



基于强化学习的 LTE 与 WiFi 异构网络共存机制

林粤伟^{1,2*}

(1. 青岛科技大学信息科学技术学院 山东 青岛 266061; 2. 海尔集团博士后工作站 山东 青岛 266000)

【摘要】 该文论述了 5G 异构无线网络中 LTE-U 与 WiFi 的共存机制, 提出基于 Q 学习的 LTE-U 空白子帧配置机制 (QL-ABS)。该机制使用排队论对 LTE-U 与 WiFi 共存的异构网络进行建模, 使用网络时延性能表征 Q 学习的输入状态。仿真结果表明, 通过自主学习过程, 该机制可在多业务不同负载条件下为 LTE-U 产生较为合理的空白子帧配置策略, 具有较好的在线学习性能。较传统方法, 该机制更好地解决了 LTE-U 与现有 WiFi 网络在非授权频带的共存问题, 提升了系统的时延和在线性能。

关键词 第五代移动通信; LTE-U; 排队论; 强化学习; WiFi
中图分类号 TN911.1 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2019303

Coexistence Mechanism of LTE and WiFi Based on Reinforcement Learning in Heterogeneous Networks

LIN Yue-wei^{1,2*}

(1. College of Information Science and Technology, Qingdao University of Science and Technology Shandong Qingdao 266061;
2. Postdoctoral Workstation of Haier Group Shandong Qingdao 266000)

Abstract The coexistence mechanism of LTE-U (long term evolution - unlicensed) and WiFi in 5G heterogeneous wireless networks is discussed. Q learning based – almost blank subframe (QL-ABS) configuration mechanism is proposed for LTE-U. In the mechanism, the queuing theory is used to model the heterogeneous network where LTE-U and WiFi coexist, and the network delay performance is used to represent the input state of Q-learning. The simulation results show that the proposed mechanism can generate a more reasonable almost blank subframe configuration strategy for LTE-U under multiple services and different load conditions through autonomous learning process, and therefore has better online learning performance. Compared with the traditional methods, the proposed mechanism better solves the problem of coexistence between LTE-U and existing WiFi network in the unlicensed frequency bands, and improves the overall delay and online performances of the networks.

Key words 5G; LTE-U; queuing theory; reinforcement learning; WiFi

随着无线通信技术的发展, LTE、5G、WiFi 等技术方兴未艾, 8K 视频、VR、AR 等新颖的高吞吐率、低时延业务需要更大的频谱带宽支持。现有频谱资源分为授权和非授权频带, 仅仅依靠授权频带已无法充分保证未来 4.5G、5G 高吞吐量业务的带宽 QoS 要求^[1]。载波聚合 (carrier aggregation, CA) 或频谱聚合是 LTE-Advanced 标准 R10 的一个重要特性, 通过将多个连续或非连续的载波 (频谱) 聚合成更大的带宽 (最大 100 MHz), 能够实现 100 MHz 的带宽内, 提供下行 1 Gbit/s、上行

500 Mbit/s 的速率^[2]。LTE 早期只专注于授权频段的聚合, 在 4.5G、5G 研究领域, 聚焦于授权与非授权频段的频谱聚合技术也被提出并得到广泛研究, 其中将 LTE 部署在非授权频段的技术称为 LTE-U (unlicensed)^[3-4], 使用的是低于 6 GHz 的非授权频段。毫米波频段 (如 60 GHz) 不在 LTE-U 的研究范围内, 有专门的技术对 LTE 在毫米波频段部署进行研究^[5]。

LTE-U 使用的 6 GHz 以内的非授权频段主要指 2.4 GHz 和 5.8 GHz 两个频段, 在这两个频段已

收稿日期: 2019-12-31; 修回日期: 2020-09-22

作者简介: 林粤伟 (1979-), 男, 博士, 副教授, 主要从事无线通信、嵌入式等方面的研究. E-mail: smgk@163.com

经部署有 WiFi、蓝牙、雷达等无线通信系统, LTE-U 作为后来者, 需要解决好 LTE 与现有无线通信网络 (尤其是 WiFi 网络) 之间的共存与干扰问题。主要有两种技术来解决非授权频段中的已有无线通信系统与 LTE-U 的共存干扰问题, 分别是: 基于 listen-before-talk(LBT)^[6-7] 和不基于 LBT(non-LBT)^[8] 的两类技术。LBT 类似于 WiFi 的 (carrier sense multiple access) CSMA/CA(载波侦听多址接入/冲突回避) 多址接入协议, 采用基于竞争的接入策略。LTE-U 在发送数据前需要先探测信道是否空闲以决定是否接入, 以降低 LTE-U 与 WiFi 的冲突概率。文献 [9] 使用基于 LBT 的方法处理多个 RAT 之间和 RAT 内部由于 LTE-U 与 WiFi 共存带来的干扰问题。在美国、中国、韩国、印度等国家, 并没有强制要求 LTE-U 必须实现 LBT 机制, 并且在 LBT 机制下两种无线通信系统都要检测信道, 频谱利用率降低。non-LBT 机制中, LTE-U 会周期性地静默一段时间, 在该段时间内不发送或几乎不发送数据, 从而使 WiFi 有更多机会发送数据。

文献 [10-11] 基于 non-LBT 方法处理了 LTE-U 和 WiFi 系统间的共存与干扰问题。文献 [10-12] 分别使用了基于空白子帧、duty-cycle、上行链路功率控制的方法, 都没有触及 ABS 空白子帧的比例问题。基于几乎空白子帧 (almost blank subframe, ABS) (下面简称空白子帧) 的方法是一种典型的 non-LBT 的 LTE-U 与 WiFi 在非授权频段的共存机制, 该机制最为重要的是如何确定空白子帧所占无线帧的比例, 以确保系统的公平性和性能。文献 [13] 使用频谱侦听的方法对一定区域内 WiFi AP 的数目进行估算, 进而提出了一种根据 LTE 基站周围 WiFi 热点的强度调整空白子帧数目的方法。文献 [14] 基于排队论模型研究了数据包的到达对 LTE-U 和 WiFi 的平均数据包时延的影响, 但没有提出具体的异构网络共存机制, 只是为 WiFi 和 LTE-U 的共存提供了一个指导准则。文献 [15-16] 研究了如何决定 ABS 空白子帧的比例以确保公平性, 但是没有考虑无线网络的业务量负载情况。文献 [17] 考虑了业务量负载情况, 但只研究了单一的业务 (FTP) 和吞吐量 QoS 指标, 没有考虑多业务场景和时延等技术指标。

本文针对基于 ABS 空白子帧的 LTE-U 小基站 (small BS/SBS) 与 WiFi AP 共存的场景, 提出了基于强化学习算法的智能化 LTE-U 与 WiFi 的共存机制, 考虑了无线网络的业务量负载情况, 能够提高

不同无线网络的时延性能, 进而提高系统的用户满意度。较已有的动态配置 ABS 空白子帧的算法, 提出的基于强化学习的 QL-ABS 算法能够较好地利用以往学习经验 (具有更好的在线性能), 后续决策可以利用先前学到的经验, 从而做出更为合理的配置决策, 提升系统的时延、在线性能及用户满意度。

1 系统模型

考虑由一个宏基站 (macro BS)、一个 LTE-U 小基站 (small BS/SBS)、一个 WiFi AP 组成的网络模型, 如图 1 所示。分别有 N_l 个 SBS 用户设备 (user equipment, UE) 和 N_w 个 WiFi 终端 (STA), LTE 基站可与 WiFi AP 进行协作式信息交互。在较低的授权频段, UE 的控制数据由宏基站发送, UE 的业务数据由小基站发送。小基站和 AP 共享公共的非授权频段, 由小基站配置空白子帧。LTE 帧长 10 ms, 包括 10 个 1 ms 的子帧, 不允许小基站在空白子帧期间发送数据。此时, 相应信道将为空闲状态, 并且可以被 WiFi AP 访问。本机制专注于确定空白子帧的数量, 当多个空白子帧为时间连续时, WiFi 可以获得更多的传输时间, 一旦确定了空白子帧的数量, n 帧的连续子帧就被指定为空白子帧。

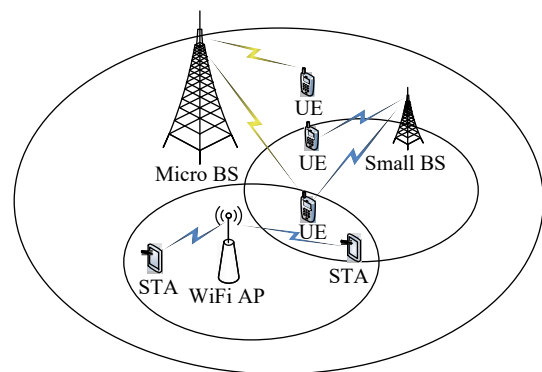


图 1 网络模型

对于非授权共享频段 (信道), 在时间域 WiFi AP 基于 CSMA/CA 的讲前听 (LBT) 的接入方式进行访问, LTE-U 小基站则使用 ABS 空白子帧的方式降低与 WiFi 的冲突概率。使用排队论对上述 WiFi AP 和 LTE-U 小基站的共享非授权无线频率的行为进行建模^[14, 18]。WiFi AP 和 LTE-U 小基站可以被看做两个互相独立的 $M/G/1$ 队列, 接收到的数据包被放入队列。如图 2 所示, 数据包的到达率服从强度为 λ_i ($i \in \{w, l\}$) 的泊松分布, 其中 λ_i 表示 LTE-U 或 WiFi 无线网络的业务负载强度。每个节

点 S 的数据包服务时间互相独立, 服从一般分布。以 $S_{i,o}$ 表示进行包传输的信道占用时间, $S_{i,o}$ 服从强度为 μ_i 的指数分布, $E[S_{i,o}] = 1/\mu_i$ 。以 $S_{i,v}$ 表示占用业务信道之前数据包在队列中的等待时间。 $S_{i,o}$ 和 $S_{i,v}$ 这两个时间之和即为数据包服务时间 (以 S_i 表示), 即:

$$S_i = S_{i,v} + S_{i,o} \quad (1)$$

使用平均包时延 D_i 作为衡量系统性能的指示参数。参数 D_i 与包到达率 λ_i 和 LTE 帧中空白子帧的数量 n 有关。

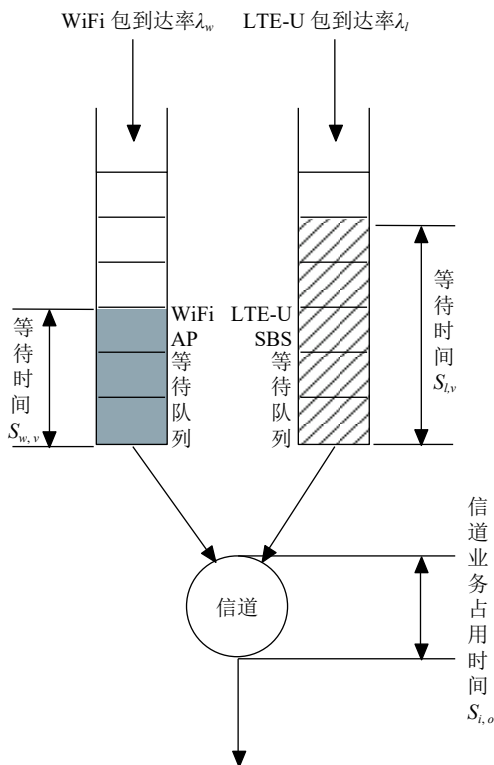


图 2 LTE-U 与 WiFi 共存系统的 M/G/1 排队模型

2 基于强化学习的 LTE-U 与 WiFi 共存机制

前文排队论中的时间参数可以映射为无线通信系统的数据包从到达基站 (或 AP) 到被 UE (或 STA) 终端接收两个时间点之间的总时间, 即数据包传输时延。考查 WiFi 和 LTE-U 无线通信网络的时延, 并将其作为定量评估不同无线通信网络性能的指标参数。对于 LTE-U 所采取的基于 ABS 空白子帧的非授权频带的共享访问方式, 如果一个 LTE 无线帧总共含有 N 个子帧, 其中空白子帧的数量为 n 。考虑第一种情况, LTE-U 在信道空闲状态下可随时接入信道, 那么 LTE 接入信道的概率

为 $1-n/N$ 。此时, LTE-U 系统的数据包服务时间 $S_{l,case1} = S_{l,o}$ 。考虑第二种情况, 在系统恰好处于 ABS 空白子帧时间段的时候, LTE-U 不能访问共享非授权频率, 产生该情形的概率是 n/N , LTE-U 只有等待剩余的空白子帧时间段结束, 才能马上接入无线共享信道并发送数据包, 此时, LTE-U 的数据包服务时间:

$$S_{l,case2} = S_{l,o} + R_w \quad (2)$$

式中, R_w 服从均匀分布, 该参数是除去已经在时间上流逝掉的, 剩余的需要 LTE-U 小基站等待的空白子帧的时间。综合考虑前文描述的两种情形, 得出 LTE-U 系统的数据包服务对应的平均时间:

$$S_l = (1 - n/N)S_{l,case1} + n/N S_{l,case2} = S_{l,o} + (n/N) R_w \quad (3)$$

式中, R_w 和 $S_{l,o}$ 彼此独立, 得出 S_l 的数学期望和方差分别为:

$$E(S_l) = E(S_{l,o}) + n/N E(R_w) \quad (4)$$

$$D(S_l) = D(S_{l,o}) + (n/N)^2 D(R_w) \quad (5)$$

根据式 (4)~(5) 可以得到:

$$E(S_l^2) = D(S_l) + [E(S_l)]^2 \quad (6)$$

然后, 由 Pollaczek-Khinchin (P-K) 公式计算得出 LTE-U 系统的平均包时延的算式:

$$D_l = E(S_l) + \frac{\lambda_l E(S_l^2)}{2[1 - \lambda_l E(S_l)]} \quad (7)$$

WiFi AP 的 MAC 层使用 CSMA/CA 协议接入无线信道。AP 发送数据包前先对信道进行监听, 如果监听到信道在一段时间间隔 (分布式帧间间隔 (DIFS)) 内处于空闲状态, 则 AP 将产生一个随机退避 (back-off) 间隔, 该退避间隔服从 $0 \sim CW_{max}$ 的均匀分布, 其中 CW_{max} 表示竞争窗口最大值。只要信道空闲就开始倒计时, 每流逝 1 个 WiFi 时隙的时间倒计时计数器减 1。当计数器达到零时, AP 发起一次数据传输。否则, 如果在倒计时过程中信道被其他设备占用, AP 必须重新启动 DIFS 并继承先前剩余的退避计数。对于 WiFi 系统而言, WiFi AP 对于共享非授权无线信道的占用受到 LTE-U 小基站的影响。当 LTE-U 小基站没有接入无线信道时, AP 基于前文描述的侦听协议发起接入信道的操作, 只有在计数器的值减少到 0 时才可接入信道, 这时 WiFi 数据包服务时间:

$$S_{w,case1} = S_{DIFS} + S_{back} + S_{w,o} \quad (8)$$

此外,对 WiFi 系统来说,如果其数据包在非空白子帧时刻到达,那么 AP 只有等到 LTE-U 的非空白子帧时间,即数据传输时间结束后才被允许访问占用信道。此时 AP 的数据包服务时间:

$$S_{w,case2} = S_{DIFS} + S_{back} + S_{w,o} + R_l \quad (9)$$

式中, R_l 服从均匀分布,该参数表示剩余的非空白子帧时间段,式中各项彼此独立。根据前文分析,得到 AP 的数据包服务时间:

$$S_w = n/N S_{w,case1} + (1-n/N) S_{w,case2} = S_{DIFS} + S_{back} + S_{w,o} + (1-n/N) R_l \quad (10)$$

式中, S_{back} 服从 $0 \sim CW_{max}$ 的均匀分布;常数 S_{DIFS} 是分布式帧间间隔 (DIFS)。进而分别得到 AP 的数据包服务时间的均值与方差:

$$E(S_w) = T_{DIFS} + E(S_{back}) + E(S_{w,o}) + (1-n/N)E(R_l) \quad (11)$$

$$D(S_w) = D(S_{back}) + D(S_{w,o}) + (1-n/N)^2 D(R_l) \quad (12)$$

根据式 (11)~(12) 可以得到:

$$E(S_w^2) = D(S_w) + [E(S_w)]^2 \quad (13)$$

由 P-K 公式,得到 WiFi 系统的平均包时延的算式:

$$D_w = E(S_w) + \frac{\lambda_w E(S_w^2)}{2[1 - \lambda_w E(S_w)]} \quad (14)$$

下面介绍基于强化学习中的 Q 学习的智能空白子帧配置算法 (QL-ABS),该算法可以提升异构无线网络在非注册频带的时延性能。对于动作的选择,探索策略采用 ε 贪婪算法。为 LTE-U 预先定义一个时延性能目标 P_{tar} 。LTE-U 的 SBS 小基站可以自主地动态调整空白子帧的数量,这里多个空白子帧时间上连续挨在一起而不是离散分隔开,使得性能尽可能地接近 P_{tar} 。SBS 的动作集合为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, 状态集合为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, a_k 和 s_j 分别代表 SBS 可能的动作和状态。在 Q 学习中, SBS 小基站 (agent) 会维护一个 Q 值表,该表存有每一对状态 $s_j \in S (1 \leq j \leq n)$ 和动作 $a_k \in A (1 \leq k \leq m)$ 对应的 Q 值 $Q(s_j, a_k)$, 该值表示当 SBS 在状态 s_j 选择执行动作 a_k 时对未来代价的预测。

SBS 小基站在某一状态 s_j 选择并执行动作 a_k , 基于来自环境的反馈,用代价值 c 表示该反馈,该代价值定义为在前一空白子帧配置周期中的 LTE 数据发送时间里得到的 LTE-U 的性能 P 与

目标性能 P_{tar} 差值的绝对值。进而得到 SBS 小基站的下一状态 $s_{j'} \in S (1 \leq j' \leq n)$ 。然后,基于得到的下一状态 $s_{j'}$ 和计算出的代价值 c ,更新当前状态动作对 s_j 和 a_k 对应的 Q 值:

$$Q(s_j, a_k) \leftarrow (1-\alpha)Q(s_j, a_k) + \alpha[c + \gamma \min_{a_{k'}} Q(s_{j'}, a_{k'})] \quad (15)$$

式中, α, γ 分别为学习率和折扣因子 (仿真中取值为 0.5)。学习率 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$ 决定学习的速度,如果 α 过小,学习过程的时间会很长;如果 α 过大,算法可能会不收敛;折扣因子 $\gamma (0 \leq \gamma \leq 1)$ 控制未来代价的价值,体现了未来代价相对当前代价的重要性。 γ 越小,学习将越依赖于当前代价; γ 越大,学习将越依赖于未来代价。合理的选择这两个参数的值,可以有效控制 Q 学习算法的学习过程。

选择动作时,需要考虑“探索-利用”的折中问题,即在给定状态条件下,是尝试新的动作以获得更多的经验,还是根据已有的学习经验来选择动作。尝试更多新的动作将获得更为全面、丰富的经验,进而达到更好的优化目标,但相应消耗的学习时间也更多;更多依赖以往经验可以令算法的学习过程收敛并较快稳定,但也可能陷入局部最优解。一旦当前状态动作对 s_j 和 a_k 的 Q 值得到更新,为下一状态 $s_{j'}$ 选择一个动作 $a_{k'} \in A (1 \leq k' \leq m)$ 。采用 ε -贪婪算法,首先生成随机数 $r \in U(0,1)$,并与 ε 贪婪参数比较,该参数通常取值很小 (如 $0.01 \leq \varepsilon \leq 0.05$)。如果 r 值小于 ε 贪婪参数的值,则随机选择一个动作。否则,在得到的下一状态 $s_{j'}$ 中选择使 Q 值最小的动作,即:

$$a_{k'} = \operatorname{argmin}_{a_{k'}} Q(s_{j'}, a_{k'}) \quad (16)$$

将 LTE-U SBS 小基站的动作、状态、代价值定义如下。

动作:

$$A = \{0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\} \quad (17)$$

式中, $a_k \in A (0 \leq a_k \leq 1)$ 表示一个 LTE 帧 (含 10 个子帧) 内所有空白子帧所占的时间比例。比如 0.1 表示每 10 个子帧中有 1 个 LTE 空白子帧,9 个 LTE 数据发送子帧。

状态:

$$s_j = \begin{cases} 5 & P \geq 0.9 \\ 4 & 0.7 \leq P < 0.9 \\ 3 & 0.5 \leq P < 0.7 \\ 2 & 0.3 \leq P < 0.5 \\ 1 & 0.1 \leq P < 0.3 \\ 0 & P < 0.1 \end{cases} \quad (18)$$

代价:

$$c = |P_{\text{tar}} - P| \quad (19)$$

其中,

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{N_l+N_w} P_i}{N_l+N_w} \quad (20)$$

$$P_i = \begin{cases} 1 & D_j \leq d_i \\ 0 & D_j > d_i \end{cases} \quad j \in \{l, w\} \quad (21)$$

式中, P 为系统总体实验性能 (反映了用户对时延性能的满意度); P_i 为第 i 个用户的用户满意度; D_j 为前文推导过的 LTE-U SBS 小基站或 WiFi AP 的平均包时延; d_i 为每一用户对应业务 (假定每一用户在任一时刻只有一种业务) 的时延 QoS 要求。VoIP 业务的时延要求为 $d_i=2$ ms, Video Streaming 业务的时延要求为 $d_i=5$ ms, FTP 业务的时延要求为 $d_i=20$ ms^[19], 设置 $P_{\text{tar}} = 0.9$ 。

QL-ABS 算法流程的伪代码如下所示, LTE-U 与 WiFi 以协作模式共存, 可以彼此进行信息交互。LTE-U 的 SBS 小基站在每次数据传输阶段开始前, 先获取 WiFi 与 LTE-U 网络接下来的业务负载强度 λ_w 与 λ_l 。

LTE-U QL-ABS 算法

初始化

for $s_j \in S(1 \leq j \leq n), a_k \in A(1 \leq k \leq m)$ do

 初始化 Q 值表 $Q(s_j, a_k)$;

end for

给出初始状态 $s = s_j \in S$;

学习:

loop for 新的数据传输阶段

 按 ε 贪婪算法选择动作 $a_{k'} \in A$;

 执行 $a_{k'}$;

 获得当前性能 P 和代价 c ;

 观察下一状态 $s_j' \in S$;

 更新 Q 值表的条目:

$$Q(s_j, a_{k'}) \leftarrow (1 - \alpha) Q(s_j, a_{k'}) + \alpha [c + \gamma \min_{a_k} Q(s_j', a_k)]$$

$s = s_j'$

end loop

3 仿真结果

仿真考虑在非授权频段竞争频谱资源的场景, WiFi 与 LTE-U 都对非授权频段的频谱资源使用。用户终端的移动速率为 3 km/h, 分布服

从均匀分布。其他的相关仿真参数如表 1 所示。两类系统的信道占用服务时间都是 0.9163 ms。为了计算前文提到的系统总体实验性能 P , 基于服务类型得到每一用户的数据包时延要求, 假定每一用户在任一时刻只有一种业务。

表 1 仿真参数配置

参数	配置
分布式帧间间隔 $T_{\text{DIFS}}/\mu\text{s}$	34
WiFi 时隙 μs	9
竞争窗口大小 CW_{max}	15
信道占用服务时间 $/\text{ms}(E(S_{i,o})=1/\mu, i \in \{l, w\})$	0.9163
LTE-U 用户数 N_l	50, 100
WiFi 用户数 N_w	50, 100
空白子帧最大数目 N	10
用户业务类型分布	VoIP 30%, 视频流 40%, FTP 30%
频段	5.8 GHz, 带宽 20 MHz

对不采用共享接入算法 (without-ABS)、传统的空白子帧数量固定的共享接入算法 (ABS)、以及本文提出的基于强化学习的空白子帧数量动态配置的共享接入算法 (QL-ABS) 的性能进行了仿真对比, 如图 3 所示。其中 LTE-U 的包到达率为 $\lambda_l=150$ packets/s。在 WiFi 系统的包到达率 λ_w 增大时, 不使用任何共享接入算法时, 等待队列中积聚的被阻塞的 WiFi 数据包逐步增多, 进而使平均包时延增加。使用空白子帧共享接入算法可以有效的减少系统时延。在高负载时, QL-ABS 算法的 WiFi 系统的时延性能较 ABS 算法可以提升 50% 左右; 在低负载时, WiFi 时延性能可以提升 20% 左右。这是由于相比于空白子帧数量固定算法, 基于 Q 学习的空白子帧数量配置算法可以根据系统业务强度智能的动态调整空白子帧数目, 可以更好的保证 WiFi 与 LTE-U 两种系统在非授权频段共享接入的公平性。另一方面, 使用 QL-ABS 算法后, LTE-U 的时延只有微小的增大。相比空白子帧数量固定算法 LTE-U 时延大约增加了 0.2 ms, 相比不使用空白子帧的算法 LTE-U 时延增加了 0.7 ms 左右。如图 4 所示, $\lambda_l=150$ packets/s 时, 在不同的用户数情况下, QL-ABS 算法都具有较好的平均包时延性能。用户数较多时, LTE-U 和 WiFi 的平均包时延都有一定程度的增加。低负载时, WiFi 的时延性能增加 5% 左右; 高负载时, WiFi 的时延性能增加 2% 左右。

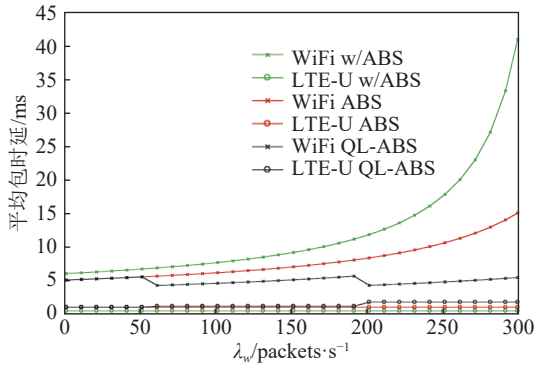


图 3 平均包时延性能分析

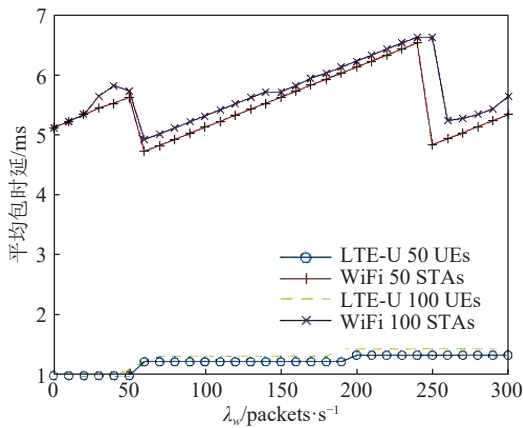
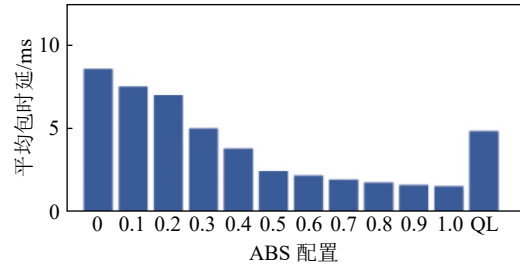


图 4 不同用户数的平均包时延性能分析

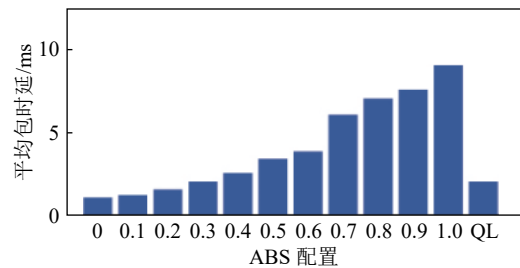
图 5 展示了在不同的空白子帧数量配置条件下, 在采用 QL-ABS 动态空白子帧配置算法时, WiFi 和 LTE-U 的时延性能变化, 其中 $\lambda_f=150$ packets/s, $\lambda_w=100$ packets/s。与空白子帧数量固定配置算法相比, QL-ABS 在提供了较好的 WiFi 时延性能(低于 5 ms, 能够满足 VideoStreaming 业务的时延 QoS 要求)的同时, 能够保证 LTE-U 的时延性能只有微小的下降(低于 2 ms, 可以满足时延 QoS 苛刻的 VoIP 语音业务要求)。QL-ABS 更适合 WiFi 和 LTE-U 异构网络的整体时延性能优化, 在高负载情况下 QL-ABS 的这种优势会更加明显。WiFi 时延性能增加的原因是当 SBS 小基站考虑性能目标 P_{tar} , 基于突发的业务强度动态调整空白子帧数量时, WiFi 获得了更为公平的接入共享非授权频谱的机会。

图 6 显示了动态的 WiFi 和 LTE-U 数据包总到达率, 图 7 显示了对应系统总体时延性能 P (用户满意度)的结果, 并对比了 QL-ABS 和基于效用函数的动态自适应 ABS 配置算法(A-ABS)^[17]的在线性能。可以看出系统第二天的性能明显好于第一天, 且 QL-ABS 较 A-ABS 算法具有更好的在

线性性能, 这是因为 QL-ABS 算法第二天的决策可以利用第一天学到的经验, 从而做出更合理的动作。随着在线性能的提高, 用户满意度也会相应得到提升。



a. WiFi AP 的平均包时延



b. LTE-U SBS 的平均包时延

图 5 ABS 配置与时延

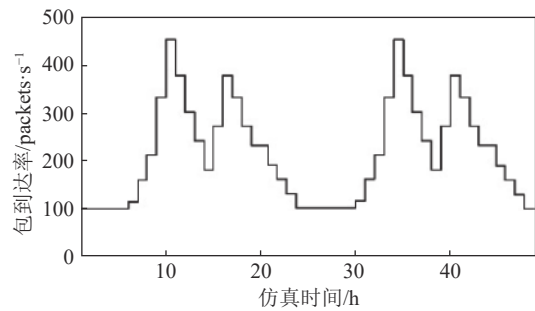


图 6 连续两天动态变化业务量

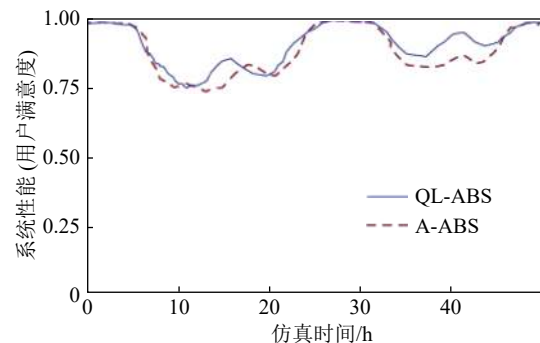


图 7 QL-ABS 算法在线性能

4 结束语

本文提出基于 Q 学习的 LTE-U 的空白子帧配置机制, 使用排队论对 LTE-U 与 WiFi 共存的 5G 异构网络进行建模。仿真结果表明, 通过自主学习

过程, 本算法可在不同的负载条件下为 LTE-U 产生较为合理的空白子帧配置策略, 具有较好的在线学习性能。较传统方法, 本机制更好地解决了 5G 异构网络中 LTE-U 与现有 WiFi 网络在非授权频带的共存问题, 提升了网络的总体时延性能和用户满意度, 具有更好的在线性能。在未来的工作中, 将把所提出的方案扩展到更为复杂的多个 LTE-U SBS 和 WiFi AP 共存的场景。

本文研究工作得到泛网无线通信教育部重点实验室(北京邮电大学)开放课题(KFKT-2018107)的资助, 在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 孙绍辉, 高秋彬, 杜滢, 等. 第 5 代移动通信系统的设计与标准化进展[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(5): 26-43.
SUN Shao-hui, GAO Qiu-bin, DU Ying, et al. Overview on the proceedings of design and standardization of the fifth generation of mobile communications system[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41(5): 26-43.
- [2] ZHANG R, ZHENG Z, WANG M, et al. Equivalent capacity in carrier aggregation-based LTE-a systems: A probabilistic analysis[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(11): 6444-6460.
- [3] 3GPP Study Item. Study on licensed-assisted access using LTE: RP-141397[S/OL]. [2019-10-10]. https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_65/Docs/RP-141397.zip.
- [4] NIHTILA T, TYKHOMYROV V, ALANEN O, et al. System performance of LTE and IEEE 802.11 coexisting on a shared frequency band[C]//Proc IEEE Wireless Communication Networking Conference (WCNC). [S.l.]: IEEE, 2013, DOI: 10.1109/WCNC.2013.6554707.
- [5] EKI A R, WANG A, ISMAIL X, et al. Joint user association and data-rate wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(9): 7403-7414.
- [6] XU S, LI Y, GAO Y, et al. Opportunistic coexistence of LTE and WiFi for future 5G system: Experimental performance evaluation and analysis[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 8725-8741.
- [7] ZHANG Q, WANG Q, FENG Z, et al. Design and performance analysis of a fairness-based license-assisted access and resource scheduling scheme[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(11): 2968-2980.
- [8] AL-DULAIMI A, AL-RUBAYE S, NI Q, et al. 5G communications race: Pursuit of more capacity triggers LTE in unlicensed band[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2015, 10(1): 43-51.
- [9] 3GPP RAN1 Standard Contribution. Views on LAA for unlicensed spectrum—scenarios and initial evaluation results: RWS-140026[S/OL]. [2019-10-15]. https://www.3gpp.org/ftp/workshop/2014-06-13_LTE-U/Docs/RWS-140026.zip.
- [10] ALMEIDA E, CAVALCANTE A, PAIVA R, et al. Enabling LTE/WiFi coexistence by LTE blank subframe allocation[C]//Proceeding IEEE International Conference on Communication (ICC). [S.l.]: IEEE, 2013: 5083-5088.
- [11] 3GPP RAN1 Standard Contribution. Cable Labs perspective on LTE-U Coexistence with Wi-Fi and operational modes for LTE-U: RWS-140004[S/OL]. [2019-10-18]. https://www.3gpp.org/ftp/workshop/2014-06-13_LTE-U/Docs/RWS-140004.zip.
- [12] CHAVES F, ALMEIDA E, VIEIRA R, et al. LTE UL power control for the improvement of LTE/Wi-Fi coexistence[C]//Proceeding IEEE Vehicle Technology Conference (VTC). [S.l.]: IEEE, 2013: 1-6.
- [13] ZHANG H, CHU X, GUO W, et al. Coexistence of Wi-Fi and heterogeneous small cell networks sharing unlicensed spectrum[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(3): 158-164.
- [14] SONG Y, SUNG K W, HAN Y. Impact of packet arrivals on Wi-Fi and cellular system sharing unlicensed spectrum[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(12): 10204-10208.
- [15] LIU Y Y, YOO S J. Dynamic resource allocation using reinforcement learning for LTE-U and WiFi in the unlicensed spectrum[C]//the 9th International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). Milan: [s.n.], 2017: 471-475.
- [16] CHATTERJEE S, ABDEL-RAHMAN M J, MACKENZIE A B. Optimal distributed allocation of almost blank subframes for LTE/WiFi coexistence[C]//the 15th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt). Paris: [s.n.], 2017: 1-6.
- [17] RUPASINGHE N, GUVENC I. Reinforcement learning for licensed-assisted access of LTE in the unlicensed spectrum[C]//Wireless Communications & Networking Conference. New Orleans: IEEE, 2015: 1279-1284.
- [18] GUO Z, ZHANG Q, FENG Z, et al. Traffic load based adaptive almost blank subframe optimization in LTE-U and WiFi coexisted systems[C]//IEEE International Conference on Communications in China (ICCC Workshop). [S.l.]: IEEE, 2018, DOI: 10.1109/ICCC hinaW.2018.8674483.
- [19] RGP Project. Policy and charging control architecture[EB/OL]. [2019-11-01]. http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/STD-T63V12_10/2_T63/ARIB-STD-T63/Rel13/23/A23203-d80.pdf.