

• 通信与信息工程 •



基于最优加权多属性决策的LWA 网络接入点选择算法

申 滨*, 徐 浪, 周晓勇, 闫 伟

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 南岸区 400065)

【摘要】为了应对LWA网络下eNB和AP大量密集部署,用户需求难以充分满足的现状,该文提出一种基于最优加权多属性决策(OWMAD)的LWA网络接入点选择算法。该算法预先收集接入点属性并建立属性集合,然后设计决策属性的最优权重,将决策矩阵与最优权重向量叠加,最后根据各个接入点综合性能的计算结果确定用户可选择的最佳网络接入点。仿真结果表明,该算法不仅能有效提升边缘地区及系统整体的吞吐量,还能够降低系统平均时延,提升用户的服务质量。

关键词 LWA; 网络接入点选择; 最优权重多属性决策; 吞吐量

中图分类号 TN929.5 文献标志码 A doi:10.12178/1001-0548.2019110

LWA Network Access Point Selection Algorithm Based on Optimal Weighted Multi-Attribute Decision

SHEN bin*, XU Lang, ZHOU Xiao-yong, and YAN Wei

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications Nanan Chongqing 400065)

Abstract For the purpose of coping with the intensive deployment of eNB (evolved NodeB) and AP (access point) in LWA (LTE WLAN aggregation) networks, and a situation in which the user is unable to satisfy their needs, this paper proposes an access point selection algorithm for LWA networks based on optimal weighted multi-attribute decision (OWMAD). First, the algorithm pre-collects the access point attributes and establishes the attribute set, then designs the optimal weights of the decision attributes and overlays the decision matrix with the optimal weight vector. Finally, the optimal network access point is determined according to the results of the comprehensive performance of each access point. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively improve the throughput of peripheral areas and the overall system, while reducing the average system delay and improving the user's quality of service.

Key words LWA; network access point selection; OWMAD; throughput

近年来,移动数据业务量伴随着物联网等产业的快速发展呈现出爆炸式增长,业界提出了诸如大规模MIMO、毫米波通信、密集异构蜂窝网络等新技术,力求提升网络系统容量和数据传输速率^[1-3]。目前,LTE网络负载剧增,IEEE 802.11无线局域网(WLAN)成为补充LTE网络的有效解决方案。LWA网络通过利用WLAN网络中大量部署的AP来传输LTE网络的部分数据,以达到减轻eNB负载的目的^[4]。LWA被认为是提高系统容量与用户体验移动数据速率有效的技术之一^[5-6]。

LWA网络在带来技术优势的同时,也迎来了

一系列的问题与挑战^[7]。当LWA网络中需要服务的UE较多时,这些UE并不一定都能获得由eNB提供的可靠的服务质量(quality of service, QoS)。此时,若UE仍然保持蜂窝连接通信,则会给eNB造成严重负担,使得UE可能分配不到足够的资源,造成通信质量下降。为此,LWA网络接入点选择技术可以选择性能更佳的潜在接入点进行业务连接,从而有效地减轻eNB的负载,为UE提供理想的QoS^[8-9]。

针对网络接入点选择技术,文献[10]提出一种将LTE与WLAN网络的系统吞吐量归一化的方

收稿日期:2019-04-23;修回日期:2020-01-09

基金项目:国家自然科学基金(61571073)

作者简介:申滨(1978-),男,博士,教授,主要从事认知无线电、MIMO、机器学习、异构网络融合和车联网等方面的研究。E-mail: shenbin@cqupt.edu.cn

法, 该方法根据带宽比值建立了 KKT(Karush Kuhn Tucker) 条件, UE 可根据 KKT 值对 LTE 与 WiFi 技术做出排他性选择。用户体验质量 (quality of experience, QoE) 从微观方面能较好地体现异构网络的系统性能。为了让 UE 获得较好的 QoE, 文献 [11] 提出一种异构网络下基于 QoE 的接入点选择算法, 该算法利用层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 计算出事先收集的用户偏好属性的主观权重, 将归一化的属性向量与权重向量结合, 经过加权迭代计算出 UE 对异构网络中所有接入点的满意度, 并与满意度最高的接入点连接。然而该算法只将与用户 QoE 有关的性能指标纳入了考量范围, 没有考虑系统吞吐量。文献 [12] 提出了一种同时兼顾用户 QoE 与系统吞吐量的接入点选择算法。该算法构建了用来衡量各个接入点性能的奖励函数, 奖励函数值越大代表选择对应接入点所带来的系统性能越好。虽然此方法带来了系统性能的提升, 满足了用户一定程度的需求, 却没有考虑小区边缘用户的吞吐量及 QoE。文献 [13] 提出了一种考虑小区边缘用户的基于聚合小区的接入点选择算法。该算法应用层次分析法进行多属性决策的建模, 综合考量接入点的用户偏好值与信号质量, 最后选择性能最佳的网络接入点进行连接。该方案虽然能够提高包含边缘用户在内的整个系统的吞吐量以及用户的 QoE, 但可能面临大量用户接入相同的接入点, 增加 eNB 负载的问题。

综上所述, 本文提出一种基于最优加权多属性决策 (OWMAD) 的 LWA 网络接入点选择算法, 以期解决网络接入点选择技术目前面临的一些问题。设计了针对决策属性的最优权重的计算方法, 通过计算接入点的所有归一化属性的总加权值, UE 选择加权值最小即性能最优的接入点进行连接。由于 LWA 网络的每个接入点的容量各不相同、参考信号接收功率 (reference signal received power, RSRP) 的强度大小不一、时延不稳定且有长有短, 这些因素会使接入点性能产生差异, 进而影响到 LWA 网络的系统吞吐量以及用户的 QoS。因此, 为了达到系统吞吐量与用户 QoS 的综合提升, 本文所提方案选取容量、RSRP、时延 3 个性能指标构成决策方案的属性集。首先, 每个接入点对应属性集的属性值信息由网络端事先从 eNB 和 AP 收集并保存下来, 并生成包含所有待选接入点及其属性值的决策矩阵; 其次, 对接入点选择方案的决策矩阵进行规

范化处理, 设计并求解针对决策属性的最优权重; 最后, 获取每个 eNB 和 AP 属性加权后的总加权值, 并选择出拥有最小加权值的 eNB 和 AP, 同时使 UE 与这两个网络接入点执行连接策略。仿真结果表明, 本文所提的 LWA 网络接入点选择算法不仅能对传统 LTE 网络的 eNB 负载进行有效分流, 并且能显著提升包含边缘 UE 吞吐量在内的整个网络的系统吞吐量, 同时不会增大系统的平均时延, 将其维持在一个较低的水平。

1 系统模型

1.1 网络模型

图 1 为 LWA 网络的场景示意图。图中外围实线所围区域代表网络中 eNB 的覆盖范围, 虚线所围区域代表 AP 能够覆盖的范围。正如图中 eNB 与 AP 之间的连接线所示, LWA 网络场景下的 eNB、AP、UE 之间的连接模式为特有的双连接相互连接模式, 即一个 eNB 能够连接多个 AP, 一个 AP 也能够连接多个 eNB, UE 可以选择与某一个 eNB 或者 AP 单独连接, 也可以选择同时与 eNB、AP 保持连接。eNB 和 AP 连接采用被 3GPP 定义为 Xw 的只适用于此两者相连的接口。

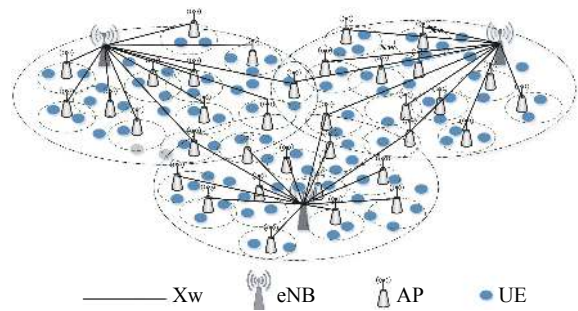


图 1 网络场景图

根据 3GPP 和 WLAN 的无线互操作标准, 在 LWA 网络下 eNB 和 AP 的部署与管理需要由相同的服务提供商 (service provider, SP) 提供, 而蜂窝网络与 WLAN 网络也要采用对应的 LTE 标准和 IEEE 802.11n 标准。由于 LTE 网络与 WLAN 网络工作的载波频率相差较大, 且两者采用的协议技术存在不同, 因此本文忽略异构网络干扰问题, 主要考虑 LTE 小区之间的同频干扰。

针对 LWA 网络下 UE 与 eNB、AP 之间双连接模式的特点, 本文具体设计选择 eNB 与 AP 两种连接模式下的接入点选择方案。假设 eNB 总数为

N_L , WLAN AP 基站总数为 N_W , 用户总数为 K , 设置 eNB 和 AP 的待选集分别为 $S_L = \{b_1, b_2, \dots, b_{N_L}\}$ 、 $S_W = \{e_1, e_2, \dots, e_{N_W}\}$, 其中 b_i 表示第 i 个 eNB, 且 $i \in \{1, 2, \dots, N_L\}$; e_j 表示第 j 个 WLAN AP, 且 $j \in \{1, 2, \dots, N_W\}$; 设 UE_k 表示第 k 个 UE, 且 $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 。

为了更好地表示 LWA 网络中 UE、eNB 和 AP 的相连关系, $c_{i,j,k}$ 表示 UE_k 同时与 b_i 和 e_j 连接所获得的吞吐量, C_{sum} 表示系统内所有 UE 的吞吐量总和。建立优化目标如下:

$$\max(C_{\text{sum}}) = \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} \sum_{k=1}^K c_{i,j,k} \quad (1)$$

由于使用不同网络的无线接入技术, 由此可对优化目标分解为:

$$\sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} \sum_{k=1}^K c_{i,j,k} = \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{k=1}^K c_{i,k} + \sum_{j=1}^{N_W} \sum_{k=1}^K c_{j,k} \quad (2)$$

式中, $c_{i,k}$ 表示 UE_k 与 LWA 网络中的 b_i 连接所获吞吐量; $c_{j,k}$ 表示 UE_k 与 WLAN 网络中的 e_j 连接所获吞吐量。

UE_k 与 b_i 连接所获吞吐量为:

$$c_{i,k} = B_L \log_2(1 + \gamma_{b_i,k}) \quad (3)$$

式中, B_L 代表 UE_k 占用的 LTE 网络信道带宽; $\gamma_{b_i,k}$ 为 UE_k 选择 LTE 网络的 SINR 值:

$$\gamma_{b_i,k} = \frac{P_{b_i} G_{b_i,k}}{\sum_{b_j \neq b_i} P_{b_j} G_{b_j,k} + N_0 B_L} \quad (4)$$

式中, P_{b_i} 表示 LTE 网络中 b_i 的发射功率; $G_{b_i,k}$ 表示 b_i 与 UE_k 之间的信道增益, 此信道增益包含阴影衰落与路径损耗; N_0 表示噪声功率谱密度。

WLAN 网络下, UE 使用 IEEE 802.11 协议规定的竞争方式传输数据, 导致彼此间易发生碰撞, 因此采用分布式点协调功能机制来应对。 UE_k 与 e_j 连接所耗的平均传输时长为^[13-14]:

$$E[T_{st}] = \frac{\text{Pr}_{tr} \text{Pr}_s (1 - \text{Pr}_f) T_s + \text{Pr}_{tr} (1 - \text{Pr}_s) T_c + \text{Pr}_{tr} \text{Pr}_s \text{Pr}_f T_e + (1 - \text{Pr}_{tr}) T_\delta}{\text{Pr}_{tr} \text{Pr}_s (1 - \text{Pr}_f) T_s + \text{Pr}_{tr} (1 - \text{Pr}_s) T_c + \text{Pr}_{tr} \text{Pr}_s \text{Pr}_f T_e + (1 - \text{Pr}_{tr}) T_\delta} \quad (5)$$

式中, T_s 、 T_c 、 T_e 、 T_δ 分别表示传输成功、发生碰撞、传输错位和空闲时隙的平均时长; Pr_{tr} 表示站点正在传输的概率; Pr_s 表示站点传输成功的概率:

$$\text{Pr}_{tr} = 1 - (1 - \tau)^{N_W} \quad (6)$$

$$\text{Pr}_s = N_W \tau (1 - \tau)^{N_W - 1} / \text{Pr}_{tr} \quad (7)$$

式中, τ 表示一个站点发生一次的概率。

UE_k 在 WLAN 网络下获取的吞吐量表示为:

$$c_{j,k} = \frac{\text{Pr}_{tr} \text{Pr}_s (1 - P_f) E[L] / N_W}{\text{Pr}_{tr} \text{Pr}_s (1 - \text{Pr}_f) T_s + \text{Pr}_{tr} (1 - \text{Pr}_s) T_c + \text{Pr}_{tr} \text{Pr}_s \text{Pr}_f T_e + (1 - \text{Pr}_{tr}) T_\delta} \quad (8)$$

1.2 问题公式化

对于 LWA 网络下接入点选择的多属性决策方案必须考虑几个方面: 1) 具体应由 LTE 还是 WLAN 网络来做出中心化选择决策是未知的; 2) 根据方案特点需要在 LTE 网络的 eNB 一侧设置网络端即网络中心选择器; 3) 网络端与接入点信息交互产生的额外时延不能忽略。

为了达到系统吞吐量与用户 QoS 的综合提升, 本文选取了容量、RSRP、时延作为决策属性, 设计了一种基于最优加权多属性决策 (OWMAD) 的 LWA 网络接入点选择算法, 并设计了关于系统吞吐量的总体效用函数, 表示如下:

$$\max \sum_{i,j,k} U(C_{i,j,k}) \quad (9)$$

式中, $C_{i,j,k}$ 表示 LWA 网络中 UE_k 与 b_i 和 e_j 相连接所获得的总吞吐量; $U(\cdot)$ 表示与总吞吐量相关的效用函数。

LWA 网络适用于同时被 eNB 小区及 AP 小区覆盖到的 UE。设 $q=1$ 表示采取 LWA 相关操作; $q=0$ 表示不采取 LWA 相关操作。 $b_{ij}=0$ 表示 UE 只选择 WLAN 网络中的 AP; $b_{ij}=1$ 表示 UE 同时选择 WLAN 网络中的 AP 与 LTE 网络中 eNB。基于以上表述, 可以将整个网络覆盖区域划分为 3 个区域, 即 $B_0 = \{(i, j) | q=0\}$ 、 $B_1 = \{(i, j) | q=1, b_{i,j}=0\}$ 和 $B_2 = \{(i, j) | q=1, b_{i,j}=1\}$ 。其中, B_0 代表不采取 LWA 操作的区域, 此区域的 UE 直接与可提供服务的 eNB 连接, 不进行接入点选择; B_1 、 B_2 代表采取 LWA 操作的区域, B_1 区域的 UE 只对 AP 进行接入选择; B_2 区域的 UE 可同时选择 eNB 和 AP 进行连接。式 (9) 可简化为:

$$C_{i,j,k} = \begin{cases} c_{i,k} & \text{if } (i, j) \in B_0 \\ c_{i,k} + c_{j,k} W_{j,k} & \text{if } (i, j) \in B_1 \\ c_{i,k} W_{i,k} + c_{j,k} W_{j,k} & \text{if } (i, j) \in B_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $c_{i,k}$ 表示 UE_k 与 b_i 连接获取的吞吐量; $c_{j,k}$ 表示 UE_k 与 e_j 连接获取的吞吐量; $W_{i,k}$ 表示 LWA 网络下 UE_k 与 b_i 连接对应的增益系数; $W_{j,k}$ 表示 UE_k 与 e_j 连接对应的增益系数。

2 基于 OWMAD 接入点选择算法

2.1 多属性决策及属性集

多属性决策是现代决策科学的一个重要组成部分,其实质是通过一定方式,利用获取的决策信息对有限的待选方案进行排序或择优。每个决策问题主要包含 5 个重要因素:决策方案、决策者、决策属性的属性值、属性权重、决策矩阵。决策属性的选取与方案最终目的有直接关系,对于 LWA 网络下的接入点选择方案来说,接入点性能是影响属性集的直接因素。因此,为了达到系统吞吐量与用户 QoS 的综合提升,本文所提方案选取容量、RSRP、时延此 3 个决策属性构建接入点选择方案的属性集。

2.2 决策矩阵及其规范化

LWA 网络包含 LTE 网络与 WLAN 网络,两种网络下的接入点选择带来的综合性能存在差异,因此,本方案分别针对不同的网络接入点构造决策矩阵。假设 LTE 网络下 eNB 的属性集包含 M_L 个属性, WLAN 网络下 AP 的属性集包含 M_W 个属性。所有 eNB 及其属性值对应的决策矩阵表示为 $\mathbf{A}_{N_L \times M_L}$, 所有 AP 及其属性值对应的决策矩阵表示为 $\mathbf{A}_{N_W \times M_W}$ 。有:

$$\mathbf{A}_{N_L \times M_L} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1l} & \cdots & a_{1M_L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{il} & \cdots & a_{iM_L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N_L1} & \cdots & a_{N_Ll} & \cdots & a_{N_LM_L} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{A}_{N_W \times M_W} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1p} & \cdots & a_{1M_W} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{j1} & \cdots & a_{jp} & \cdots & a_{jM_W} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N_W1} & \cdots & a_{N_Wp} & \cdots & a_{N_WM_W} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中,决策矩阵 $\mathbf{A}_{N_L \times M_L}$ 的元素 a_{il} 表示 b_i 的属性 l 的属性值;决策矩阵 $\mathbf{A}_{N_W \times M_W}$ 的元素 a_{jp} 表示 e_j 的属性 p 的属性值。决策属性单位不同,需要对属性值即决策矩阵的列进行规范化处理。对于决策矩阵 $\mathbf{A}_{N_L \times M_L}$ 的列向量 $\mathbf{A}_l = [a_{1l}, a_{2l}, \dots, a_{N_Ll}]^T$, 应用式 (13) 对其元素进行规范化处理得到规范化矩阵 $\mathbf{R}_{N_L \times M_L}$; 对于决策矩阵 $\mathbf{A}_{N_W \times M_W}$ 的列向量 $\mathbf{A}_p = [a_{1p}, a_{2p}, \dots, a_{N_Wp}]^T$, 应用式 (14) 对其元素进行规范化处理得到规范化矩阵 $\mathbf{R}_{N_W \times M_W}$ 。

$$r_{il} = \frac{a_{il} - a_l^{\min}}{a_l^{\max} - a_l^{\min}} \quad (13)$$

$$r_{jp} = \frac{a_{jp} - a_p^{\min}}{a_p^{\max} - a_p^{\min}} \quad (14)$$

式中, a_l^{\min} 表示决策矩阵 $\mathbf{A}_{N_L \times M_L}$ 第 l 列中属性值最小的元素; a_l^{\max} 表示决策矩阵 $\mathbf{A}_{N_L \times M_L}$ 第 l 列中属性值最大的元素; a_p^{\min} 表示决策矩阵 $\mathbf{A}_{N_W \times M_W}$ 第 p 列中属性值最小的元素; a_p^{\max} 表示决策矩阵 $\mathbf{A}_{N_W \times M_W}$ 第 p 列中属性值最大的元素。

$$\mathbf{R}_{N_L \times M_L} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1l} & \cdots & r_{1M_L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{i1} & \cdots & r_{il} & \cdots & r_{iM_L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{N_L1} & \cdots & r_{N_Ll} & \cdots & r_{N_LM_L} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{R}_{N_W \times M_W} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1p} & \cdots & r_{1M_W} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{j1} & \cdots & r_{jp} & \cdots & r_{jM_W} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{N_W1} & \cdots & r_{N_Wp} & \cdots & r_{N_WM_W} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中,针对 LTE 网络的规范化决策矩阵 $\mathbf{R}_{N_L \times M_L}$ 中的元素 r_{il} 为 b_i 的属性 l 得到规范化处理后的值;针对 WLAN 网络的规范化决策矩阵 $\mathbf{R}_{N_W \times M_W}$ 中的元素 r_{jp} 为 e_j 的属性 p 得到规范化处理后的值。

2.3 最优权重确定

属性权重能够体现属性在属性集中的变异程度,接入点选择方案的属性权重对接入点的综合性能有决定性影响。设 LTE 网络下 eNB 的各属性权重值为 ω_l , 构成权重向量 $\omega_L = [\omega_1, \dots, \omega_l, \dots, \omega_{M_L}]^T$; WLAN 网络下 AP 的各属性权重值为 ω_p , 构成权重向量 $\omega_W = [\omega_1, \dots, \omega_p, \dots, \omega_{M_W}]^T$ 。为了获取与接入点具有最大相关性的权重,构造与属性值相关的目标函数 g_+^L 与 g_+^W :

$$g_+^L = \sum_{l=1}^{M_L} (1 - r_{il}) \omega_l^2 \quad i \in \{1, 2, \dots, N_L\} \quad (17)$$

$$g_+^W = \sum_{p=1}^{M_W} (1 - r_{jp}) \omega_p^2 \quad j \in \{1, 2, \dots, N_W\} \quad (18)$$

$$\sum_{l=1}^{M_L} \omega_l = 1, \quad \sum_{p=1}^{M_W} \omega_p = 1 \quad (19)$$

式中, ω_l 表示 eNB 的第 l 个属性的权重; ω_p 表示

AP的第 p 个属性的权重。为得到LTE与WLAN网络的最优权重向量 $\omega_L^+ = [\omega_1^+, \dots, \omega_l^+, \dots, \omega_{M_L}^+]^T$ 及 $\omega_W^+ = [\omega_1^+, \dots, \omega_p^+, \dots, \omega_{M_W}^+]^T$, 构造关于目标函数的拉格朗日函数, 如下式:

$$L(\omega_L, \xi_1) = \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{l=1}^{M_L} (1 - r_{il}) \omega_l^2 + 2\xi_1 \left(\sum_{l=1}^{M_L} \omega_l - 1 \right) \quad (20)$$

$$L(\omega_W, \xi_2) = \sum_{i=1}^{N_W} \sum_{p=1}^{M_W} (1 - r_{ip}) \omega_p^2 + 2\xi_2 \left(\sum_{p=1}^{M_W} \omega_p - 1 \right) \quad (21)$$

式中, $L(\omega_L, \xi_1)$ 表示与eNB的属性 ω_l 有关的拉格朗日函数; $L(\omega_W, \xi_2)$ 表示与AP的属性 ω_p 有关的拉格朗日函数; ξ_1 和 ξ_2 为拉格朗日函数的修正因子。对拉格朗日函数进行求解即可得最优权重 ω_l^+ 和 ω_p^+ :

$$\omega_l^+ = \left[\sum_{i=1}^{N_L} \left(N_L - \sum_{i=1}^{N_L} r_{il} \right)^{-1} \right]^{-1} \left(N_L - \sum_{i=1}^{N_L} r_{il} \right)^{-1} \quad l \in \{1, 2, \dots, M_L\} \quad (22)$$

$$\omega_p^+ = \left[\sum_{i=1}^{N_W} \left(N_W - \sum_{j=1}^{N_W} r_{jp} \right)^{-1} \right]^{-1} \left(N_W - \sum_{j=1}^{N_W} r_{jp} \right)^{-1} \quad p \in \{1, 2, \dots, M_W\} \quad (23)$$

2.4 最优方案

为了有效选出性能最佳的接入点, 定义 UE_k 可选择的各个接入点的最优方案加权性能值, 如下式:

$$f_+^l = [f_{l,1}, f_{l,2}, \dots, f_{l,N_L}]^T = \mathbf{R}_{N_L \times M_L} * \omega_L^+ \quad (24)$$

$$f_+^w = [f_{w,1}, f_{w,2}, \dots, f_{w,N_W}]^T = \mathbf{R}_{N_W \times M_W} * \omega_W^+ \quad (25)$$

式中, f_+^l 表示LTE网络下的网络接入点加权值向量; $\mathbf{R}_{N_L \times M_L}$ 表示LTE网络规范化决策矩阵; f_+^w 表示WLAN网络下的网络接入点加权值向量; $\mathbf{R}_{N_W \times M_W}$ 表示WLAN网络规范化决策矩阵。

2.5 基于OWMAD网络接入点选择算法

假设网络端已事先将各个接入点的属性值保存下来, UE可以同时与LWA网络中的eNB、AP以及网络端建立连接。UE在网络活动的过程中, 周期性地将其提供服务的eNB、AP的RSSI和SSID信息上报给网络端。当UE遇到单一的eNB和AP, 无需执行上报过程; 若遇到单一的eNB和多个AP, 则只需上传AP的RSRP及SSID信息。设定LTE网络eNB初始集合 S_L^* , 具体上报信息反馈时序如图2所示。

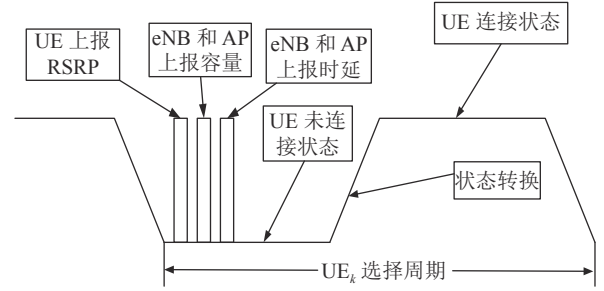


图2 网络接入点选择时序图

根据上述分析, 基于OWMAD的网络接入点选择算法的具体步骤如下:

1) 网络端根据UE反馈的相关信息确定当前接入点, 选择周期内能够分别满足式(26)与式(27)的可供选择的eNB集合 S_l^k 以及AP集合 S_w^k :

$$R_{b_i,k} < R_{th}^l \text{ and } C_{b_i} < C_{th}^l \quad (26)$$

$$R_{e_j,k} < R_{th}^w \text{ and } C_{e_j} < C_{th}^w \quad (27)$$

式中, $R_{b_i,k}$ 表示LTE网络下 UE_k 接收的 b_i 的信号RSRP值; R_{th}^l 表示 UE_k 允许接收的LTE网络信号的最小RSRP值; $R_{e_j,k}$ 表示WLAN网络下, UE_k 接收的 e_j 的信号RSRP值; R_{th}^w 表示 UE_k 允许接收的WLAN网络信号最小的RSRP值; C_{b_i} 表示LTE网络下 b_i 的现有容量; C_{th}^l 表示 b_i 的容量阈值; C_{e_j} 表示WLAN网络下 e_j 的现有容量; C_{th}^w 表示 e_j 的容量阈值。与此同时, 获取可供选择的eNB集合 S_l^k 和AP集合 S_w^k 。具体算法流程如下。

算法1 模式选择

输入: $R_{th}^l, R_{th}^w, S_L^*, C_{b_i}, C_{e_j}$

初始化: $S_w^* = \emptyset$

For $i=1 : 1 : N_L$

If $R_{b_i,k} < R_{th}^l$ and $C_{b_i} < C_{th}^l$

$S_l^* = S_l^*/b_i$

Else

$S_l^* = S_l^*$;

For $i=1 : 1 : N_W$

If

$S_w^* = [S_w^*, e_j]$;

Else

$S_w^* = S_w^*$;

End For

End If

$S_l^k = S_l^*, S_w^k = S_w^*$;

End For

输出: $S_j^k; S_w^k$;

2) 网络端分别收集 eNB 与 AP 的备选子集 S_j^k 和 S_w^k 的属性值信息, 并利用式 (11) 和式 (12) 计算当前属性值的决策矩阵 $A_{N \times M}$, 利用式 (13) 和式 (14) 计算属性值, 得到规范化处理后的决策规范化矩阵 $R_{N \times M}$ (假设第 k 个 UE 进行选择, 由于 eNB 与 AP 的选择过程相同, 统一写成一个通式, 即式中 N 可以代表 M_L 也可以代表 N_W , M 可以代表 M_L 也可以代表 M_W)。

3) 利用式 (26) 和式 (27) 计算出当前网络接入点各属性的最优权重:

$$g_+ = \sum_{j=1}^M (1-r_{ij})\omega_j^2 \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (28)$$

$$L(\omega, \xi) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (1-r_{ij})\omega_j^2 + 2\xi \left(\sum_{j=1}^M \omega_j - 1 \right) \quad (29)$$

式中, r_{ij} 表示属性值规范化后的元素; $L(\omega, \xi)$ 表示构造的关于权重 ω_j 的拉格朗日函数。

4) 利用式 (30) 计算出备选子集中所有接入点的属性加权值。具体地, 通过将最优属性权重向量 $\omega_L = [\omega_1, \dots, \omega_j, \dots, \omega_M]^T$ 与规范化矩阵 $R_{N \times M}$ 叠加, 计算得到当前网络中的各个接入点的属性加权值, 即:

$$f_+ = [f_1, f_2, \dots, f_N]^T = R * \omega_+ \quad (30)$$

5) 基于步骤 4) 的计算结果, 将属性加权值排序以便对接入点实行选择判决。具体地, 利用式 (31) 选择出所有待选子集中性能最优的接入点以便后续接入, 算法详细流程如下。

算法 2 基于 OWMAD 接入点选择算法

输入: $R_{N \times M}; S_j^k; S_w^k$;

For $q=1 : 1 : Z$

利用式 (28) 和式 (29) 获得 ω_j^+ ;

$$g_+ = \sum_{j=1}^M (1-r_{ij})\omega_j^2;$$

$$L(\omega, \xi) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (1-r_{ij})\omega_j^2 + 2\xi \left(\sum_{j=1}^M \omega_j - 1 \right);$$

利用式 (30) 计算网络接入点性能值 f_+ ;

$$f_+ = [f_1, f_2, \dots, f_N]^T = R * \omega_+;$$

For $i=1 : 1 : N$

If $f_{i+1} < f$

$$b^* = b_{i+1};$$

Else

$$b^* = b_i;$$

End If

End For

End For

输出: b^*

$$b^* = \underset{i \in \{1, 2, \dots, N\}}{\operatorname{argmin}} (f_i) \quad (31)$$

最后, UK_k 选择 LWA 网络中属性加权值最小即性能最佳的网络接入点进行连接。具体地, 对 LTE 网络, UE 在集合 S_j^k 中选择性能最佳的接入点 b_j^* 进行连接; 对于 WLAN 网络, UE 在集合 S_w^k 中选择性能最佳的接入点 b_w^* 进行连接。

3 仿真验证与分析

3.1 仿真参数设置

考虑一个包含 3 个 LTE 宏小区 (仿真图中分别用三角形、圆形和星形表示), 每个 LTE 宏小区又包括 50 个 WLAN 网络小区的 LWA 异构网络, 且一个 AP 代表一个 WLAN 网络小区。假设 LWA 网络中所有 eNB 和 AP 的位置服从泊松分布, 且一直处于开启状态以保证网络的覆盖, UE 随机分布在 eNB 和 AP 的覆盖范围内。宏小区与 WLAN 网络小区的路径损耗模型分别为 P_{L_1} 与 P_{L_2} [13]:

$$P_{L_1} = 22.7 + 36.7 \log_{10}(d) + 26 \log_{10}(f_c) \quad (32)$$

$$P_{L_2} = 11.5 + 43.3 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f_c) \quad (33)$$

式中, d 表示 UE 与基站之间的距离, 单位为 km; f_c 为中心频率, 单位为 GHz。具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数	宏小区	AP小区
载波频率/GHz	2.5	5.7
带宽/MHz	20	20
发送功率/dBm	46	20
天线增益/dBI	14	5
覆盖范围/m	500	40
属性集	容量、RSSI、时延	
Loss Model	Uma/UMi	
N_0 /dBm·Hz ⁻¹	-174.0	
调度方式	Round Robin	

3.2 对比方案设置

本文设置 3 种方案进行仿真对比分析。方案一: 无 LWA 机制, 网络中仅有 LTE 网络 eNB 可接入的方案; 方案二: 有 LWA 机制, UE 随机选择 eNB 和 AP 进行连接的接入方案; 方案三: 有

LWA 机制, UE 采用本文所提基于 OWMAD 的网络接入点选择算法选择 eNB 和 AP 进行连接的方案。

3.3 仿真结果分析

图 3 为宏小区总吞吐量与 UE 数目的关系图。在不同 UE 数目的情况下, 方案二与方案三的系统总吞吐量均高于方案一。其原因在于 LWA 机制引入了 WLAN 网络从而增加了系统吞吐量。此外, 随着 UE 数目的增大, 网络中需要传输的数据增多, 3 个方案的系统吞吐量呈总体上升趋势, 且方案三的系统吞吐量的增量明显优于其他两个方案, 这表明所提的 OWMAD 网络接入点选择算法能有效提升系统吞吐量。

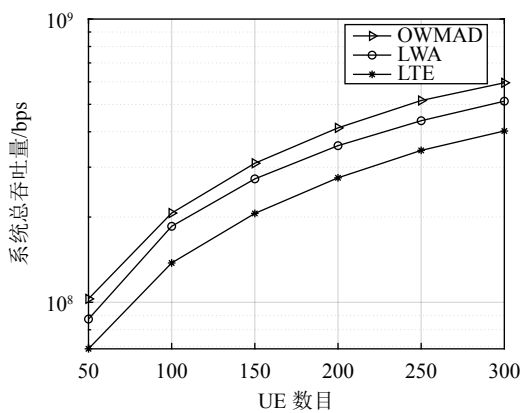


图 3 总吞吐量与 UE 数目的关系

图 4 为单个 UE 的吞吐量概率累积分布图。由图可见, 在任意宏小区内, 不同 UE 数目情况下, 方案三的单 UE 总吞吐量均高于另外两个方案。此外, 当概率分布为 0.7~0.76 时, 方案二中单 UE 的吞吐量优于方案一, 方案三中单 UE 的吞吐量优于方案二, 表明所提 OWMAD 网络接入点选择算法能有效提升单 UE 的吞吐量。

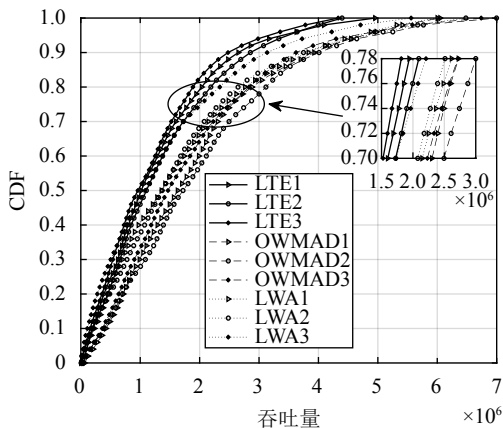


图 4 单个 UE 的吞吐量概率累积分布

图 5 为宏小区内单 UE 平均传输时延与 UE

数目关系图。由图可见, 不同 UE 数目的情况下, 方案二与方案三的平均传输时延均低于方案一。其原因在于 LWA 网络的下行传输中, 一部分资源可以由 AP 传输到 UE, 且 eNB 和 AP 能够同时将数据传输到 UE。此外, 方案三中 UE 的平均传输时延低于方案二, 这表明所提 OWMAD 网络接入点选择算法能有效减少宏小区内 UE 的平均传输时延。

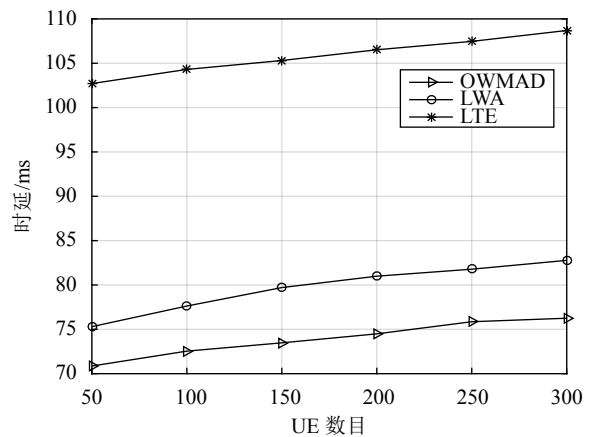


图 5 平均传输时延与 UE 数目的关系

图 6 为单个 UE 的时延概率分布图。由图可见, 任意宏小区内, 不同 UE 数目的情况下, 方案三单 UE 的时延值均低于另外两个方案。当概率分布为 0.5~0.55 时, 方案二中单 UE 的时延值较方案一减少明显, 方案三中单 UE 的时延值较方案二减少明显, 这表明所提 OWMAD 网络接入点选择算法能有效降低单 UE 的时延。在概率分布在 0.7~0.85 时, 方案二与方案三的对曲线发生了钝化现象, 其原因在于, 当 UE 数目较多时, 对于 LWA 网络下的个别部分区域的 UE 来说, 由于其所处部分区域内不存在更合适的可供选择的 AP 和 eNB 接入点, 其只能选择 LWA 网络整体覆盖范围内距其更远的接入点进行接入。此钝化现象亦能反映出 LWA 技术能够对 eNB 的负载进行分流, 有降低时延的技术优势。

图 7 为边缘用户的总吞吐量与 UE 数目 (宏小区 UE 数目) 的关系图。由图可见, 不同 UE 数目的情况下, 方案三与方案二的边缘 UE 总吞吐量均高于方案一。其根本原因在于, 在 LTE 覆盖网络的小区边缘, 若附近存在 WLAN 网络, WLAN 网络信号强度要明显优于 LTE 网络, 而 LWA 网络下对 WLAN 网络机制的引入使得边缘地区的 UE 可以选择更利于数据传输的 WLAN 网络接入点而不是相对更远的 eNB, 从而大大提升边缘地区 UE 的吞吐量, 并且不会牺牲非边缘用户的性能。此外,

随着 UE 数目及边缘地区 UE 数目的增加, 边缘地区 UE 的吞吐量也随之增加。在 UE 数目较大的情况下, 方案三的边缘地区 UE 吞吐量的增量明显优于方案一与方案二, 这表明所提 OWMAD 网络接入点选择算法能有效提升边缘地区的 UE 吞吐量。

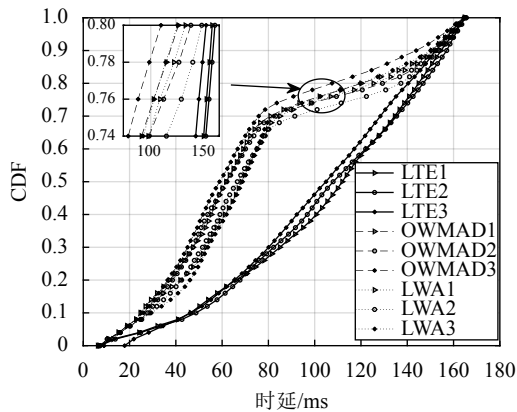


图 6 单个 UE 的时延概率累积分布

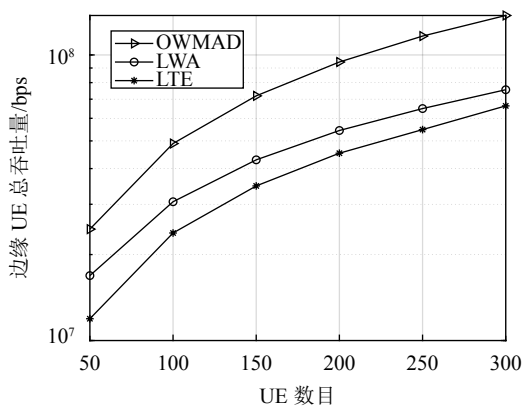


图 7 边缘总吞吐量与宏小区内 UE 数目的关系

4 结束语

在 LTE 网络与 WLAN 网络相融合的 LWA 网络下, 本文提出的基于 OWMAD 的 LWA 网络接入点选择方法选取了容量、RSRP、时延 3 个决策属性构建了接入点选择方案的属性集, 针对 eNB 与 AP 设计了具体的接入点选择方案。本文所提算法达到了系统吞吐量特别是边缘地区 UE 吞吐量与用户 QoS 的综合提升。相比于传统的 LTE 网络接入点选择方案以及 LWA 网络中随机选择接入点进行连接方案, 本文所提方案能够提高 LWA 网络的频谱利用率, 减轻 eNB 的负载, 保证 UE 的 QoS 需求。仿真结果验证了本文方案的有效性。

参 考 文 献

[1] BOGALE T E, LE L B. Massive MIMO and mmWave for 5G wireless HetNet: Potential benefits and challenges[J].

- IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(1): 64-75.
- [2] GE X, TU S, MAO G, et al. 5G ultra-dense cellular networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(1): 72-79.
- [3] HUR S, BAEK S, KIM B, et al. Proposal on millimeter-wave channel modeling for 5G cellular system[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(3): 454-469.
- [4] LING J, KANUGOVI S, VASUDEVAN S, et al. Enhanced capacity & coverage by Wi-Fi LTE integration[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 53(3): 165-171.
- [5] NUGGEHALI P. LTE-WLAN aggregation (Industry perspectives)[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(4): 4-6.
- [6] 施苑英, 张伽俐. 3GPP LTE/WLAN 无线融合技术研究进展[J]. 电讯技术, 2017, 57(9): 1092-1098.
SHI Wan-ying, ZHANG Jia-li. Research progress of LTE/WLAN radio level integration in 3 GPP standard[J]. Telecommunication Engineering, 2017, 57(9): 1092-1098.
- [7] FOTIADIS P, SOLDATI P, LEGG P. Design and evaluation of LTE/WLAN traffic steering and link aggregation algorithms[C]//Vehicular Technology Conference. [S.l.]: IEEE, 2017: 1-6.
- [8] Intel, Qualcomm. New WI proposal: LTE-WLAN radio level integration and interworking enhancements[DB/OL]. [2019-12-24]. <http://www.3gpp.org/>.
- [9] RAKESH S, SUNG W K, ROJEENA B, et al. LWA in 5G: State-of-the-Art architecture, opportunities, and research challenges[J]. IEEE Communications Magazine: Articles, News, and Events of Interest to Communications Engineers, 2018, 56(10): 134-141.
- [10] PANAH A Y, YEH S P, HIMAYAT N, et al. Utility-based radio link assignment in multi-radio heterogeneous networks[C]//GLOBECOM Workshops. [S.l.]: IEEE, 2013: 618-623.
- [11] 赵亚南, 朱晓荣. 基于用户体验的异构网络接入选择算法研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2014, 34(4): 72-78.
ZHAO Ya-nan, ZHU Xiao-rong. Access selection algorithm based on quality of experience in heterogeneous wireless networks[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Natural Science), 2014, 34(4): 72-78.
- [12] 郑娟. 无线网络中的接入点选择算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
ZHENG Juan. Research on access point selection algorithm in wireless network[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [13] 阚姗姗. LTE 与 WLAN 网络融合中业务分流机制的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
KAN Shan-lei. Traffic offloading in LTE and WLAN network integration system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [14] MARTIN H, FRANCK R, GILLES B S, et al. Performance anomaly of 802.11 b[C]//22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. [S.l.]: IEEE, 2003: 836-843.