

非授权频段上 Wi-Fi 和 5G NR 共存优化研究

张映昀, 田 峰

(南京邮电大学 宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘要:针对授权频谱资源短缺问题,提出了 Wi-Fi 和 5G 新空口在非授权频段共存优化方案。首先,分别分析了 Wi-Fi 系统、非授权频段新空口系统和二者共存系统吞吐量,并调整了非授权频段新空口帧结构。然后,考虑通过部分带宽技术灵活切换分配频谱资源,并利用用户碰撞概率来动态调整其频谱切换计时器长度。最后,考虑共存网络中新空口用户吞吐量和时延的联合优化问题,将该非线性问题线性化并求解。仿真表明,该方案能有效提高新空口用户吞吐量并降低时延。

关键词:5G 新空口; Wi-Fi; 共存优化; 部分带宽; 帧结构

中图分类号:TN919 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-5439(2021)01-0034-08

Optimal coexistence of Wi-Fi and 5G NR in unlicensed band

ZHANG Yiyun, TIAN Feng

(Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology, Ministry of Education,)
(Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Aimed at the shortage of licensed spectrum resources, an optimization coexistence scheme for Wi-Fi and 5G NR (new radio) in an unlicensed band is proposed. Firstly, the throughput of the Wi-Fi system, the NR in the unlicensed band system and the coexistence system in the unlicensed band is analyzed. Among them, the frame structure of the NR the in unlicensed band is adjusted. Then, the bandwidth part (BWP) technology is used to flexibly switch and allocate the spectrum resources. Meanwhile, the length of the spectrum switching timer is dynamically adjusted according to the collision probability of users. Finally, the joint optimization problem of the throughput and delay of NR users in the coexistence network is considered and the nonlinear problem is linearized to be solved. The simulation results show that the scheme can effectively improve the throughput of new radio users and reduce the delay.

Keywords: 5G new radio (NR); Wi-Fi; coexistence optimization; bandwidth part (BWP); frame structure

随着无线通信、移动互联网用户及相关设备的增长,数据流量的需求量也呈现出爆炸式的增长。思科发布的全球移动数据流量预测指出,全球移动设备将从2018年的88亿增长到2023年的131亿,其中14亿支持5G新空口(New Radio, NR)。到2023年,移动速度将增长3倍以上,达到43.9 Mbit/s。在2023年,5G速度将是平均移动连接速度的13倍,来自移动设备的Wi-Fi速度将增长3倍^[1]。

流量的增长使授权频段的频谱资源更加稀缺,而非授权频段频谱资源丰富,如使用Wi-Fi的5 150~5 925 MHz频段。因此,3GPP提出非授权频段新空口(New Radio in Unlicensed Spectrum, NR-U),使5G NR在尽量不干扰Wi-Fi,缓和两者复用问题的前提下,与Wi-Fi在5 150~5 925 MHz频段上共存^[2]。NR-U继承了授权辅助接入技术(Licensed-Assisted Access, LAA), LAA采用先听后说

收稿日期:2020-06-14;修回日期:2020-08-24 本刊网址: <http://nyzr.njupt.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金(61772287,61671252)和江苏省高等学校自然科学基金项目(18KJA510004)资助项目

作者简介:张映昀,女,硕士研究生;田峰(通信作者),男,博士,教授, tianf@njupt.edu.cn

引用本文:张映昀,田峰.非授权频段上 Wi-Fi 和 5G NR 共存优化研究[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2021,41(1):34-41.

(Listen Before Talk, LBT) 接入机制与 Wi-Fi 的 CSMA/CA 相似,竞争接入信道,能较好地实现 5G NR 与 Wi-Fi 的共存。除了缓解授权频段的压力外,在非授权频段中 NR 相对于 LTE 而言能够给予用户更高速率,更低时延的服务。但是目前对 NR-U 的研究中, NR-U 仍然采用 LTE 的帧结构,没有考虑到 NR 帧结构能够使用更小的时域单元,影响了系统吞吐量。且因 NR-U 用户竞争接入信道,所以 NR-U 时延较大。

本文首先对 Wi-Fi、NR-U 和共存系统吞吐量进行分析。其中 NR-U 参考 NR 帧结构特点,采用更小的时域单元的帧结构,提高了 NR-U 成功传输时间,降低了碰撞时间,进而提高了 NR-U 的吞吐量。然后,使用部分带宽(Bandwidth Part, BWP)技术,按 NR-U 用户数据大小,灵活切换分配 NR-U 频谱带宽大小;在切换频谱带宽过程中,频谱切换计时器按 NR-U 碰撞概率来动态调整,以降低 NR-U 的时延。最后,在保证 Wi-Fi 用户最小吞吐量的前提下,构造共存系统中 NR-U 用户吞吐量和时延的联合优化问题,通过证明将非线性的优化问题线性化,降低了计算量,使得问题易于求解。最后,通过仿真验证所提方案有效性。

1 相关工作

非授权频段上能灵活使用尚未分配的频谱资源,许多学者着力于研究将授权频段流量卸载到非授权频段的共存技术,以缓解授权频段的压力。为解决 LTE 与 Wi-Fi 的共存问题,高通等公司提出了 LTE-U 技术利用载波聚合技术来整合授权频段和非授权频段的频谱资源。在文献[3-8]中, LTE 使用 LTE-U 技术与 Wi-Fi 在非授权频段公平共存,提高非授权频段中 LTE 用户的吞吐量或速率,并优化用户的能效。

然而有些国家在非授权频段须使用 LBT 接入机制,而 LTE-U 技术并不支持 LBT^[9]。因此, 3GPP 提出全球通用的使用 LBT 接入机制的 LAA 技术,用于 LTE 与 Wi-Fi 在非授权频段的共存。文献[10-14]中, LAA 采用 LBT 机制,通过改进 LBT 机制,提高系统总吞吐量。在文献[15]中, LTE 使用 LAA 技术,与 Wi-Fi 通过竞争接入信道,并使用 LTE 帧结构调整用户的成功传输时间与碰撞时间。而本文参考 NR 帧结构的特征来调整 NR-U 帧结构,采用更小的时域资源单元,进一步改善用户的成功传输时间与碰撞时间,提高吞吐量。

随着 5G 技术的成熟, 3GPP 也重点研究了 5G 在非授权频段的关键技术, NR-U 继承了 LAA 的大部分技术。文献[16]为了解决 LBT 机制导致的时间资源浪费,在信道相对空闲时不使用 LBT 机制,而是以低功率直接发送,以实现更高的用户吞吐量和更低的延迟。文献[17]用 BWP 技术切换频谱,在切换中引入固定切换频谱计时器来降低 NR-U 时延。但若计时器长度短,当碰撞概率较小时用户就会频繁切换频谱,用于切换的时延就会过大,若计时器长度长,当碰撞概率较大时等待切换的时延就会过大。而本文根据 NR-U 碰撞概率动态调整频谱切换计时器的时长,能有效降低 NR-U 用户的时延。

2 系统模型

2.1 Wi-Fi 吞吐量分析

根据 Bianchi 模型^[18],基于马尔可夫链推导出 Wi-Fi 节点接入概率 P_a^W (文中 W 上标指 Wi-Fi 网络,下标 a 指接入),发生碰撞概率 P_c^W (下标 c 指碰撞)、信道忙概率 P_b^W (下标 b 指信道忙),由此得到信道空闲概率 P_i^W (下标 i 指信道空闲)、成功传输概率 P_s^W (下标 s 指成功传输)、节点间碰撞概率 P_c^{WW} (上标 WW 指 Wi-Fi 节点之间),同时给出成功传输时间 T_s^W 、碰撞时间 T_c^W ,从而得到非授权频段 Wi-Fi 网络吞吐量模型。

2.1.1 Wi-Fi 节点接入概率

在 Bianchi 模型^[18]中, Wi-Fi 节点使用 CSMA/CA,每次传输前都要执行退避阶段,退避阶段 i 从零开始,碰撞则加 1,直到最大退避阶 m^W ($m^W=6$),即 $i \in [0, m^W]$ 。退避阶段计数器的值在 $[0, W_i^W]$ 间随机获得,其中 W_i^W 指在退避阶段 i 的竞争窗口的大小。当检测到信道空闲,退避计数器减 1,但若检测到信道繁忙则暂停,当计数器减到零成功传输数据。收到数据后,目标节点等待一个短帧间间隔 (Short Interframe Space, SIFS),再发送确认 (Acknowledge Character, ACK)。若发起节点在指定时间内未收到 ACK,则传输失败,再次执行退避过程以重新传输数据。每次传输失败时竞争窗口大小翻倍 $W_{i+1}^W = 2 * W_i^W$,直到最大退避阶段。

基于 Bianchi 模型得到一个 Wi-Fi 节点接入信道的概率为

$$P_a^W = 2(1-P_b^W)(1-2P_c^W)/((1-2P_c^W)(W_0^W+1-2P_b^W)+P_c^W W_0^W(1-(2P_c^W)^{m^W})) \quad (1)$$

非授权频段中有 U^W 个 Wi-Fi 节点,当有多个

Wi-Fi 节点成功接入,即一个 Wi-Fi 节点发生传输碰撞、信道忙的概率为

$$P_c^W = P_b^W = 1 - (1 - P_a^W)^{U^W-1} \quad (2)$$

根据式(1)、式(2)能得到信道空闲、成功传输、节点碰撞概率分别为

(1) 当信道中无节点成功接入,信道空闲。

$$P_i^W = (1 - P_a^W)^{U^W} \quad (3)$$

(2) 仅一个节点接入则成功传输。

$$P_s^W = U^W P_a^W (1 - P_a^W)^{(U^W-1)} \quad (4)$$

(3) 其他情况下节点间发生碰撞。

$$P_c^{WW} = 1 - P_i^W - P_s^W \quad (5)$$

2.1.2 Wi-Fi 节点平均成功传输时间

基于 Bianchi 的模型^[18]得到平均成功传输、碰撞时间分别为

$$T_s^W = \frac{H + E[P^W] + \text{ACK}}{R^W} + \delta + \text{SIFS} + \text{DIFS} + \delta \quad (6)$$

$$T_c^W = \frac{H + E[P^W]}{R^W} + \delta + \text{DIFS} \quad (7)$$

其中, H 为 MAC、PHY 层头部长度 400 bits, ACK 为 ACK 帧长度 240 bits, δ 为传播时延 1 μs , SIFS 为 DCF 短帧间间隔 16 μs , DIFS 为分布式帧间间隔 34 μs , $E[P^W]$ 为 Wi-Fi 数据包平均长度, R^W 为 Wi-Fi 节点的数据速率。

2.1.3 Wi-Fi 吞吐量

将信道划分为 3 种状态:空闲、成功传输、碰撞。按式(1)至式(7),当非授权频段中只有 Wi-Fi 时吞吐量为

$$S_{WO} = \frac{P_s^W E[P^W]}{P_i^W \sigma + P_s^W T_s^W + P_c^{WW} T_c^W} \quad (8)$$

其中,下标 WO 指非授权频段中只有 Wi-Fi,分子表示 Wi-Fi 节点成功传输数据包的平均长度,分母表示 3 种信道状态的时间。

2.2 NR-U 吞吐量分析

2.2.1 NR-U 节点接入概率

NR-U 虽然使用 LBT 接入机制与 Wi-Fi 的 CSMA/CA 相似,但需要在 Bianchi 模型^[18]的基础上考虑重传限制次数 K 。当退避阶段已到达最大 m^{NR} ($m^{NR}=6$,文中上标 NR 表示 NR-U 系统),但依旧发生了碰撞,则竞争窗口保持不变,直到又因碰撞而重传了 K 次,将退避阶段置零。文献^[15]通过马尔可夫模型得到 NR-U 节点信道接入概率 P_a^{NR} (NR-U 节点概率与时间的下标含义与 Wi-Fi 中的相同)。

一个 NR-U 节点成功接入的概率^[15]为

$$P_a^{NR} = 2(1 - P_c^{NR})(1 - (P_c^{NR})^{(m^{NR}+K)}) /$$

$$(W_0^{NR}(1 - P_c^{NR})[1 - (2P_c^{NR})^{(m^{NR}+1)}] + (1 - 2P_c^{NR})[(2^{(m^{NR})}W_0^{NR} + 1)((P_c^{NR})^{(m^{NR}+1)} - (P_c^{NR})^{(m^{NR}+K)} + 1 - (P_c^{NR})^{(m^{NR}+K)})]) \quad (9)$$

非授权频段中有 U^{NR} 个 Wi-Fi 节点,则当有多个 NR-U 节点成功接入,即一个 NR-U 节点发生传输碰撞的概率为

$$P_c^{NR} = 1 - (1 - P_a^{NR})^{(U^{NR}-1)} \quad (10)$$

按式(9)、式(10)能得到信道空闲、成功传输、节点碰撞概率分别为

(1) 信道中无节点成功接入,信道空闲。

$$P_i^{NR} = (1 - P_a^{NR})^{U^{NR}} \quad (11)$$

(2) 只有一个节点接入则成功传输。

$$P_s^{NR} = U^{NR} P_a^{NR} (1 - P_a^{NR})^{(U^{NR}-1)} \quad (12)$$

(3) 其他情况下节点间发生碰撞。

$$P_c^{NRNR} = 1 - P_i^{NR} - P_s^{NR} \quad (13)$$

2.2.2 NR-U 节点平均成功传输时间

因 NR 帧结构采用的时域资源单元相较于 LTE 更小,所以按 NR 帧结构调整 NR-U 帧结构,能够改善 NR-U 用户的成功传输、碰撞时间,从而提高吞吐量。NR 的无线帧和子帧与 LTE 的相同,分别为 10 和 1 ms。但 3GPP 对 NR 提出以扩展的子载波间隔为基础的参数集^[19]。表 1 中是不同参数的帧结构相关数值。因子载波间隔越大,时隙越短,使用的时域资源就小。且 NR 采用比时隙更小的时域资源单元微时隙。按 3GPP 规定,微时隙长度能是 2、4、6、7 个 OFDM 符号。当子载波间隔为 60 kHz 时,每个 OFDM 符号为 16.67 μs ,微时隙长度 T_{ms} 最小为 33.34 μs 。

表 1 NR 子载波间隔参数集

参数	子载波 间隔/Hz	每个子帧内 时隙数	每个时隙内 符号数	OFDM 符号/ μs
0	15	1	14	66.67
1	30	2	14	33.33
2	60	4	14	16.67

当 NR-U 用上述帧结构后,重新定义 NR-U 平均成功传输时间与碰撞时间。当 NR-U 节点成功接入信道时最大占用信道时间(Maximum Channel Occupy Time, MCOT) T_{MCOT} 为 10 ms。但下行传输只从时隙边界开始。若接入信道时不在时域资源单元边界,基站发送填充信号占用信道直到允许下行传输时刻,即最大占用一个微时隙的长度。平均成功传输时间为

$$T_s^{NR} = T_{MCOT} - T_{ms} + T_m + \delta \quad (14)$$

因混合自动重传请求 (Hybrid Automatic Repeat request, HARQ) 可配置于微时隙上,所以能由 HARQ-ACK 反馈求得平均碰撞时间,最小碰撞时间为一个微时隙 $T_{ms}^{[19]}$,NR-U 中碰撞时间为

$$T_c^{NR} = T_{ms} + T_m + \delta \quad (15)$$

其中, T_m 为监听时间,若信道空闲,仍需等待 T_m 时间才能发送数据, δ 为传播时延。与文献[15]采用 LTE 帧结构相比,式(14)、式(15)按 NR 帧结构进行调整,子载波间隔更小,采用的时域资源更小,提高了 NR-U 吞吐量。

2.2.3 NR-U 吞吐量

将信道划分为 3 种状态:空闲、成功传输、碰撞。按式(9)至式(15),当非授权频段中只有 NR-U 时吞吐量为^[15]

$$S_{NRO} = \frac{P_s^{NR} E[P^{NR}]}{P_i^{NR} \sigma + P_s^{NR} T_s^{NR} + P_c^{NR} T_c^{NR}} \quad (16)$$

其中,下标 NRO 指非授权频段只有 NR-U。分子表示 Wi-Fi 节点成功传输数据包的平均长度,分母指 3 种信道状态的时间。

2.3 共存系统吞吐量分析

如图 1 所示,共存系统模型由一个 NR-U 基站与一个 Wi-Fi 接入点构成,在 Wi-Fi 接入点范围内对 NR-U 用户既能连接到 NR-U 基站也能连接 Wi-Fi 接入点。

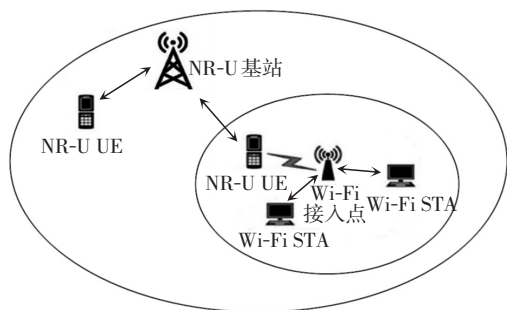


图 1 NR 与 Wi-Fi 共存场景图

本节主要分析共存系统吞吐量。假设所有节点是饱和状态(节点始终有数据流量需要传输),且忽略网络中隐藏节点。共存系统有 U 个用户,其中 U^{NR} 个 NR-U 用户和 U^W 个 Wi-Fi 用户。Wi-Fi 和 NR-U 节点在 5 150~5 925 MHz 频段通过竞争接入信道。

按式(1)、式(9)可得出共存系统中 Wi-Fi 与 NR-U 的有关概率。在共存系统中有多数 Wi-Fi 或 NR-U 用户成功接入就会发生碰撞(本节概率与时间下标的第一个字母同 Wi-Fi,最后的 c 指在共存系统中)。一个 Wi-Fi、NR-U 节点与其他节点碰撞概

率 P_{cc}^W 、 P_{cc}^{NR} ^[15] 分别为

$$P_{cc}^W = 1 - (1 - P_a^W)^{(U^W-1)} (1 - P_a^{NR})^{U^{NR}} \quad (17)$$

$$P_{cc}^{NR} = 1 - (1 - P_a^{NR})^{(U^{NR}-1)} (1 - P_a^W)^{U^W} \quad (18)$$

当无用户成功接入,共存系统信道空闲概率^[15]为

$$P_i = (1 - P_a^W)^{U^W} (1 - P_a^{NR})^{U^{NR}} \quad (19)$$

仅有一个 NR-U/Wi-Fi 用户成功接入, Wi-Fi/NR-U 用户成功传输概率^[15] 分别为

$$P_{sc}^W = U^W P_a^W (1 - P_a^W)^{(U^W-1)} (1 - P_a^{NR})^{U^{NR}} \quad (20)$$

$$P_{sc}^{NR} = U^{NR} P_a^{NR} (1 - P_a^{NR})^{(U^{NR}-1)} (1 - P_a^W)^{U^W} \quad (21)$$

若没有 NR-U/Wi-Fi 用户接入,但有多数 Wi-Fi/NR-U 节点成功接入,就能得到 Wi-Fi/NR-U 节点间的碰撞概率^[15] 分别为

$$P_{cc}^{WW} = (1 - P_a^{NR})^{U^{NR}} [1 - (1 - P_a^W)^{U^W} - U^W P_a^W (1 - P_a^W)^{(U^W-1)}] \quad (22)$$

$$P_{cc}^{NRNR} = (1 - P_a^W)^{U^W} [1 - (1 - P_a^{NR})^{U^{NR}} - U^{NR} P_a^{NR} (1 - P_a^{NR})^{(U^{NR}-1)}] \quad (23)$$

当 Wi-Fi、NR-U 节点都成功接入,得到它们之间的碰撞概率^[15] 为

$$P_{cc}^{WNR} = [1 - (1 - P_a^W)^{U^W}] \cdot [1 - (1 - P_a^{NR})^{U^{NR}}] \quad (24)$$

共存系统中 Wi-Fi 与 NR-U 节点之间的碰撞时间^[15] 为

$$T_{cc}^{WNR} = \max(T_c^W, T_c^{NR}) \quad (25)$$

按式(6)、式(7)、式(14)、式(15)、式(17)至式(25),共存系统中 Wi-Fi、NR-U 与系统总的吞吐量(分别用下标 WC 、 NRC 、 C 表示)分别为

$$S_{WC} = P_{sc}^W E[P^W] / (P_i \sigma + P_{sc}^W T_s^W + P_{sc}^{NR} T_s^{NR} + P_{cc}^{WW} T_c^W) \quad (26)$$

$$S_{NRC} = P_{sc}^{NR} E[P^{NR}] / (P_i \sigma + P_{sc}^W T_s^W + P_{sc}^{NR} T_s^{NR} + P_{cc}^{NRNR} T_c^{NR} + P_{cc}^{WNR} T_{cc}^{WNR}) \quad (27)$$

$$S_C = S_{WC} + S_{NRC} \quad (28)$$

共存系统把信道时间分成 6 部分:空闲状态、Wi-Fi 和 NR-U 节点成功传输状态、Wi-Fi 节点之间、NR-U 节点之间、Wi-Fi 和 NR-U 节点之间的碰撞状态时间。

2.4 NR-U 时延分析

为提高带宽利用率, NR 提出部分带宽技术 BWP。BWP 技术使用户按发送数据量大小申请更适合的带宽。因 NR 支持的带宽范围从 20 MHz 到 400 MHz,若用户都使用 400 MHz 则会浪费,而用户用 BWP 技术能切换较小的带宽,减少浪费。因 Wi-Fi 目前并不支持该技术,所以只分析 NR-U 的时延。

但在非授权频段中 BWP 技术要适应 LBT 机

制^[17]。用户使用 LBT 接入机制竞争接入信道,若碰撞,竞争失败无法接入,就不能切换带宽,等待切换的最大时长为 12 个 T_{MCOT} 。用户竞争成功后才能切换带宽,切换时长为 t_q 。为防止等待时间长或切换频繁,本节按 NR-U 碰撞概率来动态调整频谱切换计时器,如图 2 所示。



图 2 动态调整计时器示意图

没有引入频谱切换计时器的默认机制时延为 t_0 。当前 $z-1$ 次都发生碰撞,但第 z 次成功接入,切换带宽进行传输,则时延为 zT_{MCOT} ,从而得到 t_0 的表达式^[17]为

$$t_0 = \sum_{z=0}^{11} (1 - P_{cc}^{NR}) (P_{cc}^{NR})^z z T_{MCOT} \quad (29)$$

而本节切换频谱计时器长度按碰撞概率动态调整,时延为 t_{new} 。切换频谱计时器为 N ($N < 7$) 个 MCOT 的时长。时延由两部分组成:少于 N 次就传输成功造成的时延、 N 次都传输失败的时延。按 NR-U 碰撞概率得到使时延最小的 N 。 t_{new} 表示为

$$t_{new} = \min_{P_{cc}^{NR}} \sum_{n=0}^{N-1} (1 - P_{cc}^{NR}) (P_{cc}^{NR})^n n T_{MCOT} + (P_{cc}^{NR})^N (N T_{MCOT} + t_q) \quad (30)$$

与文献[17]固定频谱切换计时器长度相比,式(30)按 NR-U 的碰撞概率来调整频谱切换计时器长度。能使得在碰撞概率较大时及时切换,减少等待切换的时间,而在碰撞概率较小时,能防止频繁切换。

3 吞吐量和时延联合优化

3.1 优化问题描述

为最大化 NR-U 每个用户的吞吐量和最小化 NR-U 用户时延,本节构建了联合优化问题,目标函数 $f_{NR}(U^W)$ 为

$$f_{NR}(U^W) = \alpha_s \frac{S_{NRC}}{U - U^W} + \alpha_t t_{new} \quad (31)$$

其中, α_s 、 α_t 分别为吞吐量和时延奖励因子,要最大化吞吐量,最小化时延,所以 $\alpha_s > 0$, $\alpha_t < 0$ 。吞吐量单位为 Mbit/s,而时延单位为 ms,为在时间单位上统一,归一化设 $\alpha_s = 1$, $\alpha_t = -0.001$ 。

在优化 NR-U 用户的吞吐量与时延时,要保证

非授权频段中 Wi-Fi 用户的体验。因此本节中要确保 Wi-Fi 用户的最小吞吐量,见式(32)的约束条件,共存网络中各 Wi-Fi 用户的吞吐量不小于当非授权频段中只有 Wi-Fi 用户时每个用户的吞吐量。而在共存系统中必须有 Wi-Fi 用户,但不能超过系统总用户数。由此,得到优化问题为

$$\begin{aligned} & \text{OPT-WC} \\ & \max f_{NR} \\ & \text{s.t.} \quad \frac{S_{WC}}{U^W} \geq \frac{S_{WO}}{U} \quad 1 \leq U^W < U \end{aligned} \quad (32)$$

其中, U , α_s , α_t 为常数, U^W 为整形变量, S_{WC} 和 S_{WO} 均为连续变量。

3.2 优化问题线性化

上述 OPT-WC 优化问题是非线性优化问题。其中约束式(32)是非线性的,其具体表达式为

$$\frac{S_{WC}}{U^W} = P_{sc}^W E[P^W] / ((P_t \sigma + P_{sc}^W T_s^W + P_{sc}^{NR} T_s^{NR} + P_{cc}^{WW} T_c^W + P_{cc}^{NRNR} T_c^{NR} + P_{cc}^{WNR} T_c^{WNR}) U^W) \quad (33)$$

由式(20)至式(24)可知约束式(32)是复杂非线性项,不能由传统的取对数、化简等数学方法实现线性化。于是只能从优化问题实质性物理含义来分析。

目标函数最优解是当每个 NR-U 用户的吞吐量最大,时延最小时取得,那一定是 NR-U 用户越少,即 Wi-Fi 用户数越多目标函数越大,但同时也要确保 Wi-Fi 用户的最小吞吐量,所以一定是在约束条件取等号的时候能满足最大化目标函数及约束条件。将约束条件式(32)改写成式(34),于是优化问题变为

$$\begin{aligned} & \text{OPT-WC} \\ & \max f_{NR} \\ & \text{s.t.} \quad \frac{S_{WC}}{U^W} = \frac{S_{WO}}{U} \quad 1 \leq U^W < U \end{aligned} \quad (34)$$

此时非线性优化问题线性可解。

引理: 上述优化问题的最优解在约束式(32)取等号时求得^[20]。

证明: 利用反证法证明。假设约束式(32)取等号时,解为 U^w , 但非最优解,则目标函数 $f_{NR}(U^{w*})$ 的值不是最大的。令 U^* 为优化问题的最优解,得出 $\frac{S_{WC}^*}{U^*} > \frac{S_{WO}}{U}$, 即 $f_w(U^*) > f_w(U^{w*})$ 。为验证最优解是在

取等号时求得,首先证明 $\frac{S_{WC}}{U^W}$ 的单调性。

$$\begin{aligned} \frac{S_{WC}}{U^W} &= P_a^W (1-P_a^W)^{(U^W-1)} (1-P_a^{NR})^{U^{NR}} E[P^W] / \\ & (P_i \sigma + P_{sc}^W T_s^W + P_{sc}^{NR} T_s^{NR} + P_{ac}^W T_c^W + P_{cc}^{NRNR} T_c^{NR} + \\ & P_{ac}^{WNR} T_c^{WNR}) = P_a^W (1-P_a^W)^{-1} E[P^W] / ((P_i \sigma + P_{sc}^W T_s^W + \\ & P_{sc}^{NR} T_s^{NR} + P_{ac}^W T_c^W + P_{ac}^{NRNR} T_c^{NR} + P_{ac}^{WNR} T_c^{WNR}) / \\ & ((1-P_a^W)^{U^W} (1-P_a^{NR})^{U^{NR}})) \end{aligned} \quad (35)$$

对等式两边取对数,不改变函数的单调性。

$$\begin{aligned} \ln \frac{S_{WC}}{U^W} &= \ln(P_a^W (1-P_a^W)^{-1} E[P^W]) - \ln((P_i \sigma + \\ & P_{sc}^W T_s^W + P_{sc}^{NR} T_s^{NR} + P_{ac}^W T_c^W + P_{cc}^{NRNR} T_c^{NR} + P_{ac}^{WNR} T_c^{WNR}) / \\ & ((1-P_a^W)^{U^W} (1-P_a^{NR})^{U^{NR}})) \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} & \text{去掉与 } U^W \text{ 无关的数能定义新函数 } f_W \text{ 为} \\ f_W &= -\ln((P_i \sigma + P_{sc}^W T_s^W + P_{sc}^{NR} T_s^{NR} + P_{ac}^W T_c^W + P_{cc}^{NRNR} T_c^{NR} + \\ & P_{ac}^{WNR} T_c^{WNR}) / ((1-P_a^W)^{U^W} (1-P_a^{NR})^{U^{NR}})) = -\ln((\sigma + \\ & U^W P_a^W (1-P_a^W)^{-1} T_s^W + U^{NR} P_a^{NR} (1-P_a^{NR})^{-1} T_s^{NR} + \\ & [(1-P_a^W)^{-U^W} - 1 - U^W P_a^W (1-P_a^W)^{-1}] T_c^W + \\ & [(1-P_a^{NR})^{-U^{NR}} - 1 - U^{NR} P_a^{NR} (1-P_a^{NR})^{-1}] T_c^{NR} + \\ & [(1-P_a^W)^{-U^W} (1-P_a^{NR})^{-U^{NR}} - (1-P_a^W)^{-U^W} - \\ & (1-P_a^{NR})^{-U^{NR}} + 1] T_{cc}^{WNR})) \end{aligned} \quad (37)$$

f_W 求得得到 f'_W 的表达式为

$$\begin{aligned} f'_W &= -[P_a^W (1-P_a^W)^{-1} (T_s^W - T_c^W) + P_a^{NR} (1-P_a^{NR})^{-1} \cdot \\ & (T_s^{NR} - T_c^{NR}) + (1-P_a^W)^{-U^W} \ln(1-P_a^W) (T_{cc}^{WNR} - T_c^W) + \\ & (1-P_a^{NR})^{-U^{NR}} (T_c^{NR} - T_{cc}^{WNR}) \ln(1-P_a^{NR}) + [1 - (1- \\ & P_a^W)^{-U^W} (1-P_a^{NR})^{-U^{NR}} T_{cc}^{WNR} \ln(1-P_a^W) (1-P_a^{NR})]] / e^{-f_W} \end{aligned} \quad (38)$$

$$e^{-f_W} = (P_i \sigma + P_{sc}^W T_s^W + P_{sc}^{NR} T_s^{NR} + P_{ac}^W T_c^W + P_{cc}^{NRNR} T_c^{NR} + P_{ac}^{WNR} T_c^{WNR}) / ((1-P_a^W)^{U^W} (1-P_a^{NR})^{U^{NR}}) \quad (39)$$

由于概率在 0~1 之间,时间大于 0,所以分母 e^{-f_W} 大于 0。且 $T_s^W > T_c^W$, $T_s^{NR} > T_c^{NR}$, f'_W 分子第一、二项都大于 0。

又 $\ln(1-P_a^W)$, $\ln(1-P_a^{NR}) < 0$, $T_{cc}^{WNR} = \max(T_c^W, T_c^{NR}) = T_c^W > T_c^{NR}$, 所以分子第三项等于 0,第四项大于 0。

因 $\ln(1-P_a^W) (1-P_a^{NR}) < 0$, 所以第五项小于 0。由此可得 f'_W 的分子小于 0,分母大于 0, $f'_W < 0$, 是单调减函数。

由 f_W 的单调性能得出 $U^{\omega^*} > U^*$ 。下面分析 $f_{NR}(U^{\omega^*})$ 和 $f_{NR}(U^*)$ 的大小。 f_{NR} 分为吞吐量和时延

两个部分。对吞吐量部分的推导,能由对 $\frac{S_{WC}}{U^W}$ 的推导得知 $\frac{S_{NRC}}{U^{NR}}$ 随 U^{NR} 单调减,而 $U^{NR} = U - U^W$, 所以 $\frac{S_{NRC}}{U^{NR}}$ 随

U^W 单调增。再对时延部分进行分析。时延随碰撞概率 P_{cc}^{NR} 单调增, P_{cc}^{NR} 随 U^{NR} 单增即随 U^W 单调减,所以时延随 U^W 单调减,又 $\alpha_i < 0$, 所以 $\alpha_i t_{new}$ 随 U^W 单调增,因此 f_{NR} 是随 U^W 单调增函数。

所以当 $U^{\omega^*} > U^*$ 时, $f_{NR}(U^*) < f_{NR}(U^{\omega^*})$, 与假设 U^* 为优化问题的最优解显然矛盾。因此证明了引理成立,当约束式(32)取等号时取得最优解(证毕)。

3.3 优化问题求解

当约束条件式(32)取等号,即 $\frac{S_{WC}}{U^W} = \frac{S_{WO}}{U^{NR} + U^W}$ 能求得整形变量 U^W 的值,求解过程如下。

$$\begin{aligned} U^W &= \frac{S_{WC} U}{S_{WO}} = P_{sc}^W U (P_i \sigma + P_s^W T_s^W + P_c^{WW} T_c^W) / (P_s^W (P_i \sigma + \\ & P_{sc}^W T_s^W + P_{sc}^{NR} T_s^{NR} + P_{cc}^{WW} T_c^W + P_{cc}^{NRNR} T_c^{NR} + P_{cc}^{WNR} T_c^{WNR})) \end{aligned} \quad (40)$$

由式(3)至式(7)、式(17)至式(25)可知式(40)中的概率只与变量 U^W 有关,而式(40)中的时间与 U 是常量。因此按式(40)能够求得最佳 Wi-Fi 用户数,再将其代入目标函数,求得最优解。

4 仿真分析

4.1 仿真设定

本节中先分析在非授权频段中 NR-U 按 NR 帧结构调整前后的吞吐量,其中子载波间隔采用 60 kHz,微时隙长度为 33.34 μ s。再分析 NR-U 的时延,按 NR-U 碰撞概率来动态调整频谱切换计时器,计时器长度为 $N * 10$ ms。最后对联合优化问题进行求解,吞吐量与时延的奖励因子分别为 $\alpha_s = 1$, $\alpha_t = -0.001$,时隙时间为 9 μ s,监听时间为 79 μ s, Wi-Fi 数据速率为 1 Mbit/s,最小竞争窗口大小为 16,信道切换时延为 5 ms。

4.2 吞吐量仿真分析

由图 3 可知,当非授权频段仅有 NR-U 用户时,随着用户数增多,每个用户吞吐量减少,因为用户数多碰撞概率就大,吞吐量就小。按 NR 帧结构调整后的用户吞吐量大于调整前的,是因为采用了更小的时域资源单元,用户传输时间长,碰撞时间短,所以在共存系统中 NR-U 吞吐量得到提高。图 4 显示非授权频段中 Wi-Fi 用户数与 NR-U 用户数相等时,共存系统、Wi-Fi 和 NR-U 吞吐量都随总用户数增加而减少。能看出共存系统的吞吐量比授权频段只有 Wi-Fi 用户时的吞吐量高,证明共存网络模型能优化吞吐量。

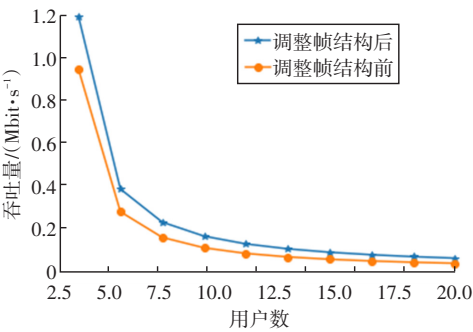


图 3 每个 NR-U 用户吞吐量随用户数变化示意图

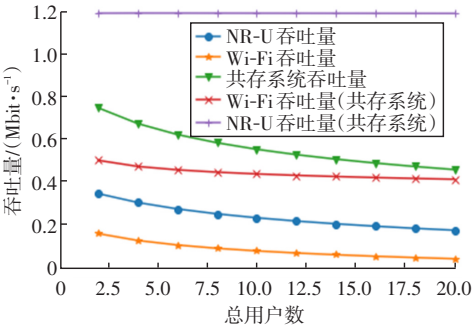
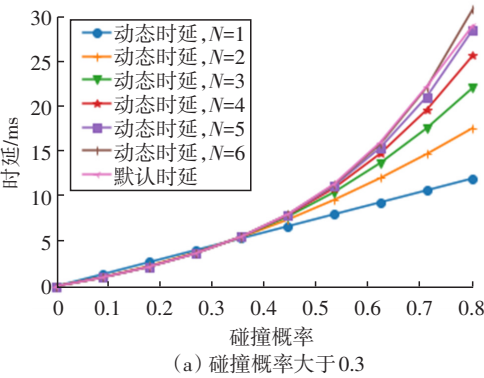


图 4 吞吐量随用户数变化示意图



4.3 时延仿真分析

如图 5 所示,当 NR-U 碰撞概率大于 0.3,若频谱切换计时器为一个 MCOT 长度,则时延小,而当碰撞概率小于 0.3,定时器的长度越长,时延越小。因碰撞概率小时,频繁切换时延较大,计时器长度应较长。而碰撞概率大时,等待切换时延大,计时器长度应较短,因此按 NR-U 碰撞概率,动态地调整频谱切换计时器的长度能降低时延。图 6 显示非授权频段仅有 NR-U 用户情况下,计时器的长度为 10 ms 时,时延大于本文提出的动态调整长度计时器的时延,且随着用户数增加,碰撞概率随之增加,时延不断提高,动态调整的计时器相较于固定计时器的优势也越凸显。

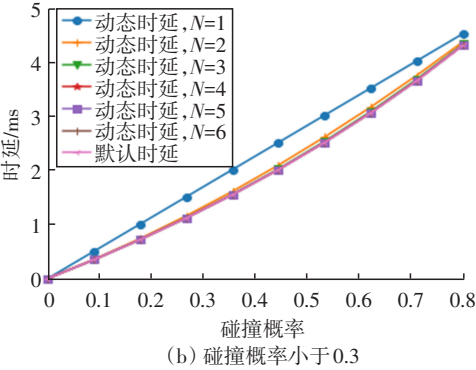


图 5 NR-U 时延随碰撞概率变化示意图

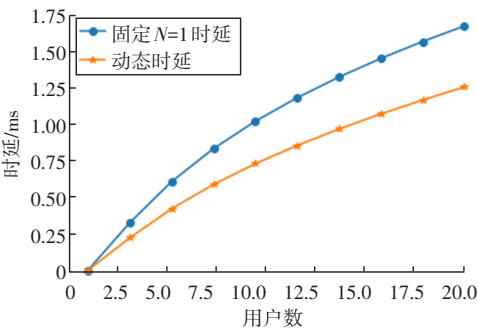


图 6 NR-U 时延随用户数变化示意图

4.4 优化目标分析

由仿真得到,当共存系统中总户数分别为 10, 15, 20, 25 个时,为了保证 Wi-Fi 用户最小吞吐量,同时又使得 NR-U 用户吞吐量最大,时延最小的最佳 Wi-Fi 用户数分别为 5, 7, 9, 11 个。将非线性优化问

题线性化后,求解出共存系统中最佳 Wi-Fi 用户数代入优化目标就能求得目标值。当共存系统中 Wi-Fi 用户数大于最佳 Wi-Fi 用户数,将不满足最小吞吐量约束式,而由图 7 可知当 Wi-Fi 用户数减少,目标值就会减少,因此本文得出的是最优解。

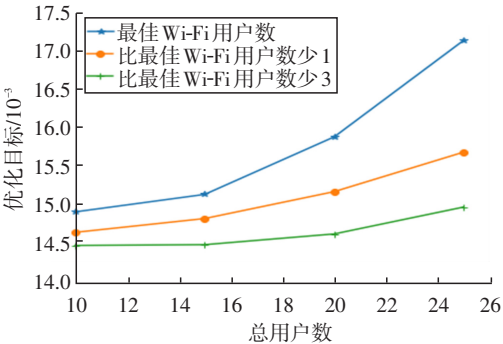


图 7 优化目标值随共存系统总用户数变化示意图

5 结束语

本文主要研究 NR 与 Wi-Fi 在 5 150~5 925 MHz 非授权频段的共存问题。先对 Wi-Fi、NR-U、Wi-Fi 吞吐量进行分析,将 NR-U 帧结构按照 NR 的帧结构特点进行调整,提高了 NR-U 用户在系统中成功传输的时间,降低了碰撞时间,从而提高共存系统中 NR-U 吞吐量。然后,在利用 BWP 技术为用户根据数据大小切换频谱时,通过 NR-U 用户的碰撞概率来动态调整 NR-U 频谱切换计时器长度,从而有效地降低时延。最后,在 Wi-Fi 用户最小吞吐量的限制下,构造了 NR-U 用户在共存系统的吞吐量与时延的联合优化问题,通过证明将优化问题线性化并求解。仿真结果表明,本文提出的共存方案能改善 NR-U 用户的吞吐量及时延。

参考文献:

- [1] Cisco. Cisco annual Internet report (2018–2023) white paper [EB/OL].[2020–05–19].<https://www.cisco.com>.
- [2] 3GPP. Study on NR-based access to unlicensed spectrum: TR 38.889 V16.0.0[S].2018.
- [3] ZHANG X, WANG J. Statistical QoS-driven power allocation for WiFi offloading over heterogeneous wireless networks[C]//Annual Conference on Information Sciences and Systems.2017:1–6.
- [4] SALIBA D,IMAD R,HOUCKE S, et al.WiFi dimensioning to offload LTE in 5G networks[C]//IEEE 9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference. 2019:0521–0526.
- [5] FAKHFAKH E, HAMOUDA S. Incentive reward for efficient WiFi offloading using q-learning approach[C]//International Wireless Communications and Mobile Computing Conference.2017:1114–1119.
- [6] ZHANG C, GU B, LIU Z, et al. A reinforcement learning approach for cost- and energy-aware mobile data offloading [C]//Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium.2016:1–6.
- [7] MARKOVA E, MOLTCHANOV D, GUDKOVA I, et al. Performance assessment of QoS-aware LTE sessions offloading onto LAA/WiFi systems[J].IEEE Access, 2019, 7: 36300–36311.
- [8] CAI F, GAO Y, CHENG L, et al. Spectrum sharing for LTE and WiFi coexistence using decision tree and game theory [C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference.2016:1–6.
- [9] ZHOU K, QIN Z, LI A, et al. Overview on coexistence tech-

nologies of unlicensed band LTE and WiFi[J].Communications Technology, 2019, 52(6): 1289–1298.

- [10] HAIDER M, EROL M. Enhanced LBT mechanism for LTE-unlicensed using reinforcement learning[C]//IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering.2018:1–4.
- [11] TAN J, ZHANG L, LIANG Y, et al. Deep reinforcement learning for the coexistence of LAA-LTE and WiFi systems[C]//IEEE International Conference on Communications.2019:1–6.
- [12] CHEN C, RATASUK R, GHOSH A. Downlink performance analysis of LTE and WiFi coexistence in unlicensed bands with a simple listen-before-talk scheme[C]//IEEE Vehicular Technology Conference.2015:1–5.
- [13] WANG W, XU P, ZHANG Y, et al. Performance analysis of LBT Cat4 based downlink LAA-WiFi coexistence in unlicensed spectrum [C]//International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. 2017: 1–6.
- [14] LOGINOV V, LYAKHOV A, ZHDANOVSKIY V. Performance analysis of LBT with limited reservation signal duration for fair LTE-LAA/Wi-Fi coexistence[C]//IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking.2019:1–5.
- [15] 张鑫. LAA 的 LBT 机制优化研究[D].北京:北京邮电大学, 2019.
ZHANG Xin. Research on optimization of LBT mechanism of LAA[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecom, 2019. (in Chinese)
- [16] ZHANG Z, CHEN J, DONG M, et al. Hybrid channel access mechanism based on coexistence scenario of NR-unlicensed [J]. China Communications, 2020, 17(1): 49–62.
- [17] 徐振宇. 非授权频段接入关键技术研究[D].北京:北京邮电大学, 2019.
XU Zhenyu. Research on key technologies for unlicensed band access[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecom, 2019. (in Chinese)
- [18] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3): 535–547.
- [19] 3GPP. Physical channels and modulation: TS 38.211 V15.2.0[S].2018.
- [20] 俞悦. Wi-Fi 和 LTE 在非授权频段的共存优化研究[D].南京:南京邮电大学, 2019.
YU Yue. Research on optimal coexistence of WiFi and LTE in unlicensed band[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)