

一种应用于5G非授权频段通信的低时延随机接入机制

朱正航^① 贾建鑫^① 邴振红^② 钱 骅^① 康 凯^{*①}

^①(中国科学院上海高等研究院 上海 201210)

^②(TCL通讯科技控股有限公司 深圳 518057)

摘 要: 针对5G非授权频段通信(NR-U)场景, 该文提出一种新型的低时延随机接入机制。该机制分别在随机接入回复窗口(RARW)与竞争窗口中加入了信道空闲计时器, 来减少UE因在非授权频段进行竞争接入所引起的时延; 此外该机制还加入了请求发送/允许发送机制, 来解决隐藏节点对随机接入过程的影响。该机制可降低传统机制中由于未考虑非授权频段特性及隐藏节点问题所引起的随机接入时延问题。该文首先对NR-U场景中的传统随机接入机制进行分析并进行问题定位; 其次, 提出新型随机接入机制的网络实体交互流程, 建立新型机制与传统机制中的网络实体交互时序模型; 最后以数学推导和仿真的方法对新型机制与传统机制进行对比评估, 相关结果显示新型机制在平均耗时方面的优势。

关键词: 5G非授权频段通信; 随机接入过程; 信道空闲计时器; 隐藏节点; 请求发送/允许发送机制

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)11-2680-09

DOI: 10.11999/JEIT190515

A Low Latency Random Access Mechanism for 5G New Radio in Unlicensed Spectrum

ZHU Zhenghang^① JIA Jianxin^① LI Zhenhong^② QIAN Hua^① KANG Kai^①

^①(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

^②(TCL Communication Technology Holdings Limited Company, Shenzhen 518057, China)

Abstract: For the 5G New Radio in Unlicensed (NR-U) spectrum scenario, a novel random access mechanism is proposed, which first adds the channel idle timer in Random Access Response Window (RARW) and contention resolution window to reduce the accessing delay caused by the contention-based accessing and employs the Request To Send/Clear To Send (RTS /CTS) mechanism to address the hidden node issue. The mechanism can alleviate the latency incurred by the legacy mechanism which did not consider the intrinsic attribute of unlicensed band and the hidden node problem. Specifically, the legacy random access mechanism applied to NR-U is analyzed. Then, the detailed elaboration of the network entity interaction sequence defined in novel mechanism is proposed. Finally, the performance evaluation processes are carried out in the way of mathematical modeling and experimental simulation, and the analysis result demonstrates that the novel scheme outperforms the benchmark one in the respect of the average random access delay.

Key words: 5G New Radio in Unlicensed (NR-U) spectrum; Random access process; Channel idle timer; Hidden node; Request To Send/Clear To Send (RTS/CTS) mechanism

1 引言

随机接入过程是用户终端(User Equipment, UE) 在与网络通信前的接入过程。在授权频段上使用的随机接入过程共包含4条信令的交互^[1,2]。当

前, 研究人员重点从缓解冲突的角度着手开展研究工作: 一是降低随机接入前发生冲突的概率, 二是提升冲突发生后冲突解决的效率^[3-7]。

然而, 在5G非授权频段通信(New Radio-Unlicensed, NR-U)系统中, 由于受到非授权频段的频段共享特性以及先听后发(Listen Before Talk, LBT)机制带来的影响, 将授权频段的随机接入过程直接应用于非授权频段系统中并不适合。

因此, 第3代合作伙伴计划(The 3rd Generation Partnership Project, 3GPP)的NR-U工作组已将5G NR-U的随机接入机制确定为重要的研究方向之

收稿日期: 2019-07-10; 改回日期: 2020-03-07; 网络出版: 2020-04-02

*通信作者: 康凯 kangk@sari.ac.cn

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX03001019); 国家自然科学基金(61671436)

Foundation Items: The National Science and Technology Major Project (2017ZX03001019), The National Natural Science Foundation of China (61671436)

一[8]。当前,针对该问题的研究可以分为4类:第1类是通过扩大接收MSG2窗口大小的方式来提高随机接入过程的效率[9,10],但该方案尚未考虑隐藏节点对随机接入带来的影响;第2类是通过增加时域或频域资源来提升NR-U中UE随机接入的成功率[11],但该方案增加了无线资源的消耗,同时也未考虑非授权频段隐藏节点所带来的影响;第3类是将4步随机接入过程整合为2步,来降低接入时延,提高随机接入的效率[12],但该类方案实际并不一定会增加随机接入的成功率,因为其同样未考虑隐藏节点问题;第4类是修改媒体接入控制(Media Access Control, MAC)层的相关计时器或计数器的工作机制,提高随机接入的效率[13],但其同样未考虑隐藏节点的影响。

扩大接收MSG2窗口大小的方法与传统机制的流程相同[9,10]。当接收MSG2的耗时大于传统机制中随机接入回复窗口(Random Access Response Window, RARW)时,对于传统机制而言,由于窗口 T_{RAR} 过期,其已进入第2轮的随机接入过程;而扩大接收MSG2窗口大小的方法仍可能处于第1轮的随机接入过程。该类解决方案可以提高随机接入的成功率,降低时延。

本文提出了一种应用于NR-U的新型低时延随机接入机制,在原有接收MSG2和MSG4的窗口(即信道空闲计时器所在的窗口 T_{Tx})中增加一个窗口,来提高随机接入的效率。本文的优势在于:不需要增加时频域资源;不改变原有MAC层相关计时器的工作机制,而是通过添加信道空闲计时器(即相对计时器)的方式来减少接入时延。

(1) 针对NR-U场景,新型随机接入机制首先在RARW与竞争解决窗口(Contention Resolution Window, CRW)中加入了信道空闲计时器来降低随机接入时延;

(2) 针对NR-U场景中的隐藏节点问题,加入

请求发送/清除发送(Request To Send/Clear To Send, RTS/CTS)机制来解决隐藏节点问题。

2 应用于NR-U的传统随机接入机制

本节介绍NR-U的传统随机接入机制及扩大接收MSG2窗口大小的改进方法[9,10],两种方法的主要区别在于RARW的大小不同。

(1) UE启动LBT,设经过 T_{IL1} 时间后监听到信道空闲,UE即发送MSG1并开启接收MSG2的RARW, RARW的大小为 T_{RAR} ;

(2) gNB正确接收到MSG1后启动LBT,经过 T_{IRx2} 时间后gNB发出MSG2。若 $T_{IRx2} > T_{RAR}$,则UE在RARW关闭前不会收到MSG2,若此时UE重传MSG1的次数未达到最大值,则UE启动MSG1的重传,否则进行下一轮的随机接入过程;

(3) 若 $T_{IRx2} < T_{RAR}$,则UE会在RARW关闭前接收MSG2。收到MSG2后立即关闭RARW并启动LBT,经过 T_{IL2} 时间后,UE发出MSG3并开启接收MSG4的CRW。CRW的大小为 T_{CR} ;

(4) gNB接收MSG4后启动LBT,经过 T_{IRx4} 时间后gNB发出MSG4。若 $T_{IRx4} > T_{Tx}$,则UE在CRW关闭前不会收到MSG4,若此时UE重传MSG3的次数未达到最大值,则UE启动MSG3的重传,否则进行下一轮的随机接入过程;

(5) 若 $T_{IRx4} < T_{Tx}$,则UE会在CRW关闭前接收MSG4,当UE收到MSG4后关闭CRW,完成整个随机接入过程。

整个随机接入过程可以划分为9个状态:0表示初始状态,1代表UE发出MSG1,2代表未发出MSG1,3代表UE收到MSG2,4代表未收到MSG2,5代表UE发出MSG3,6代表未发出MSG3,7代表UE收到MSG4,8代表未收到MSG4。

对于含M个竞争节点的NR-U场景,设时序图1中的初始位置代表状态0,则UE发送MSG1或MSG3碰撞的概率为

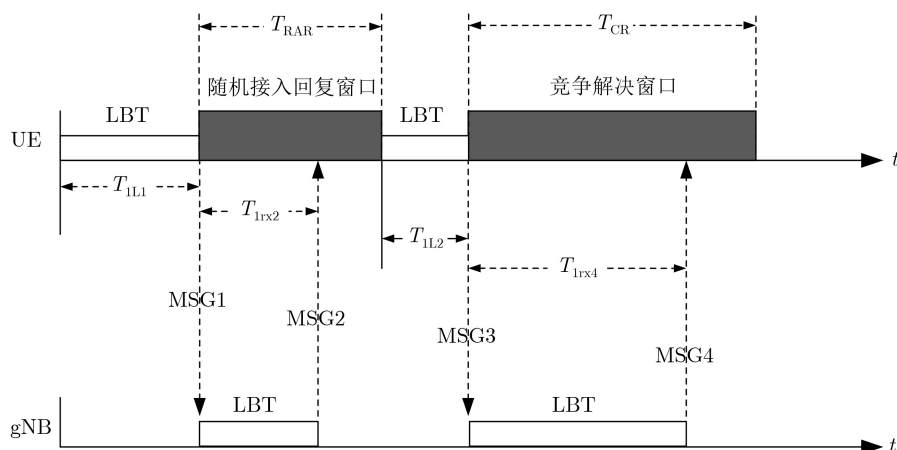


图1 传统随机接入机制的时序交互图

$$P_{\text{cco}} = P(X=1) + P(X=2) + \dots P(X=M) = e^{-\lambda} \left(\frac{\lambda}{1!} + \frac{\lambda^2}{2!} + \dots \frac{\lambda^M}{M!} \right), M \in \mathbb{N}^+ \quad (1)$$

基于泰勒公式, 可得

$$P_{\text{cco}} = e^{-\lambda} (e^{\lambda} - 1) = 1 - e^{-\lambda} \quad (2)$$

发送MSG1或MSG3不发生碰撞的概率为

$$P_{\text{ncco}} = P(X=0) = e^{-\lambda} \quad (3)$$

设UE成功接收MSG2的概率为 P_{rx2} , 成功接收MSG4的概率为 P_{rx4} 。传统随机接入机制的状态转移图如图2所示。

一步转移概率矩阵如式(4)所示

$$\begin{bmatrix} 0 & e^{-\lambda} & 1-e^{-\lambda} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{\text{rx2}} & 1-P_{\text{rx2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\lambda} & 1-e^{-\lambda} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\lambda} & 1-e^{-\lambda} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\lambda} & 1-e^{-\lambda} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{\text{rx4}} & 1-P_{\text{rx4}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\lambda} & 1-e^{-\lambda} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\lambda} & 1-e^{-\lambda} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

如直接将授权频段的随机接入机制应用于NR-U中, 存在如下问题: 由于在非授权频段中, UE采用竞争的方式来获得信道的使用权, 所以传统机制中等待接收MSG2的RARW与等待接收MSG4的CRW的大小可能不适用于NR-U中。鉴于此, 相关文献提出了通过扩大RARW的方法来提高非授权频段随机接入的效率^[9,10]。然而该方法并未改变RARW的计时方式, 也没有考虑隐藏节点问题。

3 5G NR-U场景的新型随机接入机制

本文的新型随机接入机制, 创新点在于添加信道空闲定时器, 通过对当前非授权信道的状态进行检测, 实现对网络侧情况的推测。具体而言, 其在RARW与CRW中加入了长度为 T_{Tx} 的定时器。设RARW的长度为 T_{RAR} , CRW的长度为 T_{CR} , 令 T_{Tx} 恒小于 T_{RAR} 与 T_{CR} 。设RARW中当前定时器的计时长度为 $T_{2\text{rx2}}$, RARW中原本自带计时器当前的计时长度为 T_{C1} ($T_{\text{C1}} \geq T_{2\text{rx2}}$ 且 $\leq T_{\text{RAR}}$); 同样地, 设CRW中当前定时器的计时长度为 $T_{2\text{rx4}}$, CRW中原

本自带计时器当前的计时长度为 T_{C2} ($T_{\text{C2}} \geq T_{2\text{rx4}}$ 且 $\leq T_{\text{CR}}$)。传统随机接入机制中当UE发出MSG1或MSG3后, T_{C1} 或 T_{C2} 便开始计时(绝对计时器)。在新型机制中, UE利用空闲信道评估(Clear Channel Assessment, CCA)机制, 只有当检测到非授权频段空闲时, $T_{2\text{rx2}}$ 或 $T_{2\text{rx4}}$ 才开始计时, 否则 $T_{2\text{rx2}}$ 或 $T_{2\text{rx4}}$ 不被使能(相对计时器), 若 $T_{2\text{rx2}}$ 或 $T_{2\text{rx4}}$ 记时的信道空闲时长达到 T_{Tx} 后, UE没有收到MSG2或MSG4并且UE重传MSG1或MSG3的次数未达到最大值, 则UE立即进行MSG1或MSG3的重传, 而无需等到RARW或CRW到期后(即原始 T_{C1} 或 T_{C2} 达到 T_{RAR} 或 T_{CR} 时)才进行MSG1或MSG3的重传, 该机制在某些情况下可减少UE因等待接收MSG2或MSG4所引起的时延。交互流程叙述如下:

(1) UE启动LBT, 设经过 $T_{2\text{L1}}$ 时间后UE检测到信道空闲, UE发出MSG1并打开接收MSG2的RARW。特殊地, 新型机制进一步在RARW中设置了长度为 T_{Tx} 的计时器($T_{\text{Tx}} < T_{\text{RAR}}$), 随着RARW的开启, T_{C1} 随之开始计时。如图3所示, 假设UE在发出MSG1后, 利用CCA机制检测到当前非授权频段处于空闲状态, 则定时器 $T_{2\text{rx2}}$ 开始计时。

(2) gNB接收MSG1后进行LBT, 经过时间 $T_{2\text{rx2}}$ 后gNB发出MSG2。若 $T_{2\text{rx2}} > T_{\text{Tx}}$, 则UE在计时器超时前不会收到MSG2, 若此时UE重传MSG1的次数未达到最大值, 则UE进行MSG1的重传, 否则进行下一轮的随机接入过程。

(3) 若 $T_{2\text{rx2}} < T_{\text{Tx}}$, 则UE会在定时器超时前接收MSG2, 当UE收到MSG2后立即关闭RARW

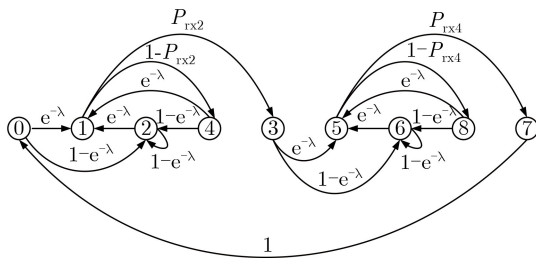


图2 应用于NR-U的传统随机接入机制的状态转移图

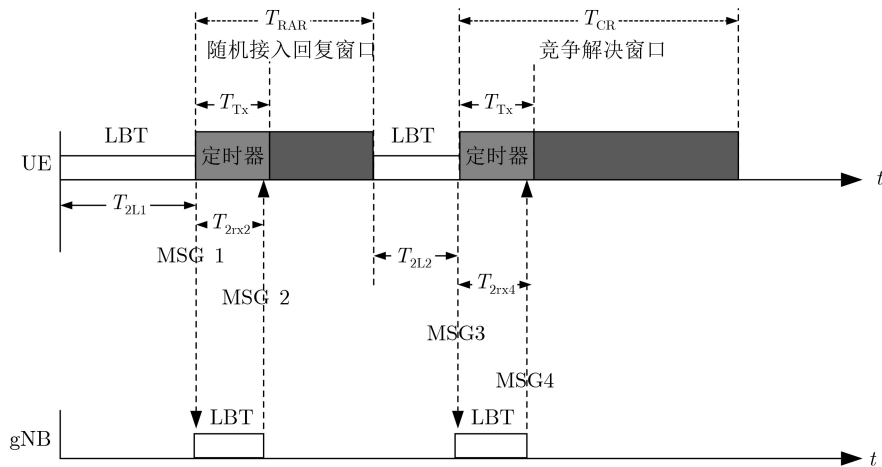


图3 考虑M个竞争节点的新型随机接入机制时序图

并进行下一轮LBT, 经过时间段 T_{2L2} 后, UE发出MSG3并开启接收MSG4的CRW。同样, 在CRW中也设置了长度为 T_{Tx} 的计时器($T_{Tx} < T_{CR}$), 随着CRW的开启, T_{C2} 随之开始计时。如图3所示, 假设UE在发出MSG3后, 检测到当前非授权频段处于空闲状态, 则定时器 T_{2rx4} 开始计时。

(4) gNB接收MSG4后进行LBT, 经过时间 T_{2rx4} 后gNB发出MSG4。若 $T_{2rx4} > T_{Tx}$, 则UE在计时器超时前不会收到MSG4, 若此时UE重传MSG3的次数未达到最大值, 则UE进行MSG3的重传, 否则进行下一轮的随机接入过程。

(5) 若 $T_{2rx4} < T_{Tx}$, 则UE会在计时器超时前接收MSG4, 当UE收到MSG4后立即关闭CRW完成整个随机接入过程。

发送MSG1或MSG3发生碰撞的概率同第2节所述机制相同, 如式(1)–式(4)所示。加入定时器后成功接收MSG2的概率 P_{rxm2} 如式(5)所示

$$P_{rxm2} = \frac{T_{2rx2}P_{rx2}}{T_{C1}} \quad (5)$$

$$T_{2rx2} \leq T_{C1} \leq T_{RAR}, 0 < T_{2rx2} \leq T_{Tx}$$

无法成功接收MSG2的概率 P_{nrxm2} 如式(6)所示

$$P_{nrxm2} = 1 - \frac{T_{2rx2}P_{rx2}}{T_{C1}} = \frac{T_{C1} - T_{2rx2}P_{rx2}}{T_{C1}} \quad (6)$$

$$T_{2rx2} \leq T_{C1} \leq T_{RAR}, 0 < T_{2rx2} \leq T_{Tx}$$

同理, 加入定时器后成功接收MSG4的概率 P_{rxm4} 如式(7)所示

$$P_{rxm4} = \frac{T_{2rx4}P_{rx4}}{T_{C2}} \quad (7)$$

$$T_{2rx4} \leq T_{C2} \leq T_{CR}, 0 < T_{2rx4} \leq T_{Tx}$$

无法成功接收MSG4的概率 P_{nrxm4} 如式(8)所示。

新型随机接入机制的状态转移图如图4所示。与图2不同, 状态1到状态3和状态4, 以及状态5到状态7和状态8的概率受定时器当前计时长度的大小影响(即定时器当前的计时长与RARW或CRW中自带计时器当前计时长度的比值)。

$$P_{nrxm4} = 1 - \frac{T_{2rx4}P_{rx4}}{T_{C2}} = \frac{T_{C2} - T_{2rx4}P_{rx4}}{T_{C2}} \quad (8)$$

$$T_{2rx4} \leq T_{C2} \leq T_{CR}, 0 < T_{2rx4} \leq T_{Tx}$$

一步转移概率矩阵如式(9)所示, 该矩阵描述了MSG1和MSG3只重传1次即可成功完成整个随机接入过程的转移概率。基于图5与式(9), 也可以求出新型机制对应的n步转移概率矩阵。

$$\begin{bmatrix} 0 & e^{-\lambda} & 1 - e^{-\lambda} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{rxm2} & P_{nrxm2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\lambda} & 1 - e^{-\lambda} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\lambda} & 1 - e^{-\lambda} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\lambda} & 1 - e^{-\lambda} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{rxm4} & P_{nrxm4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\lambda} & 1 - e^{-\lambda} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\lambda} & 1 - e^{-\lambda} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

4 隐藏节点场景下的新型随机接入机制

本节在上一节新型随机接入机制中, 加入了类似IEEE 802.11中的RTS/CTS机制, 以解决非授权频段通信中的隐藏节点问题, 具体交互流程如下:

(1) UE启动LBT, 规定当信道空闲时间达 T_{DIFS} 后, UE发出RTS帧, gNB在 T_{SIFS} 后回复CTS帧, UE在收到gNB回复的CTS帧后, 等待 T_{SIFS} 后发出MSG1, 避免隐藏节点引起的数据发送冲突。

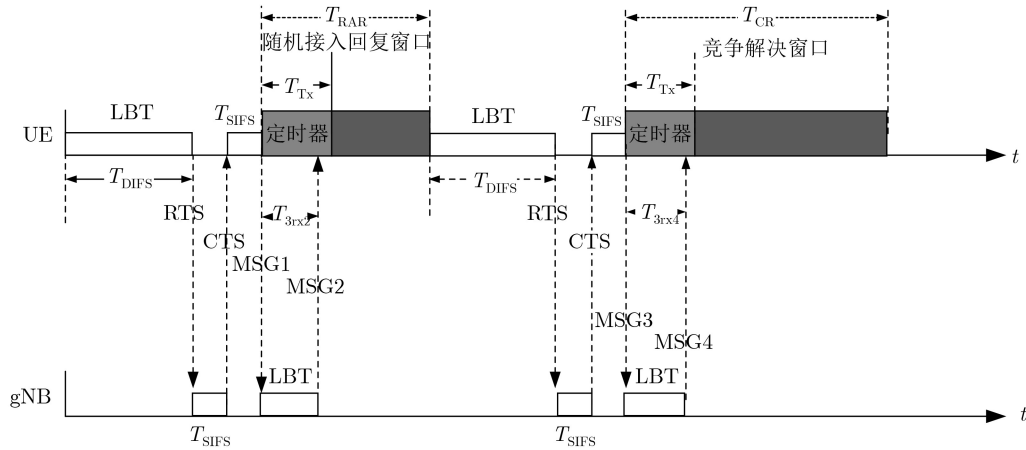


图4 隐藏节点场景下的新型随机接入机制时序图

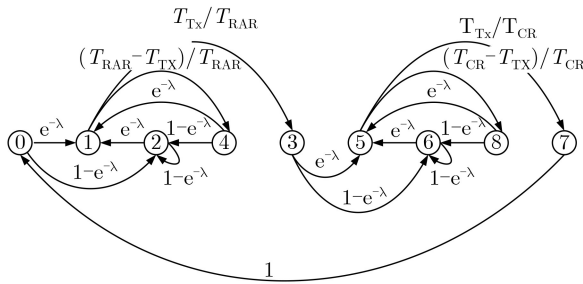


图5 新型随机接入机制状态转移图

同时, UE在发出MSG1后, 开启RARW。随着RARW的开启, T_{C1} 开始计时。如图4所示, 如UE在发出MSG1后, 利用CCA机制检测到当前非授权频段处于空闲状态, 则定时器 T_{3rx2} 开始计时。

(2) gNB接收MSG1后启动LBT, 经过 T_{3rx2} 时间后gNB发出MSG2。若 T_{3rx2} 大于 T_{Tx} , 则UE在计时器超时前不会收到MSG2, 若此时UE重传MSG1的次数未达到最大值, 则UE进行MSG1的重传, 否则进行下一轮的随机接入过程。

(3) 若 T_{3rx2} 小于 T_{Tx} , 则UE会在计时器超时前接收MSG2, 当UE收到MSG2后立即关闭RARW并进行信道LBT, 与(1)相同, 采用4步RTS/CTS握手机制进行MSG3的发送并开启接收MSG4的CRW。同样地, 在CRW中也设置了长度为 T_{Tx} 的计时器($T_{Tx} < T_{CR}$), 随着CRW的开启, T_{C2} 随之开始计时。如图4所示, 同样假设UE在发出MSG3后, 利用CCA机制检测到当前非授权频段处于空闲状态, 则定时器 T_{3rx4} 开始计时。

(4) gNB接收MSG4后进行LBT, 经过时间 T_{3rx4} 后gNB发出MSG4。若 T_{3rx4} 大于 T_{Tx} , 则UE在计时器超时前不会收到MSG4, 若此时UE重传MSG3的次数未达到最大值, 则UE进行MSG3的重传, 否则进行下一轮的随机接入过程。

(5) 若 T_{3rx4} 小于 T_{Tx} , 则UE会在计时器超时前

接收MSG4, 当UE收到MSG4后立即关闭CRW完成整个随机接入过程。

对于含 M 个竞争节点与 K 个隐藏节点的NR-U场景, 设时序图中初始状态为状态0, 则UE发送MSG1或MSG3发生碰撞的概率 P_{chco} 如式(10)所示, 成功发送MSG1和MSG3的概率 P_{nchco} 如式(11)所示。

$$\left. \begin{aligned} P_{chco} &= P_{cco} \cdot P_{hco}, (M \in \mathbb{N}^+, K \in \mathbb{N}^+) \\ P_{cco} &= [P(X=1) + P(X=2) + \dots + P(X=M)] \\ &= 1 - e^{-\lambda} \\ P_{hco} &= [P(X=1) + P(X=2) + \dots + P(X=K)] \\ &= 1 - e^{-\lambda} \\ P_{chco} &= (1 - e^{-\lambda})^2 = 1 - e^{-2\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$P_{nchco} = P(X=0) = e^{-2\lambda} \quad (11)$$

关于成功接收MSG2和MSG4的概率, 其计算方式与第3节所述机制相同。

无法成功接收MSG2的概率 P_{nrrxm2} 可以通过式(12)、式(13)计算。

$$\left. \begin{aligned} P_{rrxm2} &= \frac{T_{3rx2} P_{rx2}}{T_{C1}} \\ T_{3rx2} \leq T_{C1} \leq T_{RAR}, 0 < T_{3rx2} \leq T_{Tx} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{nrrxm2} &= 1 - \frac{T_{3rx2} P_{rx2}}{T_{C1}} = \frac{T_{C1} - T_{3rx2} P_{rx2}}{T_{C1}} \\ T_{3rx2} \leq T_{C1} \leq T_{RAR}, 0 < T_{3rx2} \leq T_{Tx} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

同理, 加入定时器后成功接收MSG4的概率 P_{rrxm4} 与无法成功接收MSG4的概率 P_{nrrxm4} 分别为

$$\left. \begin{aligned} P_{rrxm4} &= \frac{T_{3rx4} P_{rx4}}{T_{C2}} \\ T_{3rx4} \leq T_{C2} \leq T_{CR}, 0 < T_{3rx4} \leq T_{Tx} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{nrrxm4} &= 1 - \frac{T_{3rx4} P_{rx4}}{T_{C2}} = \frac{T_{C2} - T_{3rx4} P_{rx4}}{T_{C2}} \\ T_{3rx4} \leq T_{C2} \leq T_{CR}, 0 < T_{3rx4} \leq T_{Tx} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

此时，新型机制的状态转移图的结构与图5相同，其一步转移概率矩阵如式(16)所示，可求出其 n 步转移概率矩阵。

$$\begin{bmatrix} 0 & e^{-2\lambda} & 1-e^{-2\lambda} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{\text{rrxm}2} & P_{\text{nrxm}2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-2\lambda} & 1-e^{-2\lambda} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-2\lambda} & 1-e^{-2\lambda} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-2\lambda} & 1-e^{-2\lambda} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{\text{rrxm}4} & P_{\text{nrxm}4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-2\lambda} & 1-e^{-2\lambda} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-2\lambda} & 1-e^{-2\lambda} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

5 性能评估

5.1 非授权频段随机接入耗时的数学模型

传统机制以及扩大接收MSG2窗口大小的改进方法、新型机制、考虑隐藏节点时新型机制的平均耗时分别如式(17)–式(19)所示。

$$T_{0-7(1)} = T_{\text{IL1}}e^{-\lambda} + P_{\text{rx}2}T_{\text{Lrx}2} + T_{\text{IL2}}e^{-\lambda} + P_{\text{rx}4}T_{\text{Lrx}4} \quad (17)$$

$$T_{0-7(2)} = T_{\text{L1}}e^{-\lambda} + \frac{(T_{\text{Lrx}2})^2 P_{\text{rx}2}}{T_{\text{C1}}} + T_{\text{L2}}e^{-\lambda} + \frac{(T_{\text{Lrx}4})^2 P_{\text{rx}4}}{T_{\text{C2}}} \quad (18)$$

$$T_{0-7(3)} = 2T_{\text{DIFS}}e^{-2\lambda} + \frac{T_{\text{Lrx}2}P_{\text{rx}2}(2T_{\text{SIFS}} + T_{\text{Lrx}2})}{T_{\text{C1}}} + \frac{T_{\text{Lrx}4}P_{\text{rx}4}(2T_{\text{SIFS}} + T_{\text{Lrx}4})}{T_{\text{C2}}} \quad (19)$$

5.2 无隐藏节点场景下的平均耗时分析

下面讨论RARW与CRW中定时器的当前计时长度 $T_{\text{Lrx}2}$ 与 $T_{\text{Lrx}4}$ 满足何种关系时，所述机制可以提供更小的平均耗时。

令 $T_{0-7(2)} < T_{0-7(1)}$ 成立，可以得出式(20)。其几何范围是一个椭圆，如图6所示。当 $(T_{\text{Lrx}2}, T_{\text{Lrx}4})$ 的值落在椭圆范围内时(不包括边界)，式(20)成立。

$$\left. \begin{aligned} T_{0-7(2)} < T_{0-7(1)} &\Rightarrow \frac{(T_{\text{Lrx}2})^2}{\text{SE}_1} + \frac{(T_{\text{Lrx}4})^2}{\text{SE}_1} < 1 \\ \text{SE}_1 &= \text{SE}_{11} + \text{SE}_{12} + \text{SE}_{13} \\ \text{SE}_{11} &= T_{\text{C1}}T_{\text{C2}}e^{-\lambda}(T_{\text{IL1}} - T_{\text{L1}} + T_{\text{IL2}} - T_{\text{L2}}) \\ \text{SE}_{12} &= T_{\text{C1}}T_{\text{C2}}T_{\text{Lrx}2}P_{\text{rx}2} \quad \text{SE}_{13} = T_{\text{C1}}T_{\text{C2}}T_{\text{Lrx}4}P_{\text{rx}4} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

又因为 $T_{\text{Lrx}2}$ 与 $T_{\text{Lrx}4}$ 需满足如式(21)所示的关系。因此，基于式(20)及条件式(21)，当 $(T_{\text{Lrx}2}, T_{\text{Lrx}4})$ 属于图6所示高亮区域时，新型机制的平均耗时恒小于传统机制以及扩大接收MSG2窗口大小的改进方法的平均耗时。

$$0 < T_{\text{Lrx}2} \leq T_{\text{Tx}}, 0 < T_{\text{Lrx}4} \leq T_{\text{Tx}} \quad (21)$$

特别地，当令 $T_{\text{L1}}=T_{\text{L2}}=T_{\text{L1}}'$, $T_{\text{L1}2}=T_{\text{L2}2}=T_{\text{L2}}'$, $T_{\text{C1}}=T_{\text{C2}}=T_{\text{C}}$, $P_{\text{rx}2}=P_{\text{rx}4}=P_{\text{rx}}$ 时，式(21)可简化为式(22)

$$\frac{(T_{\text{Lrx}2})^2}{T_{\text{C}}(T_{\text{Lrx}2} + T_{\text{Lrx}4})} + \frac{(T_{\text{Lrx}4})^2}{T_{\text{C}}(T_{\text{Lrx}2} + T_{\text{Lrx}4})} < 1 \quad (22)$$

进一步，当传统机制及扩大接收MSG2窗口大小的改进方法中接收MSG2的耗时小于 T_{RAR} ，新型机制接收MSG2的耗时小于 T_{Tx} ，扩大接收MSG2窗口大小的改进方法、传统机制、新型机制只需1次即可完成随机接入过程时，其中仿真结果如图7所示。对于传统机制及扩大接收MSG2窗口大小的改进方法，当接收MSG2的耗时小于10 ms时(取图8(a)所示的特殊值)，对于平均耗时，传统机制与文献[9,10]所代表的解决方案的两条曲线重合，这是因为当接收MSG2的耗时小于等于10 ms时，文献[9,10]所代表的解决方案与传统机制相同，其随机接入平均耗时的计算模型与传统机制也相同(式(17))。

当接收MSG2的耗时大于10 ms时(取图8(b)所示的特殊值)，对于平均耗时，文献[9,10]的平均耗时优于传统机制的平均耗时，这是因为此时传统机制由于窗口 T_{RAR} 已经过期，因此其已进入第2轮的随机接入过程。

对于新型机制，其平均耗时随着RARW或CRW中信道空闲计时器 $T_{\text{Lrx}2}$ 或 $T_{\text{Lrx}4}$ 的增加而增加，在图8(a)中，大约在小于5.6 ms时，新型机制的平均耗时恒小于基于传统机制及文献[9,10]的平均耗时。在图8(b)中，大约在小于5 ms时，新型机制的平均耗时恒小于基于传统机制及文献[9,10]的平均耗时。因此，只要设置信道空闲定时器的窗口长度 T_{Tx} 小于5 ms，新型机制的平均耗时会优于传统机制及文献[9,10]的平均耗时。

5.3 隐藏节点场景下的平均耗时分析

在存在隐藏节点的场景下，如式(23)所示，其用于求解当新型机制考虑隐藏节点时的RARW与CRW中定时器的当前计时长度 $T_{\text{Lrx}2}$ 与 $T_{\text{Lrx}4}$ 满足何种关系时，新型机制考虑隐藏节点时的平均耗时恒小于传统机制及文献[9,10]所代表的解决方案的平均耗时。令 $T_{0-7(3)} < T_{0-7(1)}$ 成立，可求出如式(23)所示的几何范围，如图8所示，当 $(T_{\text{Lrx}2}, T_{\text{Lrx}4})$ 的值落在该范围内时(不包括边界)，式(23)成立。

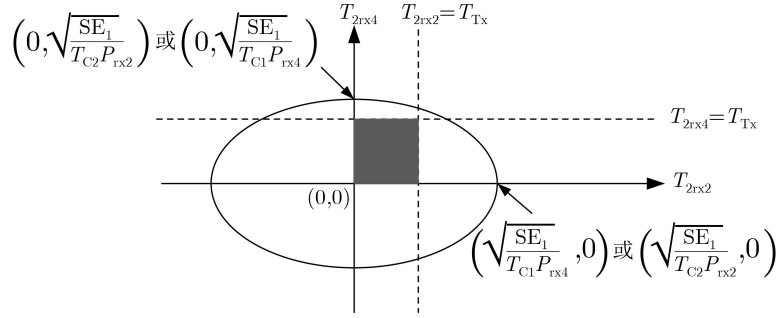
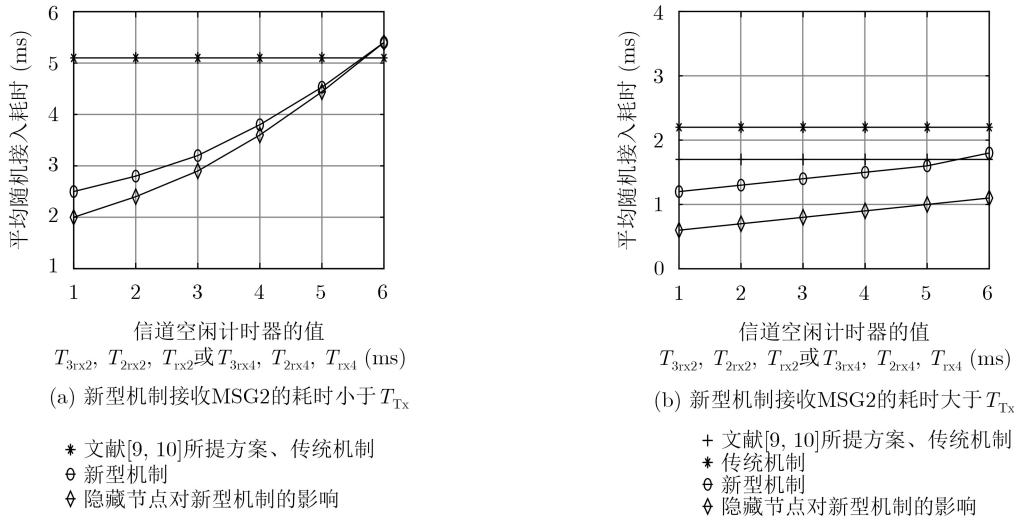
图6 满足 $T_{0-7(2)} < T_{0-7(1)}$ 时 (T_{2rx2}, T_{2rx4}) 的取值范围

图7 考虑隐藏节点时各随机接入方法平均耗时比较

$$\begin{aligned}
 T_{0-7(3)} < T_{0-7(1)} &\Rightarrow SE_0 < T_{C1}T_{C2}SE_1 \\
 &\Rightarrow SE_2 + SE_3 < 1 \Rightarrow SE_4 + SE_5 < 1 \\
 SE_0 &= T_{C2}T_{3rx2}P_{rx2}(2T_{SIFS} + T_{3rx2}) \\
 &\quad + T_{C1}T_{3rx4}P_{rx4}(2T_{SIFS} + T_{3rx4}) \\
 SE_1 &= e^{-\lambda}(T_{1L1} + T_{1L2}) + P_{rx2}T_{1rx2} + P_{rx4}T_{1rx4} \\
 &\quad - 2T_{DIFS}e^{-2\lambda} \\
 SE_2 &= \frac{T_{C2}P_{rx2}(T_{3rx2} + T_{SIFS})^2}{(T_{C2}P_{rx2} + T_{C1}P_{rx4})(T_{SIFS})^2 + T_{C1}T_{C2}SE_1} \\
 SE_3 &= \frac{T_{C1}P_{rx4}(T_{3rx4} + T_{SIFS})^2}{(T_{C2}P_{rx2} + T_{C1}P_{rx4})(T_{SIFS})^2 + T_{C1}T_{C2}SE_1} \\
 SE_4 &= \frac{(T_{3rx2} + T_{SIFS})^2}{(T_{C2}P_{rx2} + T_{C1}P_{rx4})(T_{SIFS})^2 + T_{C1}T_{C2}SE_1} \\
 SE_5 &= \frac{T_{C2}P_{rx2}}{(T_{3rx4} + T_{SIFS})^2} \\
 &\quad \frac{(T_{C2}P_{rx2} + T_{C1}P_{rx4})(T_{SIFS})^2 + T_{C1}T_{C2}SE_1}{T_{C1}P_{rx4}}
 \end{aligned} \quad (23)$$

又因为 T_{2rx2} 与 T_{2rx4} 需满足如式(21)所示的关系。因此,基于式(23)及式(21),当 (T_{2rx2}, T_{2rx4}) 属于图8所示高亮区域时,新型机制考虑隐藏节点时的平均耗时恒小于基于传统机制的平均耗时。

特别地,令 $T_{1L1}=T_{2L1}=T_{L1}$, $T_{1L2}=T_{2L2}=T_{L2}$, $T_{C1}=T_{C2}=T_C$, $P_{rx2}=P_{rx4}=P_{rx}$,式(23)可简化为式(24)。

如图7所示。对于新型机制,此时只需设置信道空闲定时器的窗口长度 $T_{Tx} < 5.6$ ms,即可满足新型机制的平均耗时优于传统机制及扩大接收MSG2窗口大小的改进方法的平均耗时。

$$\begin{aligned}
 SE_2 + SE_3 &< 1 \\
 SE_2 &= \frac{(T_{3rx2} + T_{SIFS})^2}{(2T_C P_{rx})(T_{SIFS})^2 + (T_C)^2 SE_1} \\
 SE_3 &= \frac{(T_{3rx4} + T_{SIFS})^2}{(2T_C P_{rx})(T_{SIFS})^2 + (T_C)^2 SE_1} \\
 SE_1 &= e^{-\lambda}(T_{1L1} + T_{1L2}) + P_{rx2}T_{1rx2} + P_{rx4}T_{1rx4} \\
 &\quad - 2T_{DIFS}e^{-2\lambda}
 \end{aligned} \quad (24)$$

5.4 新型机制与考虑隐藏节点时的平均耗时对比

令RARW与CRW中的定时器当前计时的长度相等,令 $T_{0-7(3)} < T_{0-7(2)}$ 成立,可求出式(25)

$$\left. \begin{aligned}
 &T_{0-7(3)} < T_{0-7(2)} \\
 &\Rightarrow 2T_{C2}T_{rx2}P_{rx2}T_{SIFS} + 2T_{C1}T_{rx4}P_{rx4}T_{SIFS} < SE_1T_{C1}T_{C2} \\
 &\Rightarrow \frac{T_{rx2}}{\frac{SE_1T_{C1}T_{C2}}{2T_{C2}P_{rx2}T_{SIFS}}} + \frac{T_{rx4}}{\frac{SE_1T_{C1}T_{C2}}{2T_{C1}P_{rx4}T_{SIFS}}} < 1 \\
 &SE_1 = T_{2L1}e^{-\lambda} + T_{2L2}e^{-\lambda} - 2T_{DIFS}e^{-2\lambda}
 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式(25)表示一条斜线，其几何范围如图9所示。当 (T_{rx2}, T_{rx4}) 的值落在斜线下方时，式(25)成立。

进一步，当传统机制及文献[9,10]所提方案中接收MSG2的耗时大于 T_{RAR} ，新型机制接收MSG2的耗时大于 T_{Tx} ，扩大接收MSG2窗口大小的改进方法只需1次即可完成随机接入过程、传统机制与

新型机制需重传1次完成随机接入过程时，仿真结果如图7(a)–图7(b)所示。可以看出，平均耗时随着RARW或CRW中信道空闲计时器 T_{rx2} 或 T_{rx4} 的增加而增加。由于考虑隐藏节点的新型机制进一步考虑了隐藏节点对随机接入过程的影响，因此平均耗时会优于未考虑隐藏节点时的平均耗时。

又因为 T_{rx2} 与 T_{rx4} 需满足如式(21)所示的关系。因此，基于式(25)及条件式(21)，当 (T_{rx2}, T_{rx4}) 属于图9所示高亮区域时，新型机制考虑隐藏节点时的平均耗时恒小于未考虑隐藏节点时的平均耗时。

令 $T_{2L1}=T_{DIFS}=2T_{SIFS}$ ， $T_{C1}=T_{C2}=T_C$ ， $P_{rx2}=P_{rx4}=P_{rx}$ ，式(25)可简化为式(26)。

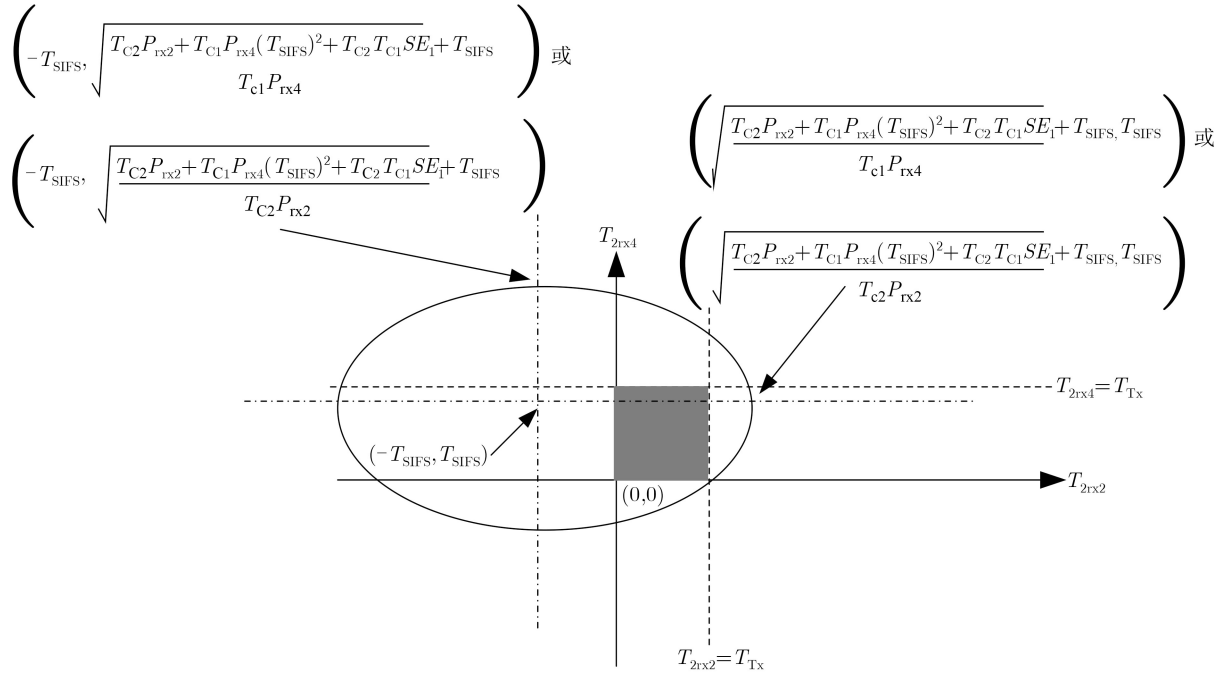


图8 满足 $T_{0-7(3)} < T_{0-7(1)}$ 时 (T_{rx2}, T_{rx4}) 的取值范围

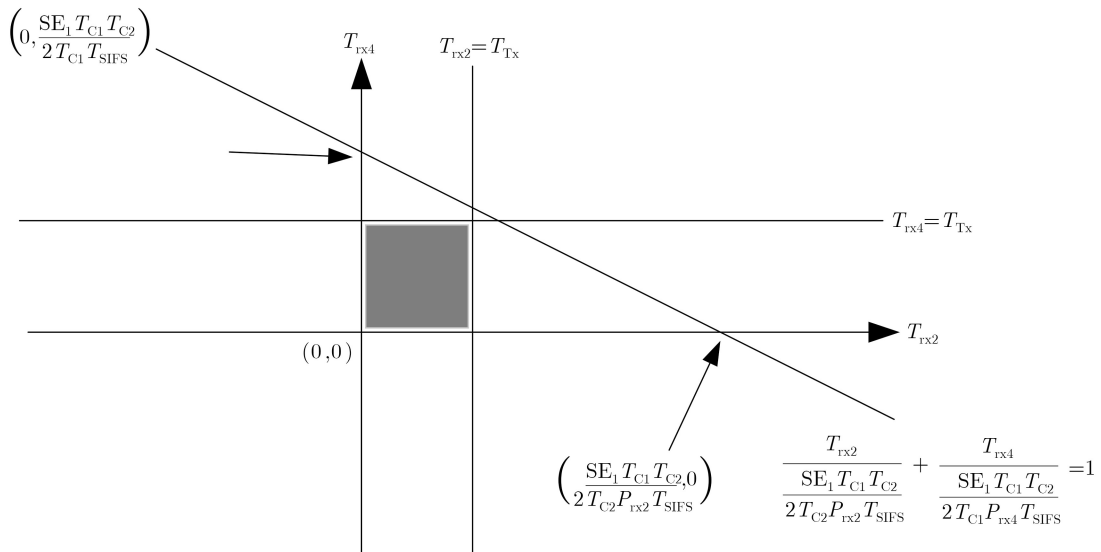


图9 满足 $T_{0-7(3)} < T_{0-7(2)}$ 时 (T_{rx2}, T_{rx4}) 的取值范围

$$\frac{T_{rx2}}{SE_1 T_C} + \frac{T_{rx4}}{SE_1 T_C} < 1$$

$$\frac{P_{rx} T_{DIFS}}{P_{rx} T_{DIFS}} \quad SE_1 = T_{DIFS} e^{-\lambda} (1 - 2e^{-3\lambda}) + T_{2L2} e^{-\lambda} \quad (26)$$

本文提出的新型机制给出了一个信道空闲计时器窗口 T_{Tx} 的取值范围参考,当信道空闲计时器在图6、图8所示高亮区域时,新型机制要优于传统机制。

图7也可体现上述思想,即当信道空闲计时器窗口 T_{Tx} 取6 ms,横坐标位于(1 ms, 5.6 ms)之间表示当前两个窗口中信道空闲计时器的取值组合落于图6、图8所示的高亮区域,当位于(5.6 ms, 6 ms)之间时,取值组合落于高亮区域之外。在本文所示案例,只需将 T_{Tx} 设置为 ≤ 5 ms,新型机制一直优于传统机制。

6 结束语

本文提出了一种应用于5G NR-U场景的新型随机接入机制。该新型机制分别在RARW与CRW中加入了信道空闲计时器,UE通过对信道忙闲状态的检测来推测网络侧的状态,该机制在某些情况下可减少随机接入过程的耗时。同时,本文进一步加入了RTS/CTS机制来解决隐藏节点的问题。新型机制在随机接入平均耗时方面具有优越性。

参 考 文 献

- [1] LIN Guanyu, Chang Shirong, and WEI H Y. Estimation and adaptation for bursty LTE random access[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(4): 2560–2577. doi: [10.1109/TVT.2015.2418811](#).
- [2] DE ANDRADE T P C, ASTUDILLO C A, SEKIJIMA L R, et al. The random access procedure in long term evolution networks for the Internet of things[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(3): 124–131. doi: [10.1109/MCOM.2017.1600555CM](#).
- [3] 3GPP TR 37.868 Study on RAN improvements for machine type communications (releases 11)[S]. 3GPP Standard, 2011.
- [4] CHOU C M, HUANG C Y, and CHIU C Y. Loading prediction and barring controls for machine type communication[C]. 2013 IEEE International Conference on Communications, Budapest, Hungary, 2013: 5168–5172. doi: [10.1109/ICC.2013.6655404](#).
- [5] YOON C. Distributed queuing with preamble grouping for massive IoT devices in LTE random access[C]. 2016 International Conference on Information and Communication Technology Convergence, Jeju, South Korea, 2016: 103–105. doi: [10.1109/ICTC.2016.7763445](#).
- [6] ALI M S, HOSSAIN E, and KIM D I. LTE/LTE-A Random access for massive machine-type communications in smart cities[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(1): 76–83. doi: [10.1109/MCOM.2017.1600215CM](#).
- [7] ZHANG Ningbo. An improved random access procedure for M2M communications[C]. 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Doha, Qatar, 2016: 1–5. doi: [10.1109/WCNC.2016.7564738](#).
- [8] QUALCOMM INC. New WID on NR-based access to unlicensed spectrum[R]. RP-182400, 2018.
- [9] SAMSUNG. Random access response reception in NR-U[R]. R2-1816312, 2018.
- [10] XIAOMI. Considerations on extending RAR window size[R]. 2019.
- [11] MEDIATEK INC. LBT impact on random access procedure in MAC[R]. R2-1901079, 2019.
- [12] ERICSSON. 2-step random access for NR-U[R]. 2019.
- [13] INTERDIGITAL. Random access in NR-unlicensed[R]. 2019.

朱正航: 男, 1982年生, 高级工程师, 研究方向为5G、软件定义无线电。

贾建鑫: 男, 1988年生, 助理工程师, 研究方向为LTE与5G系统。

酆振红: 女, 1977年生, 博士, 研究方向为5G标准化。

钱 骅: 男, 1976年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为无线通信、非线性信号处理、大数据信号处理。

康 凯: 男, 1977年生, 正高级工程师, 硕士生导师, 研究方向为下一代无线通信系统、5G、Wi-Fi系统。

责任编辑: 马秀强