

基于势博弈的负载已知超密集网络用户关联算法

于佳¹, 梁亚超², 顾术实¹, 王野¹

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)电子与信息工程学院, 广东 深圳 518055; 2. 鹏城实验室网络通信研究中心, 广东 深圳 518055)

摘要: 针对采用多点协调传输技术的异构超密集网络, 提出了基于势博弈的负载已知用户关联算法。负载已知用户关联算法可在满足用户服务质量需求的前提下均衡基站负载, 避免宏基站过载, 同时可有效提升网络吞吐量。该算法适用于对数据传输速率有一定要求的物联网应用场景, 仿真实验验证了算法的有效性。

关键词: 超密集网络; 多点协调; 负载已知; 用户关联

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00090

Load-aware user association algorithm based on potential game theory for UDN with CoMP

YU Jia¹, LIANG Yachao², GU Shushi¹, WANG Ye¹

1. School of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China

2. Network and Communication Research Centre, Pengcheng Laboratory, Shenzhen 518055, China

Abstract: A load-aware user association (LAUA) algorithm based on potential game theory for ultra dense network (UDN) with coordinated multi-point (CoMP) transmission technique was proposed. LAUA algorithm was capable to balance the load of base stations on the premise of satisfying users' demand for quality of service, avoid over loading problem in heterogeneous UDN. This algorithm was applicable to the Internet of things application scenario that required uploading video data and other data transmission rates. The effectiveness of the proposed algorithm was proved by the simulation experiment.

Key words: ultra dense network, coordinated multi-point, load-aware, user association

1 引言

思科公司预测, 到 2021 年全球月均 IP 业务量将达 278 EB, 其中, 超过 63% 的业务量来自 Wi-Fi 和移动通信系统^[1]。此外, 随着物联网应用的发展, 网络接入设备的数量出现爆炸式增长。爱立信公司在白皮书^[2]中预测, 到 2020 年移动通信系统需要满足的设备连接数量为 250 亿, 业界期望通过第五代移动通信系统 (5G) 实现万物互联。为了满足移动数据流量和接入量的需求, 移动通信系统需要从时、频、空、码等多维度扩展资源以提升资源利用率。超密集网络 (UDN, ultra dense network) 是充

分利用空间资源提升移动通信系统整体性能的有效手段^[3-4], 其基本思想是: 在大功率宏基站的覆盖范围内增加大量小功率基站, 以补充宏小区覆盖的不足, 提升目标覆盖区域内的接入量和流量密度, UDN 被视为 5G 的关键技术之一^[5]。

UDN 缩短了基站间距, 导致小区间干扰加剧, 尤其是当宏基站和小功率基站工作在相同频段时。采用频率复用方法可以有效避免小区间干扰, 但极大地降低了覆盖区域内的频谱利用率, 不符合移动通信系统的发展方向; 另一种可以有效对抗小区间干扰的技术是多点协调 (CoMP, coordinated multi-point) 传输技术^[6], 该传输技术允许多个基站通

收稿日期: 2019-02-20; 修回日期: 2019-03-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61701136, No.61831008, No.61525103)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61701136, No.61831008, No.61525103)

过相互协调为处于小区边缘的用户服务，以期达到降低干扰、增强信号以及提升边缘用户数据速率的目的。联合传输（JT, joint transmission）是 CoMP 传输技术的主要类型之一，JT CoMP 中与边缘用户关联的多个基站在相同的时频上为用户传输数据，利用空间多样性提升数据传输的质量和速率。本文出现的 CoMP 传输技术，如无特殊说明均指 JT CoMP。

在移动通信系统中，用于传输的无线资源有限，因此每个基站在一个传输周期内可承载的用户数量有限。如在 LTE 系统中，频谱资源被分割成资源块（RB, resource block），每个 RB 的带宽为 180 kHz。假设基站使用 20 Mbit/s 带宽，即共有 100 个 RB。如果每个用户为满足服务质量（QoS, quality of service）需求至少需要 2 个 RB，则基站服务的用户数不能超过 50 个。若超过 50 个，则将有一部分用户不能获得满足 QoS 需求的服务。传统的用户关联方法是：用户基于接收的参考信号，选择强度最大的基站进行关联，此方法执行简单，在同构网络中效率较高。在异构网络中，由于宏基站的发射功率比低功率小基站的发射功率大得多，使得用户倾向于与宏基站关联，从而导致宏基站负载过重，无法满足用户的 QoS 需求，而靠近用户的低功率小基站负载较轻甚至空载。上述负载不均衡现象严重影响了 UDN 的性能，小区扩展（CRE, cell range expansion）偏置^[7]，可提高用户选择小功率基站的概率。相比于传统基于参考信号接收功率（RSRP, reference signal receiving power）的方法，CRE 可有效均衡基站负载，且实现简单。CRE 已被 3GPP 引入 LTE-A 技术标准中，但由于无线网络环境是时变的，自适应设置 CRE 的偏置成为难题。

在物联网中，由于接入设备数量庞大，如果在用户关联过程中不考虑基站负载均衡，则容易引起部分基站超载，从而影响网络的正常运行。针对采用 CoMP 传输技术的异构 UDN，提出基于势博弈的负载已知用户关联（LAUA, load-aware user association）算法，该算法能在保障用户 QoS（即数据速率）的前提下平衡基站负载，从而避免发生过载现象。本文所提算法适用于有一定数据速率要求的物联网应用场景，如有视频数据上传需求的场景。该算法同时也适用于非物联网应用场景，因此下文提到的用户既可以表示移动用户，也可以表示物联网设备。

2 系统模型

本文考虑一个两层的异构网络，第一层包括 M_a 个大功率宏基站构建的宏小区，其中，宏基站均匀分布，每个宏基站的覆盖区域可等效为六边形；第二层由大量随机分布的微基站构成，微基站的位置服从泊松点过程（PPP, Poisson point process）模型，密度为 λ_{BS} 。为了准确模拟现实情况，在随机生成微基站位置时，要求其到宏基站的最小距离大于给定值 d_{min} 。宏基站与微基站共同构成的基站集合记为 \mathcal{S}^{BS} ，网络中的用户位置服从 PPP 模型，密度为 λ_{UE} 。令 \mathcal{S}^{UE} 表示用户集合， K 表示集合中用户的数量。基于 CoMP 技术的 UDN 如图 1 所示。

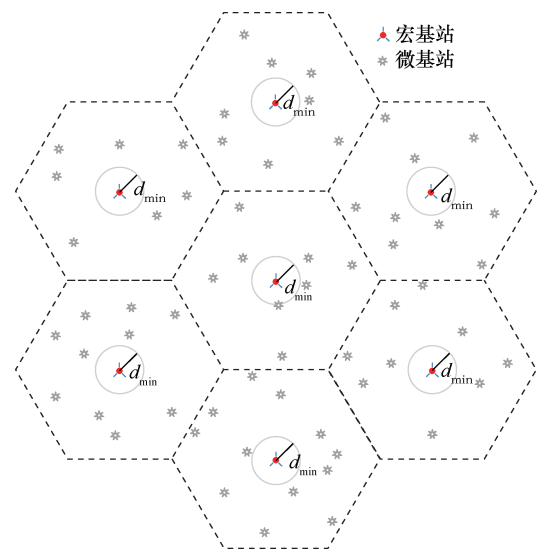


图 1 基于 CoMP 技术的 UDN

在移动通信系统中，进行无线传输前需要进行用户关联，即决定用户应与哪个基站建立连接。在异构网络中，基于参考信号强度的用户关联方法容易导致基站负载不均衡，影响网络性能。同时，采用 CoMP 技术对抗小区间干扰需要为小区边缘用户选择多个基站进行关联，需要更灵活的用户关联方法。控制面和用户面分离的思想为灵活的用户关联奠定了基础，在控制面，用户可基于参考信号强度选择一个信道条件最好的基站进行控制信令交互。一方面，控制信令数据量小，不会导致基站超载；另一方面，因为信道质量较高，不易产生断网情况，用户可得到连续的可靠服务。在用户面，系统能以更灵活的方式为用户选择传输数据（用户面）的基站，达到均衡负载、提高网络整体性能的目的，本文的用户关联算法即针对用户面基站的选择。

假设用户 u 通过用户关联算法获得的传输基站集合表示为 Ω_u^{BS} 。用 $\alpha_{u,b} \in \{0,1\}$ 表示用户 u 与基站 b 之间得到的关联结果, $\alpha_{u,b} = 1$ 表示用户 u 与基站 b 关联, 基站 b 将为用户 u 传输数据; $\alpha_{u,b} = 0$ 表示用户 u 与基站 b 不关联。由此, 用户 u 的 Ω_u^{BS} 可表示为

$$\Omega_u^{\text{BS}} = \{b \mid \forall b, \alpha_{u,b} = 1\} \quad (1)$$

采用 JT CoMP 传输技术时, Ω_u^{BS} 中基站为用户 u 进行数据传输获得的信干噪比 (SINR, signal-to-interference and noise ratio) 可表示为

$$\gamma_u = \frac{\sum_{b \in \Omega_u^{\text{BS}}} p_b |h_{u,b}|^2}{\sum_{b' \in \Omega^{\text{BS}} / \Omega_u^{\text{BS}}} p_{b'} |h_{u,b'}|^2 + \sigma^2} = \frac{\sum_{b \in \Omega_u^{\text{BS}}} \alpha_{u,b} p_b |h_{u,b}|^2}{\sum_{b' \in \Omega^{\text{BS}}} (1 - \alpha_{u,b'}) p_{b'} |h_{u,b'}|^2 + \sigma^2} \quad (2)$$

其中, $h_{u,b}$ 表示基站 b 与用户 u 之间的信道系数, σ^2 表示白噪声的功率谱密度, p_b 表示基站 b 在每 RB 上的发射功率。假设基站将总发射功率均匀分配给每个 RB, 则有 $p_b = P_b^{\text{Tot}} / N_{\text{RB}}$, 其中, P_b^{Tot} 为基站 b 的总发射功率。根据基站类型不同, 则取值也不同, N_{RB} 表示基站的 RB 总数。

令 β_u 表示用户 u 占用的 RB 数量, 则用户 u 的速率可表示为

$$R_u = \beta_u W \log(1 + \gamma_u) = \beta_u W \log \left(1 + \frac{\sum_{b \in \Omega_u^{\text{BS}}} \alpha_{u,b} p_b |h_{u,b}|^2}{\sum_{b' \in \Omega^{\text{BS}}} (1 - \alpha_{u,b'}) p_{b'} |h_{u,b'}|^2 + \sigma^2} \right) \quad (3)$$

其中, W 表示每个 RB 的带宽, γ_u 由式(2)定义。

由式(2)可以看出, 对于单一用户来说, Ω_u^{BS} 中包含的基站数量越多, 则数据传输的质量越好。实际上, 与用户距离远的基站对提升 SINR 的贡献较小, 而进行基站间协调需要信令开销。因此, 在 CoMP 传输系统中会限定每个用户传输基站集合的维度。假设每个用户选择的传输基站不能超过 C_{max} 个, 即

$$\sum_{b \in \Omega_u^{\text{BS}}} \alpha_{u,b} \leq C_{\text{max}} \quad (4)$$

3 LAUA 问题建模

以最大化吞吐量为目标, 考虑每个基站的总带宽限制, 用户关联问题可建模为以下优化问题

$$\begin{aligned} \max_{\{\beta_u\}, \{\alpha_{u,b}\}} \quad & \sum_{u \in \Omega^{\text{UE}}} \beta_u W \log(1 + \gamma_u) \\ \text{s.t.} \quad & \text{C1} \quad \alpha_{u,b} \in \{0,1\}, \forall u, b \\ & \text{C2} \quad \sum_{b \in \Omega^{\text{BS}}} \alpha_{u,b} \leq C_{\text{max}}, \forall u \\ & \text{C3} \quad \beta_u \in \{0,1,2, \dots, N_{\text{RB}}\}, \forall u \\ & \text{C4} \quad \sum_{u \in \Omega^{\text{UE}}} \alpha_{u,b} \beta_u \leq N_{\text{RB}}, \forall b \\ & \text{C5} \quad \beta_u W \log(1 + \gamma_u) \geq R_u^{\text{req}}, \forall u \end{aligned} \quad (5)$$

其中, R_u^{req} 表示用户 u 的 QoS 需求 (即对数据速率的需求)。在式(5)中, C1 表示用户关联系数 $\alpha_{u,b}$ 是一个比特数; C2 表示每个用户的传输基站不超过 C_{max} 个; C3 表示 β_u 是小于 N_{RB} 的非 0 整数; C4 表示每个基站为其关联用户分配的 RB 总数不能超过 N_{RB} ; C5 表示用户关联和 RB 分配的结果必须满足用户的 QoS 需求。

从式(5)定义的用户关联问题可以看出, 用户关联与 RB 分配有关联。在进行用户关联时, 必须考虑每个基站的频谱资源是否可以承载与其关联的用户, 而 CoMP 技术的引入进一步增加了复杂度。由于采用 CoMP 技术, 一个用户可能同时与多个基站关联, 用户可获得的 RB 个数受限于其传输集合中负载最重的基站。如用户 u 的传输集合 $\Omega_u^{\text{BS}} = \{2, 4, 9\}$, 其中, 每个基站可分配给用户 u 的 RB 数量分别为 1、2、2, 为确保 Ω_u^{BS} 中基站实现 CoMP 传输, 用户 u 只可获得 1 个 RB。

令 Ω_b^{BS} 表示与基站 b 关联的用户构成的集合, 即 $\Omega_b^{\text{UE}} = \{u \mid u \in \Omega^{\text{UE}}, \text{且} \alpha_{u,b} = 1\}$, $|\Omega_b^{\text{UE}}|$ 为与基站 b 关联的用户数量。对于用户 u , 其传输集合中负载最重的基站承载的用户数量为

$$M_u = \max_{b \in \Omega_u^{\text{BS}}} |\Omega_b^{\text{UE}}| \quad (6)$$

则用户 u 可获得的 RB 数量可估计为

$$\beta_u = \left\lfloor \frac{N_{\text{RB}}}{M_u} \right\rfloor \quad (7)$$

4 基于势博弈的 LAUA 算法

针对式(5)定义的优化问题, 提出了基于势博弈

的 LAUA 算法。

在前文描述的异构网络中, 每个用户根据具体的信道状态可产生多个备选的关联策略。令 $s_{i,u}$ 表示用户 u 的第 i 个关联策略, 其中, $s_{i,u}$ 是由基站 ID 组成的集合, 根据式(4), 有 $|s_{i,u}| \leq C_{\max}$ 。用户 u 的策略集可表示为 $S_u = \{s_{i,u}, i=1, \dots, N_u^S\}$, 其中, N_u^S 表示用户 u 满足条件的用户关联策略总数。

令 $s_{*,u}$ 表示某次用户关联中用户 u 最终选定的策略, 则集合 $A = \{s_{*,u}, \forall u \in \Omega^{\text{UE}}\}$ 可表示一次用户关联的结果。

假设用户 u 根据前一次 (前一次迭代或者前一个传输周期) 的用户关联结果 A 选择当前策略, 则 M_u 是关于 A 和用户 u 的关联策略相关函数, 即 $M_u(s_{i,u}, A_{-u})$ 。其中, $A_{-u} = \{s_{*,k}, \forall k \in \Omega^{\text{UE}}, \text{且 } k \neq u\}$, 即除用户 u 外其他用户的关联结果。用 $A_{i,u} = \{s_{i,u}, A_{-u}\}$ 表示当用户 u 选择策略 $s_{i,u}$ 时, 网络的用户关联结果。用户 u 采用策略 i 时可获得的数据速率为

$$R_u(A_{i,u}) = W \left[\frac{N_{\text{RB}}}{M_u(\{s_{i,u}, A_{-u}\})} \right] \log(1 + \gamma_u(s_{i,u})) \quad (8)$$

$$\gamma_u(s_{i,u}) = \frac{\sum_{b \in s_{i,u}} p_b |h_{u,b}|^2}{\sum_{b' \in \Omega^{\text{BS}}/s_{i,u}} p_{b'} |h_{u,b'}|^2 + \sigma^2} \quad (9)$$

上述 UDN 由用户集合 Ω^{UE} 和基站 (包括宏基站、微基站) 集合 Ω^{BS} 构成, 因此用户关联的博弈模型可定义为

$$G = \{\Omega^{\text{UE}}, \{S_u\}_{u \in \Omega^{\text{UE}}}, \{v_u\}_{u \in \Omega^{\text{UE}}}\} \quad (10)$$

其中, S_u 表示用户的策略集合, v_u 表示用户 u 的本地决策函数。

将用户 u 的本地决策函数 v_u 定义为

$$v_u(A_{i,u}) = R_u(A_{i,u}) - R_u^{\text{req}} + \sum_{k \neq k} (R_k(A_{i,u}) - R_k^{\text{req}}) \quad (11)$$

令 $U(A_{i,u})$ 表示由式(5)定义的优化问题的总效用函数, 即 $U(A_{i,u}) = \sum_{k=1}^K R_k(A_{i,u})$ 。可以证明

$$v_u(A_{i',u}) - v_u(A_{i,u}) = U(A_{i',u}) - U(A_{i,u}) \quad (12)$$

式(12)说明上述博弈模型满足势博弈条件, 势博弈是由 Shapely 等于 1996 年提出的非合作博弈模

型^[8]。势博弈的有限递增属性确保了纳什均衡的存在, 在应用中无需对均衡解的存在性进行求证。另外, 根据势博弈的特点, 在对势博弈问题进行求解时既可采用集中式方法, 也可采用分布式方法。根据文献[9], 势博弈可通过最大化本地决策函数达到纳什均衡。因而, 可通过对每个用户选择最大化 v_u 的策略求解式(5)定义的用户关联问题, 即

$$\begin{aligned} \max_{s_{i,u} \in S_u} \quad & v_u(A_{i,u}) \\ \text{s.t.} \quad & A_{i,u} = \{s_{i,u}, A_{-u}\} \end{aligned} \quad (13)$$

证明过程如式(14)和式(15)所示。

$$\begin{aligned} v_u(A_{i',u}) - v_u(A_{i,u}) &= R_u(A_{i',u}) - R_u^{\text{req}} + \\ & \sum_{k'=1, k' \neq u}^K (R_{k'}(A_{i',u}) - R_{k'}^{\text{req}}) - \\ & \left[R_u(A_{i,u}) - R_u^{\text{req}} + \sum_{k'=1, k' \neq u}^K (R_{k'}(A_{i,u}) - R_{k'}^{\text{req}}) \right] = \\ & R_u(A_{i',u}) - R_u(A_{i,u}) + \sum_{k'=1, k' \neq u}^K R_{k'}(A_{i',u}) - \sum_{k'=1, k' \neq u}^K R_{k'}(A_{i,u}) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} U(A_{i',u}) - U(A_{i,u}) &= \sum_{k=1}^K R_k(A_{i',u}) - \sum_{k=1}^K R_k(A_{i,u}) = \\ & R_u(A_{i',u}) + \sum_{k'=1, k' \neq u}^K R_{k'}(A_{i',u}) - R_u(A_{i,u}) - \sum_{k'=1, k' \neq u}^K R_{k'}(A_{i,u}) \end{aligned} \quad (15)$$

当网络中存在能够统筹全局的中心计算单元时, 可通过集中式算法达到纳什均衡。集中式算法更有利于获得最优解, 从而得到较好的系统性能, 但其计算复杂度高、计算消耗和时延较大。

上述博弈模型也可以采用分布式算法进行求解, 分布式算法虽然降低了系统性能, 但能够有效降低计算量和计算时延。下面分别介绍集中式 LAUA(LAUA-C)算法和分布式 LAUA(LAUA-D)算法。

4.1 LAUA-C 算法

在 LAUA-C 算法中, 每个用户选择策略的过程是非独立的。每个用户根据式(13)选择最优策略后, 将相应地更新用户关联结果 A 。更新后的 A 将作为下一个用户进行策略选择的输入, 按顺序对用户进行策略选择后, 判断当前的用户关联结果 A 是否满足收敛条件, 如果不满足收敛条件, 则需要重新对每个用户进行策略选择。LAUA-C

算法流程如图 2 所示。

4.2 LAUA-D 算法

在 LAUA-D 算法中，每个用户选择策略的过程相互独立，策略判决所需的全局用户关联结果 A 可

由历史结果代替。显然，该简化会导致系统性能下降，但计算复杂度可大幅度降低。仿真结果表明，LAUA-D 系统性能的下陷程度是可以接受的，LAUA-D 算法流程如图 3 所示。

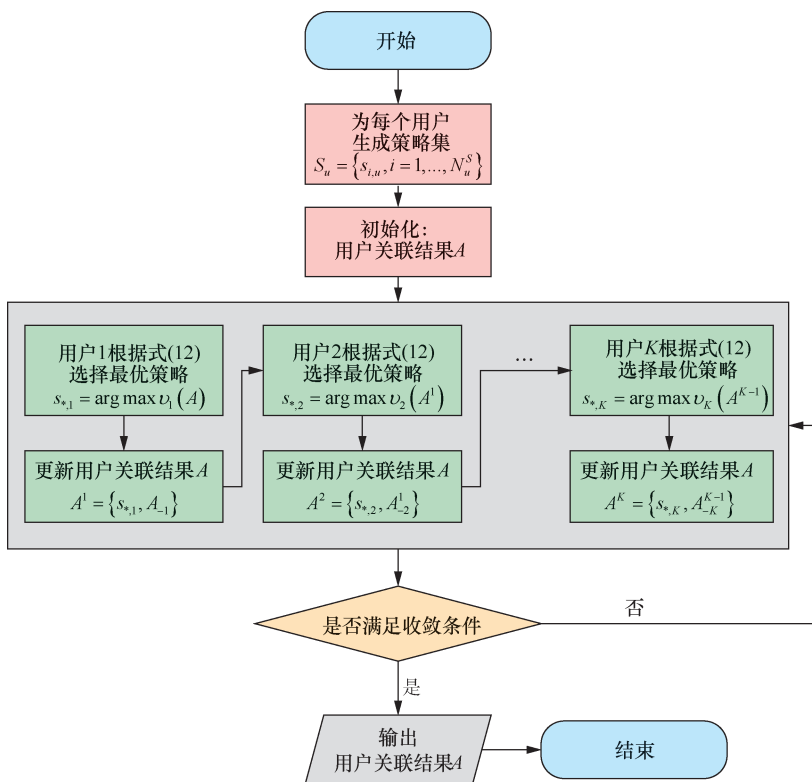


图 2 LAUA-C 算法流程

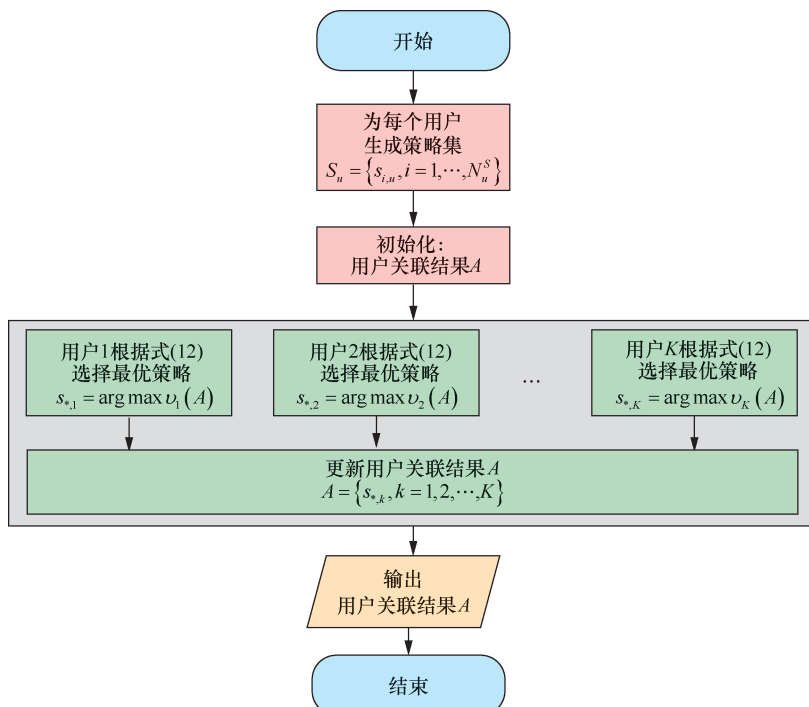


图 3 LAUA-D 算法流程

5 仿真实验及结果分析

仿真考虑一个两层的异构网络, 宏基站数量为 7 个, 呈半径为 500 m 的六边形结构, 宏基站发射功率为 20 W。微基站以密度为每平方千米有 40 个微基站的 PPP 模型随机分布 (大约每个宏小区内有 30 个微基站), 同时保持与宏基站的最小距离大于 35 m。微基站发射功率为 5 W。用户密度同样服从 PPP 模型, 密度为每平方千米有 200 个用户 (大约每个宏小区内有 130 个用户)。本文关注的 QoS 为数据传输速率, 仿真设置用户的最小数据速率为 1 Mbit/s。仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

类型	参数	参数值
宏基站	分布模型	均匀分布; 小区半径为 500 m
	数量	7
	发射功率	20 W
微基站	分布模型	PPP 模型 与宏基站最小距离大于 35 m
	密度	40 个微基站/km ²
	发射功率	5 W
用户	分布模型	PPP 模型
	密度	200 个用户/km ²
	频率	中心频率 2.0 GHz RB 带宽 180 kHz RB 数量 100 个
QoS 需求	最小数据速率	1 Mbit/s

为了对比不同算法的性能, 对基于参考信号强度的用户关联算法 (以下简称 “RSRP 算法”) 和 CRE 算法进行了仿真, 其中, CRE 算法的偏置值设置为 6 dB。LAUA 算法中的策略集选择可以基于 RSRP 算法, 也可以基于 CRE 算法。基于 RSRP 算法的 LAUA 算法包括 LAUA-C 算法和 LAUA-D 算法; 基于 CRE 算法的 LAUA 算法包括 LAUA-C&CRE 算法和 LAUA-D&CRE 算法。图 4 为各算法用户数据速率的 CDF 对比, 由图 4 可以看出, LAUA-C 算法和 LAUA-C&CRE 算法得到的用户数据速率优于其他算法。LAUA-D 算法和 LAUA-D&CRE 算法的用户数据速率与 LAUA-C 算法相比有小幅度下降, 其中 LAUA-D 算法中有少量用户数据速率没有达到 QoS 需求, LAUA-D&CRE 算法与 CRE 算法的用户数据速率结果相近。RSRP 算法中有大量用户

无法获得满足 QoS 需求的数据速率。

图 5 所示是各算法获得的网络吞吐量对比。由图 5 可以看出, 相比于 RSRP 算法, CRE 算法明显提升了网络吞吐量, 而 LAUA-C 算法又在 CRE 算法的基础上进一步提高了网络吞吐量, LAUA-D 算法获得的吞吐量与 CRE 算法接近。

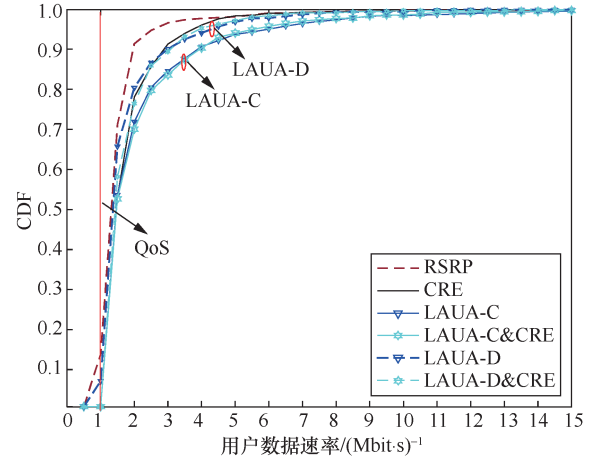


图 4 各算法用户数据速率的 CDF 对比

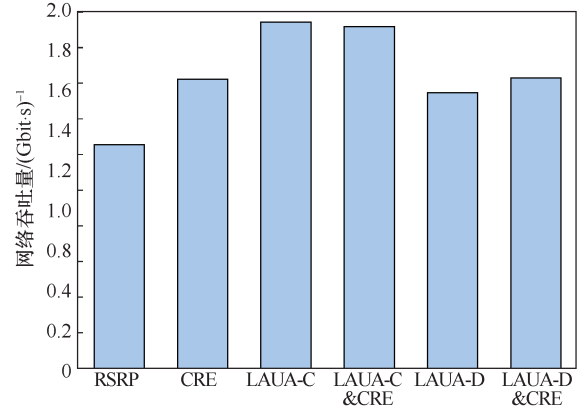


图 5 各算法获得的网络吞吐量对比

为了量化负载均衡的情况, 定义负载系数, 令集合 $L = \{l_b, \forall b \in \Omega^{\text{BS}}\}$ 表示网络中基站的负载情况, 其中, $l_b = \sum_{u=1}^K \alpha_{u,b}$, 即与基站 b 关联的用户数量, 则负载系数定义为

$$\eta_{\text{load}} = \sqrt{\text{var}(L)} / \bar{L} \quad (16)$$

由式(16)可知, η_{load} 越小, 则表示每个基站承载的用户数量越平均。当所有基站的负载相同时, 则 η_{load} 为 0。

各算法负载系数对比如表 2 所示, 其中, LAUA-D&CRE 算法的负载系数最小, 表示基站间

的负载最均衡；RSRP 算法的负载系数最大，表示基站间的负载偏差最大。LAUA-D 算法的负载系数较大，但 LAUA-D&CRE 算法的负载系数与 LAUA-C 算法相近。

各算法性能综合对比如表 3 所示。从表 3 中可以看出，计算复杂度低的 RSRP 算法获得的网络性能最差，不适用于环境复杂的 UDN 场景。相比于 RSRP 算法，CRE 算法在吞吐量和负载均衡等方面均有提升。但是，CRE 算法无法保证全部用户都能获得满足 QoS 需求的服务。LAUA-C 算法和 LAUA-C&CRE 算法可以获得显著的吞吐量和较高的负载均衡。但由于其计算复杂度高，因而只适用于计算能力强、对吞吐量和负载均衡要求较高但对网络时延要求低的场景。作为一种折中方法，LAUA-D 算法和 LAUA-D&CRE 算法能够在保证较高性能的基础上降低算法复杂度，特别是 LAUA-D&CRE 算法，其计算复杂度适中且能达到较好的负载均衡效果。因而，LAUA-D 算法和 LAUA-D&CRE 算法的应用场景更广泛。

表 2 各算法负载系数对比

算法名称	负载系数
RSRP	0.593 4
CRE	0.432 8
LAUA-C	0.424 5
LAUA-C&CRE	0.417 8
LAUA-D	0.450 1
LAUA-D&CRE	0.416 0

表 3 各算法性能综合对比

算法名称	吞吐量	负载均衡	复杂度
RSRP	低	低	低
CRE	中	中	低
LAUA-C	高	高	高
LAUA-C&CRE	高	高	高
LAUA-D	中	中	中
LAUA-D&CRE	中	高	中

6 结束语

针对采用 CoMP 传输技术的异构 UDN，提出基于势博弈的 LAUA 算法，能够在满足用户 QoS 需求的基础上实现负载均衡，同时提升网络吞吐量。LAUA 算法分为 LAUA-C 算法和 LAUA-D 算

法，可适用于不同的网络需求。仿真结果表明，LAUA 算法在吞吐量和负载均衡方面均优于 RSRP 算法和 CRE 算法。

参考文献:

- [1] Ericsson. Cellular networks for massive IoT[S]. White Paper, 2016.
- [2] CISCO. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update[S]. 2016
- [3] LOPEZ-PEREZ D, DING M, CLAUSSEN H, et al. Towards 1 Gbit/s/UE in cellular systems: understanding ultra-dense small cell deployments[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015: 1.
- [4] BHUSHAN N, LI J, MALLADI D, et al. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 82-89.
- [5] ANDRES J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [6] 3GPP. Further advancements for E-UTRA physical layer aspects[R]. 3GPP Technical Specification TR, 2010.
- [7] QUALCOMM. Importance of serving cell selection in heterogeneous networks[R]. 3GPP, R1-010701, 2010.
- [8] MONDERER D, SHAPLEY L S. Potential games[J]. Games and Economic Behavior, 1996, 14(1): 124-143.
- [9] LIU L, ZHOU Y, GARCIA V, et al. Load aware joint CoMP clustering and inter-cell resource scheduling in heterogeneous ultra dense cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3): 2741-2755.

[作者简介]



于佳(1985-)，女，黑龙江双鸭山人，博士，哈尔滨工业大学(深圳)博士后，主要研究方向为 5G 网络规划及资源优化。



梁亚超(1989-)，男，黑龙江齐齐哈尔人，鹏城实验室网络通信研究中心算法工程师，主要研究方向为 5G 物理层通信协议和资源优化。

顾术实(1986-)，男，黑龙江哈尔滨人，博士，哈尔滨工业大学(深圳)博士后，主要研究方向为卫星 IoT、分布式存储系统和分布式编码。

王野(1983-)，男，黑龙江佳木斯人，博士，哈尔滨工业大学(深圳)助理教授、硕士生导师，主要研究方向为认知无线网络、5G 和移动互联网。