpha}{2}\right)-J_3(k)\end{cases}\tag{33}$$

$$J_3(k)=\begin{cases}\Gamma(1-\dfrac{\alpha}{2},r_0),\ k=1\\ \dfrac{\Gamma(k-\frac{\alpha}{2})}{\Gamma(k)},\ k\geq 2,\end{cases}\tag{34}$$

$$J_4(k)=\begin{cases}E_1(r_0),\ k=1\\ \dfrac{1}{k-1},\ k\geq 2.\end{cases}\tag{35}$$

注意，$r_0=\pi\lambda_{BS}d_0^2$。$\Gamma(z,a)=\int_a^\infty x^{z-1}e^{-x}dx$ 和 $E_1(x)=\int_x^\infty \frac{1}{t}e^{-t}dt$ 分别表示不完全伽马函数和指数积分函数。

证明 *3*：令 $\mathcal{B}_o=\{\mathcal{B}_o^1,\mathcal{B}_o^2,...,\mathcal{B}_o^k,...,\mathcal{B}_o^K\}$ 表示SBS集群中的候选小型基站集合，并按物理距离升序排列。相应的物理距离集合为 $\{r_1,r_2,...,r_k,...,r_K\}$。

如果用户关联到第 k近的小型基站 $\mathcal{B}_o^k$，则接收的期望信号功率为

$$S_C^k=P_BG_m^2h_1Cr_k^{-\alpha},1\leq k\leq K.\tag{36}$$

相应的干扰功率由除第 k近的小型基站以外的所有小基站的接收信号功率组成，其表达式为

$$I_C^k=\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o^k}P_BG(\theta_{t,i})G(\theta_{r,i})h_iCr_i^{-\alpha},1\leq k\leq K.\tag{37}$$

R_C^k 表示用户与第 k近的小型基站之间的平均传输速率。因此，SBS集群中的平均传输速率可表示为

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[R_C]&=\mathbb{E}\left[\frac{1}{K}\sum_{k=1}^K R_C^k\right]\\&=\frac{(1-\phi)W}{K\mathbb{E}[N_C]\ln 2}\sum_{k=1}^K\ln\left(1+\frac{S_C^k}{I_C^k+\sigma^2}\right)\\&\geq\frac{(1-\phi)W}{K\mathbb{E}[N_C]\ln 2}\sum_{k=1}^K\left(\mathbb{E}[\ln S_C^k]-\ln\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o^k}I_i^k\right)\\&=\frac{(1-\phi)W}{\mathbb{E}[N_C]\ln 2}\left(2\ln\left(\frac{G_m}{\bar{G}}\right)-\gamma-\frac{\alpha}{K}\sum_{k=1}^K\mathbb{E}[\ln r_k]\right.\\&\left.-\frac{1}{K}\sum_{k=1}^K\ln\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o^k}\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}]\right).\end{aligned}\tag{38}$$

该不等式由式 (23) 中得到的下界推得。最后一步是将式 (24) 和 (26) 代入得到的。然后，

根据 [20]，$\mathbb{E}[\ln r_k]$ 可表示为

$$\mathbb{E}[\ln r_k]=-\frac{1}{2}\left(\gamma+\ln(\pi\lambda_{BS})-\sum_{i=1}^{k-1}\frac{1}{i}\right).\tag{39}$$

$\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o^k}\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}]$ 推导如下。当 α 取不同值时，可以表示为不同的形式。

- 当 $\alpha<2$时，结合式 (27) 中的结果，可得

$$\begin{aligned}\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o^k}\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}]&=\sum_{i=1}^{N_{BS}}\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}]-\mathbb{E}[r_k^{-\alpha}]\\&=(\pi\lambda_{BS})^{\frac{\alpha}{2}}\left(\frac{\Gamma(N_{BS}+1-\frac{\alpha}{2})}{(1-\frac{\alpha}{2})\Gamma(N_{BS})}\right.\\&\left.-\frac{\Gamma(k-\frac{\alpha}{2})}{\Gamma(k)}\right).\end{aligned}\tag{40}$$

- 当 $\alpha=2$时，根据指数积分函数$E_1(x)$的定义，$\mathbb{E}[r_1^{-\alpha}]=\int_{r_0}^\infty\frac{1}{y}e^{-y}dy=E_1(r_0)$。而当 $k\geq 2$时，根据式 (30)，$\mathbb{E}[r_k^{-\alpha}]=\frac{1}{k-1}$。因此，$\mathbb{E}[r_k^{-\alpha}]$ 可用式 (35) 中的分段函数$J_4(k)$表示。采用式 (43) 中的相同方法，可得

$$\begin{aligned}\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o^k}\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}]&=(\pi\lambda_{BS})\left(E_1(r_0)+\ln(N_{BS}-1)\right.\\&\left.+\gamma-J_4(k)\right).\end{aligned}\tag{41}$$

- 当 $\alpha>2$时，由于不满足式 (27) 中的条件 $i>\frac{\alpha}{2}$，$\mathbb{E}[r_1^{-\alpha}]$ 变得无界。其原因是，当距离小于 d_0 时，式 (4) 中的路径损耗模型不再适用。为此，我们在接收器之间设置保护距离 d_0，以排除近距离干扰源。因此，r_1 的 $-\alpha$ 阶矩变为

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[r_1^{-\alpha}]&=\int_{d_0}^\infty r_1^{-\alpha}f(r_1)dr_1\\&=(\pi\lambda_{BS})^{\frac{\alpha}{2}}\int_{\pi\lambda_{BS}d_0^2}^\infty y^{\frac{2-\alpha}{2}-1}e^{-y}dy\\&=(\pi\lambda_{BS})^{\frac{\alpha}{2}}\Gamma(1-\frac{\alpha}{2},r_0).\end{aligned}\tag{42}$$

因此，$\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o^k}\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}]$ 为

$$\begin{aligned}\sum_{i\in\Phi_{BS}\setminus\mathcal{B}_o^k}\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}]&=\mathbb{E}[r_1^{-\alpha}]+\sum_{i=2}^{N_{BS}}\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}]-\mathbb{E}[r_k^{-\alpha}]\\&=(\pi\lambda_{BS})^{\frac{\alpha}{2}}\left(\Gamma(1-\frac{\alpha}{2},r_0)-\Gamma(1-\frac{\alpha}{2})\right.\\&\left.+\frac{\Gamma(N_{BS}+1-\frac{\alpha}{2})}{(1-\frac{\alpha}{2})\Gamma(N_{BS})}-J_3(k)\right).\end{aligned}\tag{43}$$

将（39）、（40）、（43）和（41）代入（38），引理3得证。

注*2*：引理3给出了SBS集群在不同毫米波系统参数下的传输性能，并指出了以下重要结论。与引理2类似，SBS集群平均传输速率会随网络密度增加而略微下降，因为 $J_2(\alpha,k)$

会随网络密度增加而略微上升。引理3表明，传输速率会随簇大小增加而下降，揭示了缓存多样性与传输效率之间的权衡关系。增大簇大小可以提高缓存容量，从而缓存更多内容；但用户检索距离较远的缓存内容时，传输性能会下降。

*D. D2D*传输速率分析

本小节分析D2D缓存性能。D2D用户服从齐次泊松点过程 Φ_D ，相应的密度为 $\lambda_D = P_d\lambda_{UE}$。由于移动用户的空间有限，其定向天线增益低于小基站，因此 G_u^m和 G_u 分别表示用户的最大主瓣增益和平均天线增益。采用叠加方案时， ϕW 系统带宽分配给D2D通信。

引理*4*：平均D2D传输速率的下界为

$$\mathbb{E}[R_D] \geq \frac{\phi W}{\ln 2}\left(2\ln\frac{G_u^m}{\bar{G}_u} - \gamma - \alpha\left(\ln r_d^{max} - \frac{1}{2}\right) - \ln(\pi\lambda_D) - \ln J_5(\alpha)\right) \tag{44}$$

其中

$$J_5(\alpha) = \begin{cases} \dfrac{R^{2-\alpha}}{1-\frac{\alpha}{2}}, & \alpha < 2 \\ 2\ln\left(\dfrac{R}{d_0}\right), & \alpha = 2 \\ \dfrac{R^{2-\alpha} - d_0^{2-\alpha}}{1-\frac{\alpha}{2}}, & \alpha > 2 \end{cases} \tag{45}$$

其中 $R = \sqrt{\frac{N_D}{\pi\lambda_D}}$， N_D 为D2D发射机的数量。证明*4*：详细证明见附录A。

注释*3*：引理4给出了D2D通信在不同物理层参数下的传输性能。最重要的是，解析结果表明，传输性能会随着D2D用户密度λ_D 的增加而下降，而该密度取决于网络密度。这是因为干扰链路的距离随网络密度变化，而D2D通信距离保持不变。此外，比较引理2、引理3和引理4可知，平均D2D传输速率会随网络密度的增加而显著下降，而蜂窝传输性能仅略有下降。因此，在密集网络中，通过D2D通信获取内容的时延会随网络密度的增加而显著增加，这要求采用适用于密集网络中D2D通信的协同调度方案。

VI. 仿真结果

本节将所提出的 DCEC策略与最先进的缓存策略进行比较，并通过大量蒙特卡洛仿真验证解析结果。仿真设置见第六节-A。我们分别在第六节-B中评估回传卸载性能，在第六节-C中分析传输性能的解析结果，并在第六节-D中评估内容检索时延性能。

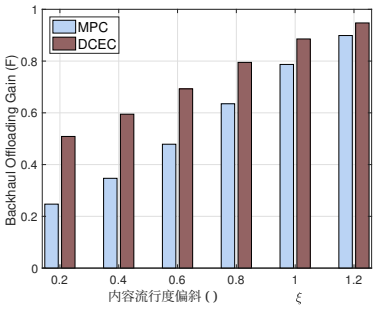
表II 仿真参数。

符号	参数	值
A	仿真区域	1 千米^2
N_o	背景噪声密度	-174 dBm/Hz
W	带宽	2.16 千兆赫兹
ϕ	D2D频谱占比	20%
f	载波频率	60 GHz
α	路径损耗指数	$\{1.4, 1.6, 2\}$
P_B	SBS发射功率	30 dBm
P_U	用户发射功率	20 dBm
G_s^m	SBS主瓣增益	18 dB
G_s^s	SBS旁瓣增益	-2 dB
G_u^m	用户主瓣增益	9 dB
G_u^m	用户旁瓣增益	-2 dB
ω_m	半功率波束宽度	10°
d_0	参考距离	1 m
r_d^{max}	最大设备到设备距离	10 m
λ_{BS}	网络密度	{80-400}每平方公里^2
λ_{UE}	用户密度	{800-4000}每平方公里^2
δ	配对用户比例	80%
F	内容库大小	2000
ν	平均内容大小	100 兆比特
C_u	用户缓存容量	150
C_s	SBS缓存容量	200

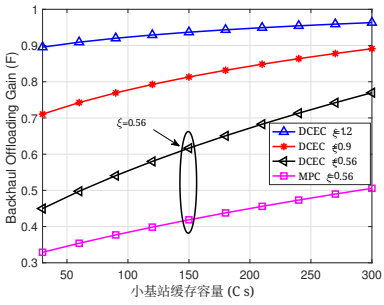
A. 仿真设置

重要仿真参数列于表II。我们考虑一个尺寸为 1 k m^2 (1000 m ×1000 m) 的仿真区域。对于毫米波系统，我们考虑已获批准的 IEEE 802.11ad 系统，该系统工作于 60 GHz 免许可频段，信道带宽为 2.16 GHz [37]。其中，80% 的带宽分配给蜂窝通信，20% 分配给 D2D通信。定向天线模型的参数根据典型取值选定[28]。我们考虑三种不同场景：具有视距（LOS）链路的室内会议室、同时具有 LOS 链路和非视距（NLOS）链路的客厅；对应的路径损耗指数分别设为 1.4、1.6 和 2。由于移动设备的电池容量和空间受限，用户采用的发射功率和定向天线增益低于小基站。除非另有说明，受限的回程容量设为 3 吉比特/秒。小基站密度设为每 km^2，80 至 400 个，平均小区半径为 65 至 30 米，对应于稀疏的农村毫米波网络和密集的城市毫米波网络。用户密度设为每 km^2，800 至 4000 个，其中 80% 为配对用户。我们考虑一个包含 2000 个内容的请求内容库。用户和小基站的缓存容量分别设为 150 个和 200 个内容。为表征视频流应用，除非另有说明，内容流行度偏斜设为 0.56 [21]。

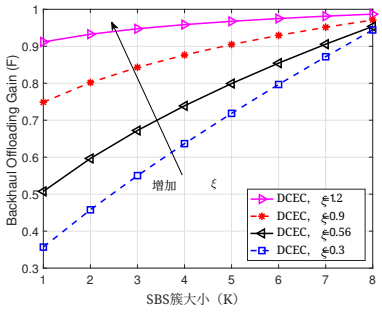
在本节中，我们采用当前最先进的最大流行度缓存（MPC）策略作为基准。在MPC策略中，只有用户及其关联小基站缓存最热门的内容，即用户和其关联小基站分别缓存 $\{f_1, f_2, ..., f_{C_u}\}$ 和 $\{f_{C_u+1}, f_{C_u+2}, ..., f_{C_u+C_s}\}$。



(a) 内容流行度偏斜。



(b) SBS缓存容量



(c) SBS簇大小

图2. 不同系统参数下的回程卸载性能。

B. 回程卸载性能

如图2(a)所示，我们比较了DCEC策略与MPC策略在不同内容流行度偏斜程度下的回程卸载性能。显然，由于能够高效利用缓存资源，所提出的策略显著优于MPC策略。具体而言，对于 $\xi = 0.6$，所提出的策略比MPC策略多卸载约50%的回程流量。此外，随着内容流行度偏斜程度增大，这两种策略之间的性能差距逐渐缩小。原因在于，单个用户及其关联小基站的缓存容量足以存储高度集中的内容。

图 2 展示了不同系统参数下的回程卸载性能。图 2(b) 展示了对于 $K = 3$，SBS缓存容量对回程卸载性能的影响。我们观察到，随着SBS缓存容量增加，本地边缘网络卸载的回程流量也随之增加，因为缓存的内容更多了。具体而言，与内容流行度偏斜程度较大的区域相比，在偏斜程度较小的区域，缓存资源增长带来的性能增益更大。这是因为，对于内容请求应用分布不那么集中的情况，较大的缓存容量更有优势。此外，随着SBS缓存容量增加，DCEC策略与MPC策略之间的性能差距也会扩大。图 2(c) 进一步展示了不同SBS簇大小下的回程卸载性能。当内容流行度偏斜值较低时，随着SBS簇大小增加，回程卸载增益显著提升。具体而言，对于 $\xi = 0.56$，拥有八个小基站的DCEC策略比拥有两个小基站的策略多卸载70%的回程流量。但当 ξ 较大时，性能提升有限。因此，DCEC策略更适用于内容请求分布不那么集中的应用。

C. 传输性能

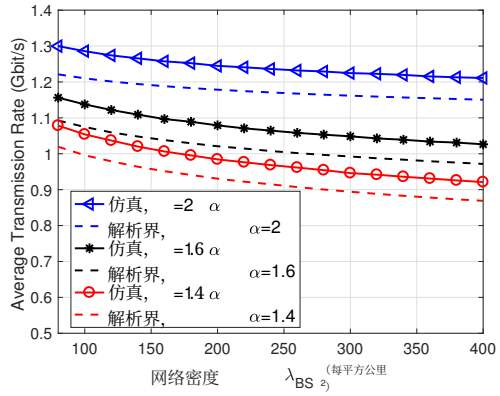
在本小节中，我们通过大量仿真验证传输性能的解析结果。仿真结果取自 10000 个具有不同网络拓扑和信道衰落的样本的平均值。

图3(a)展示了在 $\alpha = 1.4$、1.6、2 的情况下，最近小基站传输速率随网络密度的变化。引理2中的解析下界与仿真结果非常接近，在不同信道条件下均如此，这验证了解析结果。更重要的是，平均速率随网络密度增加而略有下降。对于 $\alpha = 2$，当网络密度从每平方公里80个增加到400个时，传输速率仅下降8%。即使对于 $\alpha = 1.4$，传输速率也仅下降15%。此外，我们观察到，平均传输速率随 α 增加，这是因为毫米波信道中的严重传播损耗缓解了干扰。

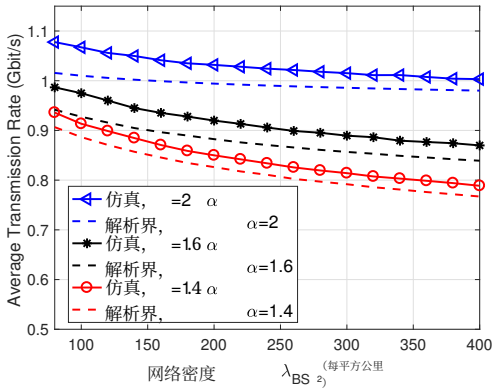
如图3(b)所示，我们研究了 $K = 2$ 和 $\alpha = 1.4$、1.6、2 下的 SBS集群平均传输速率。随着网络密度变化，仿真结果与解析界之间的差距很小，这表明引理3中的解析结果相当准确。此外，我们观察到传输性能随网络密度增加而略有下降，这与最近小型基站的情况相似。具体而言，对于 $\alpha = 2$，从稀疏网络 $\lambda_{BS} = 80$ 到密集网络 $\lambda_{BS} = 400$，平均传输速率仅下降 10%。

图3(c)展示了在不同簇大小下，平均传输速率随网络密度的变化情况，其中 α =1.6。解析结果与仿真结果高度一致，进一步验证了引理3的准确性。更重要的是，我们观察到 SBS集群平均传输速率随簇大小增加而下降。具体而言，对于 $\lambda_{BS} = 80$，由两个小基站组成的 SBS 集群可提供约 1.08 吉比特/秒的数据速率，而由四个小基站组成的 SBS 集群在相同网络密度下仅能提供 0.83 吉比特/秒的数据速率，降幅近 23%。这是因为用户会从距离较远的小基站获取缓存内容。较大的 SBS 集群能够缓存更多内容，但会降低平均传输速率，这揭示了缓存多样性与传输效率之间的权衡关系。

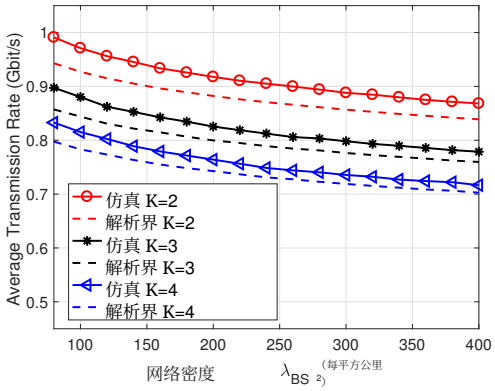
在图3(d)中，我们研究了 $\alpha = 1.4$、1.6 和 2 条件下，D2D传输速率随D2D用户密度的变化。仿真结果与不同信道条件下引理4给出的解析界相符。首先可以看出，与蜂窝通信相比，D2D通信由于距离较短而具有更高的传输速率，这意味着通过D2D通信进行内容检索的时延较低。随后我们观察到，随着D2D用户密度增加，传输性能急剧下降，即传输



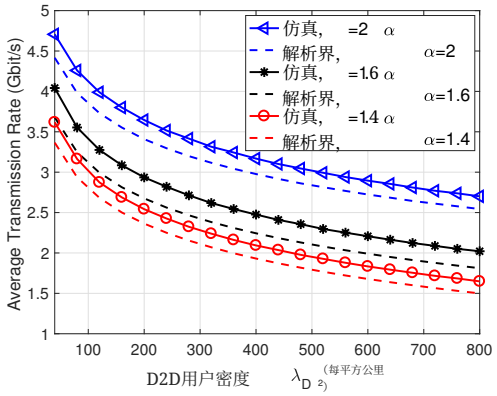
(a) 最近小基站传输速率



(b) SBS簇传输速率



(c) SBS簇传输速率与簇大小的关系



(d) D2D传输速率

图 3. 传　　输性能与不同系统参数的关系　　。

速率从 4 吉比特/秒降至仅 2 吉比特/秒，而D2D用户密度则从每 km^2 for$\alpha = 1.6$ 40 增至 800。原因在于，期望信号功率保持不变，因为D2D通信距离与D2D用户密度无关；与此同时，随着D2D用户密度增加，干扰链路距离缩短，干扰因此急剧增大。因此，需要采用协同调度方案来提升密集网络中的D2D传输性能。

D. 内容检索时延

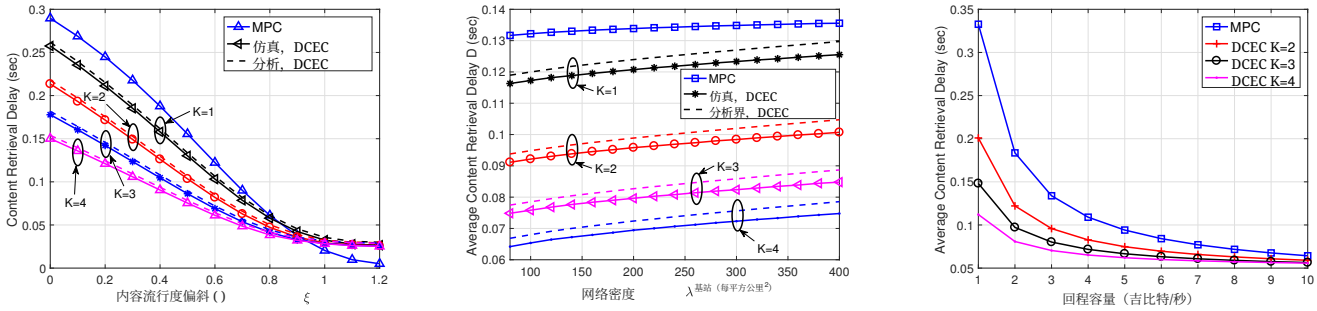
我们分别研究了不同缓存策略下，内容流行度、网络密度、回程容量和簇大小对内容检索时延性能的影响。

图4(a)展示了内容流行度偏斜对平均内容检索时延的影响。在内容流行度偏斜较低的区域，所提出的策略优于MPC策略，因为内容请求应用的集中度较低时，更适合较大的缓存容量。例如，对于 $\xi = 0.6$，具有四个小基站的DCEC策略与MPC策略相比，可将内容检索时延降低48%。然而，随着内容流行度偏斜增大，DCEC策略带来的性能增益逐渐消失，这进一步验证了DCEC策略更适用于集中度较低的内容请求应用。

如图4(b)所示，针对 $\xi = 0.56$，研究了网络密度对内容检索时延性能的影响。首先，仿真结果与解析界高度吻合。其次，随着网络密度增加，内容检索时延也会增加，因为在密集网络中，蜂窝传输速率和D2D传输速率都会下降。例如，对于 $K = 4$，当网络密度从每平方公里80个用户增加到400个用户时，用户检索内容所花的时间约增加23%。更重要的是，借助高速蜂窝通信和D2D通信，采用所提出策略且配备四个小基站时，与MPC策略相比，内容检索时延最多可降低45%。

如图 4(c) 所示，我们绘制了平均传输时延随回程容量变化的曲线。可以观察到，随着回程容量增加，DCEC策略带来的性能增益逐渐消失。当受限的回程容量成为系统性能瓶颈时，所提出的策略会在边缘网络中协同缓存更多内容，以降低内容检索时延。然而，当回程容量不受限制时，由于用户能够以较低时延从远程服务器获取内容，性能增益会减弱。

图5展示了对于 $\lambda_{BS} = 100$，200，400，SBS簇大小对平均内容检索时延的影响。如前所述，传输效率与缓存多样性之间存在权衡——



（a）内容流行度　　（b）网络密度　　（c）回程容量

图4. 不同系统参数下的内容检索时延。

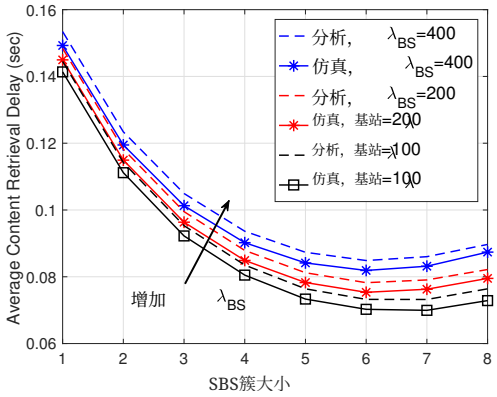


图5. SBS簇大小对内容检索时延的影响。

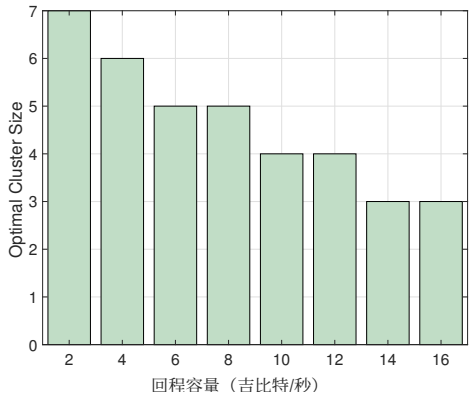


图6. 回程容量对应的最优SBS簇大小。

我们观察到，随着SBS簇大小增加，平均内容检索时延先降低后升高。当SBS簇过大时，协作边缘缓存带来的收益会消失。这是因为较大的SBS簇缓存了更多热门内容，但由于获取内容所需的物理距离较长，SBS集群平均传输速率会降低。此外，缓存多样性与传输性能之间的权衡关系表明存在最优簇大小。具体而言，最优簇大小为$\lambda_{BS}=100$时为7；而当网络密度增加至每平方公里400^2,时，最优SBS簇大小降至6。

此外，图6展示了回程容量对应的最优SBS簇大小。我们观察到，最优簇大小随回程容量的增加而减小，这意味着在回程受限的场景下，更大的SBS簇大小更为理想。原因在于，回程容量的增加会减弱DCEC策略带来的性能增益。例如，回程容量为2吉比特/秒时，最优簇大小为7；而当回程容量增至16吉比特/秒时，最优SBS簇大小降至3。

VII. 结论与未来工作

本文提出了一种适用于毫米波密集网络的D2D辅助协作边缘缓存方案。通过考虑实际的定向天线模型和网络密度，得到了所提策略在回传卸载和内容检索时延性能方面的闭式表达式。分析结果和仿真结果均表明，平均内容检索时延随网络密度的增加而增大。此外，本文还研究了缓存多样性与传输效率之间的权衡关系。通过大量仿真与最先进的MPC策略进行比较，结果表明，所提出的缓存策略在回程流量卸载和内容检索时延方面均取得了显著的性能增益。未来，由于D2D传输性能会随着网络密度的增加而显著下降，我们将研究毫米波密集网络中并发D2D传输的协调调度方案。此外，我们还将研究最优内容放置，以进一步降低内容检索时延。

附录

A. 引理4的证明

当用户通过毫米波D2D通信由其D2D对等节点提供服务时，接收信号功率为

$$S_D = P_U (G_u^m)^2 h_1 C r_d^{-\alpha}. \tag{46}$$

由所有其他D2D发射机 Φ_D发出的接收信号构成的接收干扰功率为

$$I_D = \sum_{i\in\Phi_D} P_U G_u(\theta_{t,i}) G_u(\theta_{r,i}) h_i C r_i^{-\alpha} \tag{47}$$

其中， r_i 是用户与第 i个D2D干扰源之间的距离。

同样，D2D传输速率的平均值下界为

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[R_D] &= \phi W \log_2\left(1+\frac{S_D}{I_D+\sigma^2}\right)\\ &\geq \frac{\phi W}{\ln 2}\left(\mathbb{E}[\ln S_D] - \ln\sum_{i\in\Phi_D}\mathbb{E}[I_D^i]\right)\\ &\geq \frac{\phi W}{\ln 2}\left(2\ln\frac{G_u^m}{\bar{G}_u} - \gamma - \alpha\mathbb{E}[\ln r_d] - \ln\sum_{i\in\Phi_D}\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}]\right).\end{aligned} \tag{48}$$

按照式 (24) 中的类似步骤，利用式 (1) 中 r_d 的概率密度函数，可得$\mathbb{E}[\ln r_d]$：

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[\ln r_d] &= \int_0^{r_d^{max}} \ln r_d \frac{2r_d}{(r_d^{max})^2} dr_d\\ &= \ln r_d^{max} - \frac{1}{2}.\end{aligned} \tag{49}$$

接下来，对于式 (48) 中的第二项，按以下步骤可得 $\sum_{i\in\Phi_D}\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}]$ 。 r_i 表示泊松点过程的节点间距离，其服从广义贝塔分布[36]。 r_i 的 $-\alpha$阶矩为

$$\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}] = \begin{cases}\dfrac{R^{-\alpha}\Gamma(N_D+1)\Gamma(i-\frac{\alpha}{2})}{\Gamma(i)\Gamma(N_D+1-\frac{\alpha}{2})}, & \alpha<2\\ \infty, & \alpha\geq 2\end{cases} \tag{50}$$

其中， $R=\sqrt{\frac{N_D}{\pi\lambda_D}}$ 是等效小区半径， N_D 是D2D用户的数量。当 α 取不同值时， r_i 的 $-\alpha$阶矩之和可表示为不同形式。

- 当 $\alpha<2$时， r_i 的矩之和为

$$\begin{aligned}\sum_{i\in\Phi_D}\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}] &= \frac{R^{-\alpha}\Gamma(N_D+1)}{\Gamma(N_D+1-\frac{\alpha}{2})}\sum_{i=1}^{N_D}\frac{\Gamma(i-\frac{\alpha}{2})}{\Gamma(i)}\\ &= \pi\lambda_D\frac{R^{2-\alpha}}{1-\frac{\alpha}{2}}\end{aligned} \tag{51}$$

其中，最后一步是由于以下事实 $\pi R^2\lambda_D = N_D$。

- 当 $\alpha>2$时， r_i 的矩变得无界，因为我们采用的路径损耗模型在距离很短时会失效。在每个接收机周围设置保护半径 d_0 ，即不允许距离接收机在 d_0 范围内的发射机进行传输。根据（51）， d_0范围内的干扰总和为 $\pi\lambda_D d_0^{2-\alpha}/(1-\frac{\alpha}{2})$。排除保护半径内的干扰后，我们有

$$\sum_{i\in\Phi_D}\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}] = \pi\lambda_D\frac{R^{2-\alpha}-d_0^{2-\alpha}}{1-\frac{\alpha}{2}}. \tag{52}$$

- 当 $\alpha=2$时，对（52）取极限可得

$$\sum_{i\in\Phi_D}\mathbb{E}[r_i^{-\alpha}] = 2\pi\lambda_D\ln\left(\frac{R}{d_0}\right). \tag{53}$$

将（49）、（51）、（52）和（53）代入（48），引理4得证。

参考文献

[1] M. Xiao、S. Mumtaz、Y. Huang、L. Dai、Y. Li、M. Matthaiou、G. K. Karagiannidis、E. Bj¨ornson、K. Yang 和 I. Chih-Lin，“面向未来移动网络的毫米波通信”，IEEE《精选通信领域期刊》，第35卷，第9期，第1909–1935页，2017年。[2] N. Cheng、F. Lyu、J. Chen、W. Xu、H. Zhou、S. Zhang 和 X. Shen，“大数据驱动的车载网络”，IEEE Network，第99期，第1–8页，DOI.10.1109/MNET.2018.1700460，2018年。[3] T. S. Rappaport、S. Sun、R. Mayzus、H. Zhao、Y. Azar、K. Wang、G. N. Wong、J. K. Schulz、M. Samimi 和 F. Gutierrez，“面向5G蜂窝网络的毫米波移动通信：必将成功！”IEEE Access，第1卷，第335–349页，2013年。[4] N. Cheng、H. Zhou、L. Lei、N. Zhang、Y. Zhou、X. Shen 和 F. Bai，“车载设备到设备底层通信的性能分析”，IEEE《车辆技术汇刊》，第66卷，5421，2017 6，5409 第 pp. – .[5] E. Bastug、M. Bennis 和 M. Debbah，“立足边缘：主动缓存在5G无线网络中的作用”，IEEE《通信杂志》，第52卷，第8期，第82–89页，2014年。[6] Y. Zhong、M. Haenggi、F. Zheng、W. Zhang、T. Q. Quek 和 W. Nie，“迈向可处理的超密集网络时延分析”，IEEE《通信杂志》，第55卷，第12期，第103–109页，2017年。[7] Q. Ye、W. Zhuang、L. Li 和 P. Vigneron，“面向全连接移动自组织网络的流量负载自适应媒体访问控制”，IEEE《车辆技术汇刊》，第65卷，第11期，第9358–9371页，2016年。[8] “移动边缘计算——技术白皮书简介”，欧洲电信标准协会，技术报告，2014年9月，访问于2017年3月27日。[在线]。网址：https: //portal.etsi.org/。[9] F. Lyu、H. Zhu、H. Zhou、W. Xu、N. Zhang、M. Li 和 X. Shen，“SS-MAC：一种用于车载自组织网络安全消息广播的新型时隙共享媒体接入控制”，IEEE《车辆技术汇刊》，第67卷，3597，2018 4，3586 第 pp. – .[10] T. G. Rodrigues、K. Suto、H. Nishiyama 和 N. Kato，“通过虚拟机迁移和发射功率控制，在边缘云计算中最小化服务时延的混合方法”，IEEE《计算机汇刊》，第66卷，第5期，第810–819页，2017年。[11] T. G. Rodrigues、K. Suto、H. Nishiyama、N. Kato 和 K. Temma，“通过发射功率控制和虚拟机迁移实现可扩展移动边缘计算的云端小站激活方案”，IEEE《计算机汇刊》，第67卷，第9期，第1287–1300页，2018年。[12] Y. Zhou、F. R. Yu、J. Chen 和 Y. Kuo，“面向信息中心化虚拟异构网络的资源分配：网内缓存与移动边缘计算”，IEEE《车辆技术汇刊》，第66卷，第12期，第11 339–11 351页，2017年。[13] J. Liu、H. Nishiyama、N. Kato 和 J. Guo，“支持设备到设备通信的多信道蜂窝网络的中断概率：基于RSS阈值的视角”，IEEE《精选通信领域期刊》，第34卷，第1期，第163–175页，2016年。[14] W. Song、Y. Zhao 和 W. Zhuang，“利用设备到设备通信进行协作式数据分发的稳定设备配对”，IEEE《物联网期刊》，第5卷，第2期，第1251–1264页，2018年。[15] Z. Zhou、K. Ota、M. Dong 和 C. Xu，“支持D2D的蜂窝网络资源分配的能效匹配”，IEEE《车辆技术汇刊》，第66卷，第6期，第5256–5268页，2017年。[16] M. Ji、G. Caire 和 A. F. Molisch，“无线单跳缓存网络的吞吐量-中断折衷”，IEEE《信息论汇刊》，第61卷，第12期，第6833–6859页，2015年。[17] R. Wang、J. Zhang、S. Song 和 K. B. Letaief，“D2D网络中的移动性感知缓存”，IEEE《无线通信汇刊》，第16卷，第8期，第5001–5015页，2017年。[18] N. Zhao、X. Liu、Y. Chen、S. Zhang、Z. Li、B. Chen 和 M. S. Alouini，“小蜂窝网络中的D2D连接缓存”，IEEE《车辆技术汇刊》，DOI：10.1109/TVT.2018.2877645，2018年。[19] Z. Chen、J. Lee、T. Q. Quek 和 M. Kountouris，“以集群为中心的小蜂窝网络中的协作缓存与传输设计”，IEEE《无线通信汇刊》

，第16卷，第5期，第3401–3415页，2017。

[20] S. Zhang、P. He、K. Suto、P. Yang、L. Zhao 和 X. Shen，“以用户为中心的集群移动网络中的协作边缘缓存”，*IEEE*《移动计算汇刊》，第 17 卷，第 8 期，第 1791–1805 页，2018。[21] S. Zhang、N. Zhang、P. Yang 和 X. Shen，“移动异构网络中的经济高效缓存部署”，*IEEE*《车辆技术汇刊》，第 66 卷，第 12 期，第 11 264–11 276 页，2017。[22] J. Xu、K. Ota 和 M. Dong，“在边缘节能：多层异构网络的内存缓存”，*IEEE*《通信杂志》，第 56 卷，第 5 期，第 102–107 页，2018。[23] X. Zhao、P. Yuan、H. Li 和 S. Tang，“上下文感知设备到设备网络中的协作边缘缓存”，*IEEE*《车辆技术汇刊》，第 67 卷，第 10 期，第 9583–9596 页，2018。[24] P. Yang、N. Zhang、S. Zhang、L. Yu、J. Zhang 和 X. Shen，“面向位置感知移动边缘缓存的内容流行度预测”，*IEEE*《多媒体汇刊》，DOI 10.1109/TMM.2018.2870521，2018。[25] W. Song 和 W. Zhuang，“资源约束下的分组分配与 D2D 通信”，*IEEE*《网络》，第 60 卷，第 5 期，第 54–30 页，2016。[26] O. Semiari、W. Saad、M. Bennis 和 B. Maham，“缓存与毫米波通信相结合，提升 5G网络中的移动性管理”，*IEEE*《无线通信汇刊》，第 17 卷，第 2 期，第 779–793 页，2018。[27] M. Ji、G. Caire 和 A. F. Molisch，“无线设备到设备缓存网络：基本原理与系统性能”，*IEEE*《通信领域精选期刊》，第 34 卷，第 1 期，第 176–189 页，2016。[28] N. Giatsoglou、K. Ntontin、E. Kartsakli、A. Antonopoulos 和 C. Verik- oukis，“毫米波蜂窝网络中的 D2D感知设备缓存”，*IEEE*《通信领域精选期刊》，第 35 卷，第 9 期，第 2025–2037 页，2017。[29] Y. Zhong、T. Q. Quek 和 X. Ge，“具有时空流量的异构蜂窝网络：时延分析与调度”，*IEEE*《通信领域精选期刊》，第 35 卷，第 6 期，第 1373–1386 页，2017。[30] S. Singh、R. Mudumbai 和 U. Madhow，“高度定向60 GHz网状网络的干扰分析：重新思考介质访问控制的理由”，*IEEE/ACM*《网络汇刊》，第 19 卷，第 5 期，第 1513–1527 页，2011。[31] G. R. MacCartney 和 T. S. Rappaport，“毫米波无线通信的农村宏蜂窝路径损耗模型”，*IEEE*《通信领域精选期刊》，第 35 卷，第 7 期，第 1663–1677 页，2017。[32] W. Wu、Q. Shen、K. Aldubaikhy、N. Cheng、N. Zhang 和 X. Shen，“利用波束成形增强边缘：支持波束成形的无线局域网性能分析”，载于*IEEE WiOpt* 会议论文集，2018。[33] T. Bai 和 R. W. Heath，“毫米波蜂窝网络的覆盖与速率分析”，*IEEE*《无线通信汇刊》，第 14 卷，第 2 期，第 1100–1114 页，2015。[34] S. M. Yu 和 S. L. Kim，“蜂窝网络中的下行容量与基站密度”，载于*IEEE WiOpt* 会议论文集，2013，第 119–124 页。[35] M. Haenggi、J. G. Andrews、F. Baccelli、O. Dousse 和 M. Franceschetti，“用于无线网络分析与设计的随机几何和随机图”，*IEEE*《通信领域精选期刊》，第 27 卷，第 7 期，第 1029–1046 页，2009。[36] S. Srinivasa 和 M. Haenggi，“有限均匀随机网络中的距离分布：理论与应用”，*IEEE*《车辆技术汇刊》，第 59 卷，第 2 期，第 940–949 页，2010。[37] W. Wu、Q. Shen、M. Wang 和 X. Shen，“IEEE 802.11.ad 下行混合波束成形的性能分析”，载于*IEEE ICC* 会议论文集，2017。