

## 一种新型5G非授权频段非连续接收机制

裴旭明<sup>①②</sup> 钱 骅<sup>①</sup> 王海峰<sup>③</sup> 康 凯<sup>\*①②④</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院上海高等研究院 上海 201210)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

<sup>③</sup>(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050)

<sup>④</sup>(中国科学院上海微系统与信息技术研究所无线传感网与通信重点实验室 上海 200050)

**摘 要:** 非连续接收(DRX)是5G非授权频段部署中重要的节能机制。为授权频段设计的非连续接收机制,不能良好适配非授权频段,唤醒窗口长度固定而不能随信道繁忙程度调整,为保证传输时延性能则需要消耗更多能量。该文针对5G非授权频段新无线技术(5G NR-U),提出一种新型非连续接收机制。在新机制中,非授权频段新空口设备处于唤醒状态时不断对信道进行能量检测来判断信道的忙闲状态,并据此自适应调整唤醒窗口时间。相比唤醒窗口长度固定的原有机制,数学模型分析和仿真实验的结果表明,在保证业务传输时延要求的前提下,新机制可比原有机制节约更多的能量。在文中典型场景中,新机制比原有机制可多节约能量11%。

**关键词:** 非连续接收; 能量效率; 先听后说; 5G非授权频段新无线技术

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)07-1879-07

DOI: 10.11999/JEIT200497

## A Novel Discontinuous Reception Mechanism for 5G in Unlicensed Band

PEI Xuming<sup>①②</sup> QIAN Hua<sup>①</sup> WANG Haifeng<sup>③</sup> KANG Kai<sup>\*①②④</sup>

<sup>①</sup>(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

<sup>②</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

<sup>③</sup>(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

<sup>④</sup>(Key Laboratory of Wireless Sensor Network & Communication, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** Discontinuous Reception (DRX) is power-saving mechanism in 5G unlicensed band deployments. Legacy DRX scheme for licensed band does not work well in unlicensed band. Wakeup window size is fixed and can not adjust with channel busy level. Guaranteed transmission delay is at the cost of more power consumption. A novel DRX scheme of is proposed for the 5th Generation New Radio-Unlicensed (5G NR-U) standalone scenario. In the novel scheme, NR-U equipment runs energy detection continuously during its wakeup period to get channel state: busy or free and adjusts its wakeup window size adaptively according to energy detection results. Comparing to legacy method with wakeup window fixed, it is demonstrated by analysis and simulation that the novel method saves more power than traditional method while both of them meet the average delay requirement. In the analysis scenario of this paper, novel method saves 11% power more than legacy method.

**Key words:** Discontinuous Reception (DRX); Energy efficiency; Listen-Before-Talk (LBT); The 5th Generation New Radio-Unlicensed (5G NR-U)

收稿日期: 2020-06-18; 改回日期: 2020-11-04; 网络出版: 2020-11-06

\*通信作者: 康凯 kangk@sari.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61671436), 上海市科委资助项目(18511103502)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671436), The Science and Technology Commission Foundation of Shanghai (18511103502)

## 1 引言

移动通信业务需求不断增长, 授权频谱资源短缺日益明显。非授权频谱的使用是第5代移动通信技术(5th Generation, 5G)发展的重要方向, 第3代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)在R16阶段启动5G新空口(New Radio, NR)的非授权频段版本(New Radio-Unclicensed, NR-U)的标准化工作。NR-U通过先听后说(Listen Before Talk, LBT)机制与非授权频段上的其他通信制式设备共存。NR-U的5个部署场景包括: NR和NR-U载波聚合、长期演进技术(Long Term Evolution, LTE)和NR-U双连接、NR-U独立部署、下行非授权频段-上行授权频段的NR, NR和NR-U双连接<sup>[1]</sup>。独立部署不依赖授权频段辅助, 控制接入、数据传输仅通过非授权频段, 使NR-U部署更灵活, 适用更多实际场景<sup>[2]</sup>。移动设备的节能是设计时的重要考虑因素, 有研究者对NR-U接入阶段时延功耗性能进行研究<sup>[3]</sup>。3GPP在LTE和NR中都引入非连续接收机制(Discontinuous Reception, DRX)<sup>[4]</sup>, 利用数据包间歇性到达的特点, 允许用户终端设备(User Equipment, UE)在无数据传输时进入休眠模式, 从而降低终端能耗<sup>[5]</sup>。

5G NR-U的DRX基于NR的DRX演进。非授权频段设备用先听后说(LBT)机制竞争信道, NR-U中DRX面临的主要问题是: 在需要发送时无法保证可以竞争到信道<sup>[4]</sup>, 导致传输时延增加; 唤醒窗口长度固定, 因此为满足时延要求, 终端需消耗更多能量。研究者基于3GPP DRX机制提出授权频段DRX的性能模型和改进方案: 基于马尔可夫链的LTE DRX性能分析模型<sup>[6]</sup>; 结合马尔可夫链和生灭过程的LTE DRX平均排队时延模型<sup>[7]</sup>; 自相似业务下的LTE DRX性能分析<sup>[8]</sup>; 在5G云化接入网(Cloud-Radio Access Network, Cloud-RAN)联合传输(joint transmission)条件下DRX参数优化方法<sup>[9]</sup>; 增加预授权信号提升NR DRX性能<sup>[10,11]</sup>; 5G毫米波频段DRX机制<sup>[12]</sup>; 信道容量预测对车载

终端DRX性能的影响<sup>[13]</sup>。非授权频段非独立部署场景DRX分析模型和改进方案: 授权频谱辅助接入(Licensed-Assisted Access, LAA)场景下DRX性能模型, 通过授权频段信令控制非授权频段DRX<sup>[14]</sup>。3GPP仍在讨论非授权频段独立部署场景的DRX方案, 已有提案涉及, 暂时没有完整的解决方案和对性能的定量分析。文献<sup>[15]</sup>提出延长唤醒状态或缩短休眠周期, 以功耗代价来保证时延性能。文献<sup>[16]</sup>提出增加信道获得指示信号(channel acquisition indication signal)来改善性能。

本文提出一种适用于NR-U独立部署场景的DRX机制。与在非授权频段直接应用现有机制相比, 新机制在满足同样的时延要求的前提下可节约更多能量。通过建立数学模型和仿真, 对以上两种机制性能进行分析和比较。本文其余部分安排如下: 第2节介绍现有的DRX机制; 第3节提出新型非授权频段DRX机制, 建立性能分析模型; 第4节通过理论分析和仿真, 对新旧机制进行性能比较; 第5节总结全文。

## 2 移动通信中的非连续接收机制

### 2.1 授权频段中的非连续接收机制

授权频段中的DRX机制<sup>[17]</sup>如图1。终端从休眠状态下周期唤醒, 打开接收机监听下行控制信道, 检查是否有数据包需要接收。若有数据包需要接收, 终端保持接收机开启, 转入活跃模式(power active mode), 完成数据传输。如没有数据包需要接收, 终端关闭接收机, 转入休眠模式(sleep mode)。相关参数包括: 从活跃模式进入休眠模式等待的时间 $T_1$ ; 短休眠周期 $T_{DS}$ ; 进入长休眠周期前的短休眠周期个数 $N_{DS}$ ; 长休眠周期 $T_{DL}$ ; 每个休眠周期中UE监听信道的时间 $T_{ON}$ 。终端在接收到数据包后处于活跃模式, 若 $T_1$ 时间内没有再接收到数据包, 则转入浅休眠模式(light sleep mode)。浅休眠模式中使用短休眠周期 $T_{DS}$ , 每 $T_{DS}$ 时间内, 终端唤醒 $T_{ON}$ 时间监听下行控制信道, 若连续 $N_{DS}$ 个短休眠周期没有接收到数据包, 终端转入深休眠模

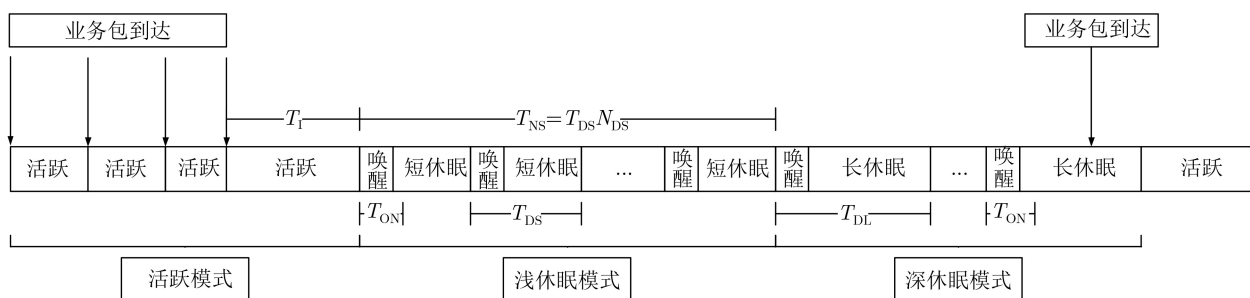


图1 3GPP DRX机制

式。深休眠模式中使用长休眠周期 $T_{DL}$ ，每 $T_{DL}$ 时间内，终端唤醒 $T_{ON}$ 时间监听下行控制信道。终端的唤醒状态也称ON状态。基站(Base Station, BS)为UE配置DRX参数，使其时延与功耗间达到平衡<sup>[15]</sup>。NR与LTE中的DRX机制是相似的<sup>[18]</sup>。在授权频段中，DRX参数决定UE的业务包接收时延和功耗。当业务数据间歇产生时，若不使用DRX机制，UE在数据到达的间隙中(图1的两次包到达之间)仍保持活跃状态，导致能量浪费。使用DRX机制，UE在业务包到达间隙中休眠以降低功耗；同时UE周期唤醒检查是否有数据需要接收，保证接收时延低于一定的阈值。

## 2.2 非授权频段中的非连续接收机制

非授权频段DRX基于授权频段DRX机制演进发展<sup>[17]</sup>，基本方法是直接应用授权频段DRX机制。授权频段由单一无线接入技术(如LTE或NR)独占，BS完全控制信道资源的分配和使用。BS有数据发送给UE时，可在UE的唤醒时间段 $T_{ON}$ 内发送。非授权频段由多种无线接入技术(如NR-U和Wi-Fi)共享，BS失去了对信道资源的绝对控制。BS有数据发送给UE，若在UE的唤醒时间段内信道被其他设备占用，BS无法在 $T_{ON}$ 内竞争到信道，数据包至少要推迟到下一个休眠周期的ON中发送，平均接收时延增大<sup>[4]</sup>。

有3GPP提案提出针对授权频段DRX机制的扩展方法。文献<sup>[15]</sup>指出，无法保证UE在被调度时信道空闲，应延长 $T_{ON}$ 或缩短 $T_{DS}$ 和 $T_{DL}$ ，增加UE活跃时间的比例，保证UE平均接收时延小于某一阈值，这类方法以功耗增加为代价来保证时延性能。文献<sup>[16]</sup>提出，若BS在临近ON结束时才竞争到信道，剩余时间不够发送数据包，则先发送信道获得指示信号，通知UE延长 $T_{ON}$ ，完成接收，这类方法引入额外的信号，UE需要在ON状态处理该信号，实现难度增大，且带来的性能改善有限。

综上，与授权频段DRX相比，非授权频段DRX中UE平均接收时延受到信道忙闲状态影响。现有DRX改进方案，以功耗为代价保证时延或增加额外信号以降低某些特殊情况的时延，尚有性能提升空间。

## 3 新型非授权频段非连续接收机制

### 3.1 新型的非连续接收机制

LBT过程中，设备对信道进行能量检测(Energy Detection, ED)来判断信道的忙闲状态。NR-U设备具有能量检测能力，可根据能量检测结果自适应调整 $T_{ON}$ 长度，优化DRX性能。

DRX过程中，ON持续时间由ON状态定时器

(on-duration timer)决定，进入ON状态后启动定时器，定时器到期即退出ON状态。新机制中，进入ON状态时，定时器到期时间初始化为 $T_{ON}$ ；UE打开接收机，尝试解物理下行控制信道(Physical Downlink Control CHannel, PDCCH)的同时，不间断地进行能量检测，判断信道忙闲，据此实时调整定时器到期时间。设一次能量检测耗时 $\mu_T$ ，设备每检测到一次信道忙，就将定时器到期时间增加 $\mu_T$ 。设备重复“能量检测——延长到期时间”过程，直至定时器到期。ON内检测到信道越繁忙，ON结束时间越推后。可以为定时器到期时间设置一个上限值 $T_{ON-MAX}$ ，实际的ON持续时间根据信道繁忙程度在 $T_{ON}$ 和 $T_{ON-MAX}$ 之间动态变化。UE根据信道繁忙程度调整唤醒时间，获取更多的接收机会，减少业务包传输时延。BS也同样执行上述的操作，以同步跟踪UE的唤醒时间变化。

### 3.2 性能分析前提与指标

设非授权频段上存在NR-U和其他通信制式设备。任何设备对信道的占用都对所有设备可见，无隐藏节点。新型和传统DRX机制都只采用一种休眠周期 $T_{DL}$ ，短休眠周期和长休眠周期相等。BS不定期的有下行业务包发送给UE，业务包间隔大于 $T_I$ ，业务包到达时刻落在休眠模式中。DRX机制性能指标有两个。业务包平均时延(packet average delay)：下行业务包到达BS的时刻与BS成功接入信道并开始通过空口发包的时刻之间的平均时间。节能因子(power-saving factor)：UE纯休眠时间占DRX休眠模式总时间的比例。

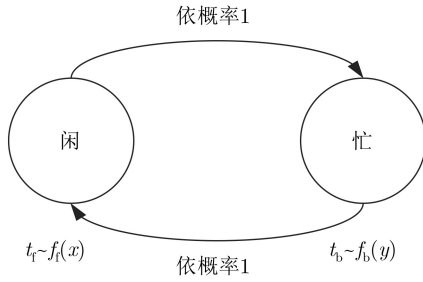
### 3.3 信道忙闲模型

非授权频段信道的占用情况可用忙-闲状态模型描述<sup>[19]</sup>，如图2。忙闲状态交替出现，忙状态持续时间为随机变量 $t_b$ ，概率密度函数为 $f_b(y)$ ， $y>0$ ，任意2次忙状态持续时间独立同分布。同样地，闲状态的持续时间为随机变量 $t_f$ ，概率密度函数为 $f_f(x)$ ， $x>0$ ，任意2次闲状态的持续时间也为独立同分布。忙状态持续时间与闲状态持续时间相互独立，可以是参数不同或相同的指数分布，如式(1)和式(2)

$$f_f(x) = \begin{cases} \lambda_f e^{-\lambda_f x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$f_b(y) = \begin{cases} \lambda_b e^{-\lambda_b y}, & y > 0 \\ 0, & y \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

信道处于闲和忙的平均时间分别为 $E[t_f]=1/\lambda_f$ ， $E[t_b]=1/\lambda_b$ 。长时间观察，信道忙的总时间占总观察时间的比例称为信道繁忙程度，如式(3)。在任意时刻，信道处于闲和忙的概率分别为 $1-\rho$ 和 $\rho$

图2 非授权频段信道忙闲模型<sup>[19]</sup>

$$\rho = \frac{E[t_b]}{E[t_b] + E[t_f]} = \frac{\lambda_f}{\lambda_b + \lambda_f} \quad (3)$$

将一次闲的持续时间及与其相邻的下一个忙的持续时间之和，视作一个新的随机变量： $t_c = t_f + t_b$ 。当 $\lambda_f$ 不等于 $\lambda_b$ 时， $t_c$ 的概率密度函数和期望，如式(4)和式(5)<sup>[20]</sup>；当 $\lambda_f$ 等于 $\lambda_b$ 时， $t_c$ 服从参数为(2,  $\lambda_f$ )的伽马分布<sup>[21,22]</sup>，它的概率密度函数和期望如式(6)和式(7)<sup>[21]</sup>。综上， $t_c$ 的期望可以统一用式(5)表示

$$f_c(t_c) = \frac{\lambda_f \lambda_b}{\lambda_b - \lambda_f} (e^{-\lambda_f t_c} - e^{-\lambda_b t_c}), t_c \geq 0 \quad (4)$$

$$E[t_c] = \int_0^{\infty} t_c f_c(t_c) dt_c = \frac{\lambda_f + \lambda_b}{\lambda_f \lambda_b} \quad (5)$$

$$f_c(t_c) = \frac{\lambda_f^2}{\Gamma(2)} t_c e^{-\lambda_f t_c}, t_c \geq 0 \quad (6)$$

$$E[t_c] = \frac{2}{\lambda_f} \quad (7)$$

### 3.4 性能指标推导

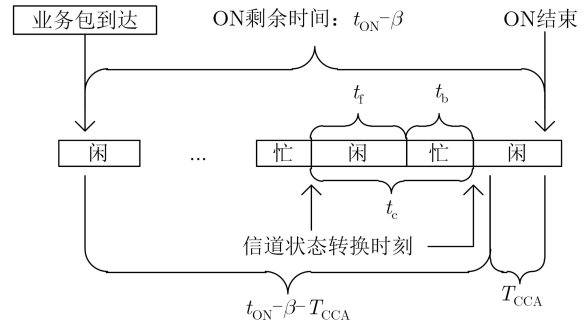
设备执行3GPP规定的CAT 2类别无随机退避LBT流程<sup>[23]</sup>。须检测到信道连续保持足够长时间的闲状态后设备才可接入信道。设此时间阈值为 $T_{CCA}$ ，信道连续保持在闲状态的时间大于 $T_{CCA}$ 的概率为

$$P_{CCA} = \Pr[t_f > T_{CCA}] = e^{-\lambda_f T_{CCA}} \quad (8)$$

设ON窗口大小为 $t_{on}$ ，从ON的起始时刻到业务包到达时刻经历的时间为 $\beta$ ，从业务包到达时刻到ON的结束时刻的时间为 $t_{on} - \beta$ 。在业务包的到达时刻，信道可能处于忙或闲状态，以下分别讨论这两种情况。

(1) 业务包到达时刻信道为闲状态。若 $t_{on} - \beta < T_{CCA}$ ，则ON剩余时间不够完成一次LBT，发送设备无法在当前休眠周期内完成信道接入。

若 $t_{on} - \beta \geq T_{CCA}$ ，则在ON剩余时间内有可能完成一次LBT。如图3，业务包到达时刻是启动LBT的机会；剩余时间内可能有信道由忙到闲的转换，转换时刻也是启动LBT的机会。LBT机会越多，成功接入概率越大。转换时刻距ON结束大于 $T_{CCA}$

图3 业务包到达时刻信道为闲状态且 $t_{on} - \beta \geq T_{CCA}$ 时的示意图

时，LBT可能成功；小于 $T_{CCA}$ 时，LBT一定会失败。设 $t_{on} - \beta - T_{CCA}$ 内，LBT机会数为随机变量 $X'$ 。相邻闲状态起始时刻的间隔是 $t_c$ ，期望为 $E[t_c]$ 。不考虑起始时刻的闲状态，在 $t_{on} - \beta - T_{CCA}$ 内出现忙闲转换的平均次数为 $\lambda = (t_{on} - \beta - T_{CCA}) / E[t_c]$ 。根据适合用泊松分布建模的随机变量需要满足的条件<sup>[24]</sup>，可假设 $X'$ 近似服从泊松分布，如式(9)。设ON的剩余时间内启动LBT的机会数为 $X$ ，在 $X'$ 的基础上，计入业务包到达时刻信道闲引入的一次机会，得到 $X$ 的概率分布函数如式(10)

$$\left. \begin{aligned} P(X' = k) &= \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, k = 0, 1, \dots \\ \lambda &= \frac{t_{on} - \beta - T_{CCA}}{E[t_c]} = \frac{(t_{on} - \beta - T_{CCA}) \lambda_f \lambda_b}{\lambda_f + \lambda_b} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} P(X = 0) &= 0 \\ P(X = k) &= P(X' = k - 1), k = 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

综上，已知 $\lambda_f$ 和 $\lambda_b$ ，且业务包到达时刻信道为闲，ON内成功接入概率是 $t_{on}$ 和 $\beta$ 的函数，如式(11)。在ON内能够成功接入时的平均时延也是 $t_{on}$ 和 $\beta$ 的函数，如式(12)

$$P_{sF}(t_{on}, \beta) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{\infty} P[X = i] [1 - (1 - P_{CCA})^i], & 0 < \beta \leq t_{on} - T_{CCA} \\ 0, & t_{on} - T_{CCA} < \beta < t_{on} \end{cases} \quad (11)$$

$$D_{sF}(t_{on}, \beta) = \sum_{i=1}^{\infty} P[X = i] \sum_{j=1}^i (1 - P_{CCA})^{j-1} \cdot P_{CCA} \{T_{CCA} + (j - 1)E[t_c]\}, \quad 0 < \beta \leq t_{on} - T_{CCA} \quad (12)$$

(2) 业务包到达时刻信道为忙状态。设从业务包到达时刻起，忙状态持续时间为 $\alpha$ 。则可用于LBT的ON剩余时间为 $t_{on} - \beta - \alpha$ ，且在剩余时间的起始时刻信道处于闲状态。可利用(1)得到的式(11)和式(12)进行推导。

若 $t_{on} - \beta - \alpha < T_{CCA}$ ，则ON剩余时间不够完成一

次LBT，发送设备无法在当前休眠周期内完成信道接入。

若 $t_{\text{on}} - \beta - \alpha \geq T_{\text{CCA}}$ ，在ON剩余时间内有可能完成LBT。在以闲起始的ON剩余时间内成功接入概率是 $P_{\text{sF}}(t_{\text{on}} - \beta - \alpha, 0)$ ；遍历 $\alpha$ ，求 $P_{\text{sF}}(t_{\text{on}} - \beta - \alpha, 0)$ 的期望，得到业务包到达时刻信道为忙时，成功接入概率如式(13)

$$P_{\text{sB}}(t_{\text{on}}, \beta) = \begin{cases} \int_0^{t_{\text{on}} - \beta - T_{\text{CCA}}} f_{\text{b}}(\alpha) P_{\text{sF}}(t_{\text{on}} - \beta - \alpha, 0) d\alpha, & \beta \leq t_{\text{on}} - T_{\text{CCA}} \\ 0, & t_{\text{on}} - T_{\text{CCA}} < \beta < t_{\text{on}} \end{cases} \quad (13)$$

业务包到达时刻信道为忙状态时成功接入信道的平均时延如式(14)。在给定 $\alpha$ 时，时延由 $\alpha$ 和业务包到达时为空闲状态的成功接入平均时延组成；基于此遍历所有可能的 $\alpha$ 取值求时延期望，得到最终结果

$$D_{\text{sB}}(t_{\text{on}}, \beta) = \int_0^{t_{\text{on}} - \beta - T_{\text{CCA}}} f_{\text{b}}(\alpha) \cdot [\alpha + D_{\text{sF}}(t_{\text{on}} - \beta - \alpha, 0)] d\alpha, \quad 0 < \beta \leq t_{\text{on}} - T_{\text{CCA}} \quad (14)$$

综合考虑(1)和(2)两种情况，设备在当前休眠周期内成功接入信道的概率如式(15)

$$P_{\text{s}}(t_{\text{on}}, \beta) = \begin{cases} \rho P_{\text{sB}}(t_{\text{on}}, \beta) + (1 - \rho) P_{\text{sF}}(t_{\text{on}}, \beta), & 0 \leq \beta \leq t_{\text{on}} - T_{\text{CCA}} \\ 0, & t_{\text{on}} - T_{\text{CCA}} < \beta < T_{\text{DL}} \end{cases} \quad (15)$$

同样地，设备在当前休眠周期成功接入信道而产生的平均时延如式(16)

$$M_{\text{s}}(t_{\text{on}}, \beta) = \rho D_{\text{sB}}(t_{\text{on}}, \beta) + (1 - \rho) D_{\text{sF}}(t_{\text{on}}, \beta), \quad 0 \leq \beta \leq t_{\text{on}} - T_{\text{CCA}} \quad (16)$$

根据式(11)可以得到，在当前休眠周期接入失败的概率如式(17)

$$P_{\text{f}}(t_{\text{on}}, \beta) = \begin{cases} 1 - P_{\text{s}}(t_{\text{on}}, \beta), & 0 \leq \beta \leq t_{\text{on}} - T_{\text{CCA}} \\ 1, & t_{\text{on}} - T_{\text{CCA}} < \beta < T_{\text{DL}} \end{cases} \quad (17)$$

若在当前休眠周期中接入失败，设备会在下一个休眠周期的ON中继续尝试接入，相当于业务包在下一个周期的0时刻到达，直到最终成功接入信道。在后续休眠周期中消耗的平均时间，如式(18)

$$D_1(t_{\text{on}}) = \sum_{i=0}^{\infty} \left[ iT_{\text{DL}} + \frac{M_{\text{s}}(t_{\text{on}}, 0)}{P_{\text{s}}(t_{\text{on}}, 0)} \right] [1 - P_{\text{s}}(t_{\text{on}}, 0)]^i \cdot P_{\text{s}}(t_{\text{on}}, 0) \quad (18)$$

考虑在业务包到达时刻所在休眠周期接入和在后续休眠周期中接入的情况，总平均接入时延如式(19)

$$D(t_{\text{on}}, \beta) = \begin{cases} M_{\text{s}}(t_{\text{on}}, \beta) + [1 - P_{\text{s}}(t_{\text{on}}, \beta)] \cdot [T_{\text{DL}} - \beta + D_1(t_{\text{on}})], & 0 < \beta < t_{\text{on}} - T_{\text{CCA}} \\ T_{\text{DL}} - \beta + D_1(t_{\text{on}}), & t_{\text{on}} - T_{\text{CCA}} < \beta < T_{\text{DL}} \end{cases} \quad (19)$$

设业务包在一个休眠周期内的到达时刻的概率密度函数为 $f_{\text{p}}(\beta)$ ，遍历所有到达时刻的可能取值，可得到DRX机制对应的总平均时延，如式(20)。节能因子是ON窗口长度的函数，如式(21)

$$D_{\text{a}}(t_{\text{on}}) = \int_0^{T_{\text{DL}}} f_{\text{p}}(\beta) D(t_{\text{on}}, \beta) d\beta \quad (20)$$

$$\text{PS}(t_{\text{on}}) = \frac{T_{\text{DL}} - t_{\text{on}}}{T_{\text{DL}}} \quad (21)$$

#### 4 性能评估

本节通过理论模型数值分析和蒙特卡罗仿真来验证和比较传统机制与新机制的性能。设传统机制ON窗口大小固定为 $t_{\text{onl}}$ ；新机制ON窗口初始值为 $t_{\text{onp}}$ ，ON窗口在信道繁忙程度为 $\rho$ 的条件下自动扩展后的平均值如式(22)，其中 $t_{\text{onpnm}}$ 是新机制中ON定时器的上限值，不做额外限制时 $t_{\text{onpnm}} = T_{\text{DL}}$

$$\min \left( \frac{t_{\text{onp}}}{1 - \rho}, t_{\text{onpnm}} \right) \quad (22)$$

参数从标准[25]中提供的可选值中选取，具体设置如下，时间相关参数的单位均为秒， $\lambda_{\text{b}} = 200$ ， $T_{\text{DL}} = 0.064$ ， $T_{\text{CCA}} = 0.000079$ ， $\rho \in [0.1, 0.8]$ ；并假设业务包到达在一个休眠周期时长内为均匀分布，如式(23)

$$f_{\text{p}}(\beta) = \frac{1}{T_{\text{DL}}}, \quad 0 \leq \beta < T_{\text{DL}} \quad (23)$$

(1)传统机制与新机制(ON窗口延长时间无限制)的时延及功耗性能比较。参数配置： $t_{\text{onl}} = 0.02$ 或 $t_{\text{onl}} = 0.03$ ， $t_{\text{onp}} = 0.02$ 且 $t_{\text{onpnm}} = T_{\text{DL}}$ ，理论模型分析和仿真结果基本吻合，如图4和图5。传统机制ON窗口长度不变，节能因子模型分析值与仿真值相同。根据式(22)，当 $\rho = 1/3 \approx 0.33$ 时，新机制ON窗口长度平均值等于0.03，性能与 $t_{\text{onl}} = 0.03$ 的传统机制一致。因此曲线在 $\rho \approx 0.33$ 附近交汇，交汇点位置与参数选取有关。由 $t_{\text{onl}} = 0.02$ 和 $t_{\text{onl}} = 0.03$ 结果知：传统机制应用于非授权频段，功耗因子不随信道繁忙程度变化；信道越繁忙，平均时延越大。延长ON状态时间可以降低平均时延，但要消耗更多能量。由 $t_{\text{onl}} = 0.02$ 和 $t_{\text{onp}} = 0.02$ 结果知：新机制平均时延随信道繁忙程度提高而降低，始终优于传统机制；在 $\rho = 0.7$ 之后小幅上升的原因是ON窗口扩展到与休眠周期相等。新机制功耗随信道繁忙程度增加而提高。

(2)传统机制与新机制(ON窗口延长有限制的)的时延及功耗性能比较。参数配置:  $t_{onl}=0.03$ ,  $t_{onp}=0.02$ ,  $t_{onpm}=t_{onl}$ , 理论模型分析和仿真结果基本吻合, 如图6和图7。根据式(22), 当 $\rho>1/3\approx 0.33$ 时, 新机制ON窗口长度平均值恒等于 $t_{onpm}$ , 与 $t_{onl}=0.03$ 的传统机制性能一致。因此新机制曲线在 $\rho\approx 0.33$ 附近出现转折点, 转折点位置与参数选取有关。实际环境中不同时间段信道繁忙程度不同, 例如0.1~0.8变化; 终端要满足服务质量要求, 例如平均时延小于 $D_{max}$ 。若使用传统机制, ON窗口需要设为足够长, 使在信道最繁忙时平均时延小于 $D_{max}$ 。传统机制ON窗口固定, 因此在信道不繁忙时浪费了能量。若使用新机制, ON窗口随信道

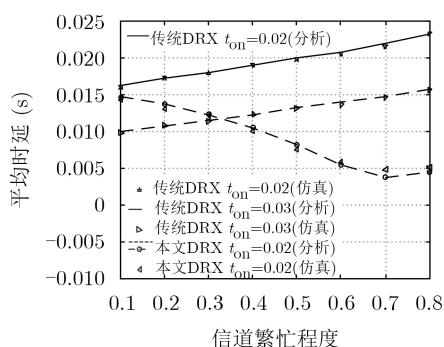


图4 传统机制与新机制(ON窗口延长时间无限制的)的时延性能比较, 基于式(20)

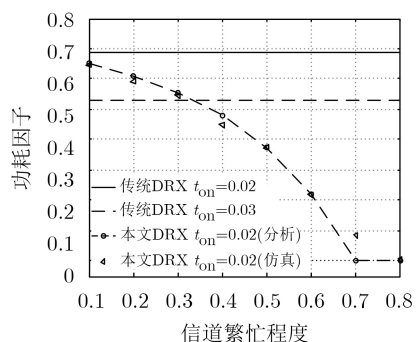


图5 传统机制与新机制(ON窗口延长时间无限制的)的功耗性能比较, 基于式(21)

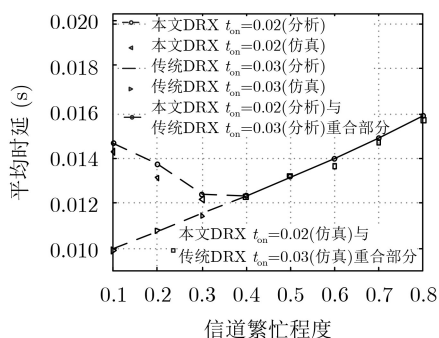


图6 传统机制与新机制(ON窗口延长有限制的)的时延性能, 基于式(20)

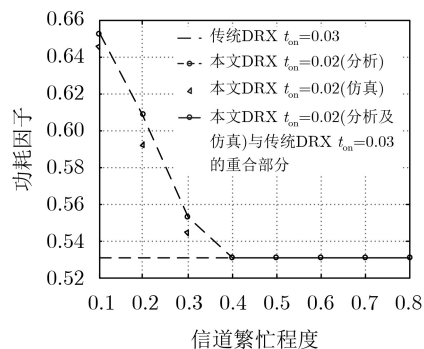


图7 传统机制与新机制(ON窗口延长有限制的)的功耗性能比较, 基于式(21)

繁忙程度自适应调整, 能在满足时延要求前提下节约更多的能量。观察图6和图7,  $\rho$ 在0.1~0.8变化。令 $D_{max}=0.016$ , 传统机制ON窗口设为0.03, 才能满足所有 $\rho$ 下平均时延小于0.016的要求, 功耗因子为0.5238。新机制ON窗口在0.02到0.03之间自适应变化, 平均时延始终小于0.016, 功耗因子在 $\rho$ 为0.1~0.4时大于0.5238, 在0.4~0.8等于0.5238。时延性能满足要求, 新机制节能因子高于传统机制。若90%的时间 $\rho$ 为0.1, 其余时间 $\rho$ 为0.8, 传统机制平均节能因子为0.5238, 新机制平均节能因子为:  $0.6460\times 0.9+0.5238\times 0.1=0.6338$ , 较传统机制提升11%。

## 5 结束语

本文提出一种基于信道能量检测的适用于NR-U独立部署场景的非连续接收机制。新机制根据信道能量检测结果, 自适应延长ON状态持续时间。通过理论分析和仿真, 对比传统和新型DRX机制的性能。新机制可以在不影响业务包时延的前提下, 获得更好的节能效果。且新机制不需引入额外信令交互, 仅利用NR-U设备已有的信道能量检测功能, 可在对实际系统修改较少的同时获得性能提升。

## 参考文献

- [1] 3GPP. Technical specification group radio access network: Study on NR-based access to unlicensed spectrum TR 38.889 V16.0. 0[S]. 3GPP, 2018.
- [2] 徐振宇. 非授权频段接入关键技术研究[D]. [硕士学位论文], 北京邮电大学, 2019.  
XU Zhenyu. Study on access technology of unlicensed bands[D]. [Master dissertation], Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [3] 朱正航, 贾建鑫, 郦振红, 等. 一种应用于5G非授权频段通信的低时延随机接入机制[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(11): 2680-2688. doi: 10.11999/JEIT190515.  
ZHU Zhenghang, JIA Jianxin, LI Zhenhong, et al. A low latency random access mechanism for 5G new radio in

- unlicensed spectrum[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(11): 2680–2688. doi: [10.11999/JEIT190515](https://doi.org/10.11999/JEIT190515).
- [4] Panasonic. R2–1811920 DRX Procedure for NR-U[R]. 3GPP RAN2#103, 2018.
- [5] 蔡博文. 非连续传输机制下网络性能研究[D]. [硕士学位论文], 北京邮电大学, 2019.
- CAI Bowen. Research on network performance for discontinuous transmission[D]. [Master dissertation], Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [6] FOWLER S A, MELLOUK A, and YAMADA N. LTE-Advanced DRX Mechanism for Power Saving[M]. London, UK: Wiley, 2013: 33–68.
- [7] RAMAZANALI H and VINEL A. Mean queuing delay in LTE DRX[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(4): 444–447. doi: [10.1109/LWC.2016.2582694](https://doi.org/10.1109/LWC.2016.2582694).
- [8] WANG Ke, LI Xi, and JI Hong. Modeling 3GPP LTE advanced DRX mechanism under multimedia traffic[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(7): 1238–1241. doi: [10.1109/LCOMM.2014.2323231](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2014.2323231).
- [9] LIANG Jiaming, HSU C K, CHEN J J, *et al*. Three-stage DRX scheduling for joint downlink transmission in C-RAN[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(2): 129–133. doi: [10.1109/LWC.2019.2943471](https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2943471).
- [10] ROSTAMI S, HEISKA K, PUCHKO O, *et al*. Robust pre-grant signaling for energy-efficient 5G and beyond mobile devices[C]. 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kansas City, USA, 2018: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2018.8422523](https://doi.org/10.1109/ICC.2018.8422523).
- [11] ROSTAMI S, HEISKA K, PUCHKO O, *et al*. Pre-grant signaling for energy-efficient 5G and beyond mobile devices: Method and analysis[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2019, 3(2): 418–432. doi: [10.1109/TGCN.2019.2893504](https://doi.org/10.1109/TGCN.2019.2893504).
- [12] MAHESHWARI M K, AGIWAL M, SAXENA N, *et al*. Directional discontinuous reception (DDRX) for mmWave enabled 5G communications[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2019, 18(10): 2330–2343. doi: [10.1109/TMC.2018.2872550](https://doi.org/10.1109/TMC.2018.2872550).
- [13] MORADI F, FITZGERALD E, PIÓRO M, *et al*. Flexible DRX optimization for LTE and 5G[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(1): 607–621. doi: [10.1109/TVT.2019.2952251](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2952251).
- [14] MAHESHWARI M K, ROY A, and SAXENA N. DRX over LAA-LTE-A new design and analysis based on Semi-Markov model[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2019, 18(2): 276–289. doi: [10.1109/TMC.2018.2835443](https://doi.org/10.1109/TMC.2018.2835443).
- [15] InterDigital Inc. R2–1816780 TP for DRX in NR-U[R]. 3GPP RAN2#104, 2018.
- [16] Xiaomi Communications. R2–1915945 DRX enhancement for NR-U[R]. 3GPP RAN2#108, 2019.
- [17] 3GPP. Technical specification group radio access network: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Medium Access Control (MAC) protocol specification TR 36.321 V16.0. 0[S]. 3GPP, 2020.
- [18] 3GPP. R2–2000009 Report of 3GPP TSG RAN2#108 meeting[R]. 3GPP RAN2#109-e, 2020.
- [19] KIM H and SHIN K G. Efficient discovery of spectrum opportunities with MAC-Layer sensing in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(5): 533–545. doi: [10.1109/TMC.2007.70751](https://doi.org/10.1109/TMC.2007.70751).
- [20] OGUNTUNDE P E, ODETUNMIBI O A, and ADEJUMO A O. On the sum of exponentially distributed random variables: A convolution approach[J]. *European Journal of Statistics and Probability*, 2014, 2(1): 1–8.
- [21] LARSEN R J and MARX M L. An Introduction to Mathematical Statistics and its Applications[M]. Boston, USA: Pearson Education, 2012: 273.
- [22] 张永利. 关于伽马分布及相关分布性质的一点研究[J]. *大学数学*, 2012, 28(3): 135–140. doi: [10.3969/j.issn.1672-1454.2012.03.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-1454.2012.03.030).
- ZHANG Yongli. A research for character of gamma distribution and its relevant distribution[J]. *College Mathematics*, 2012, 28(3): 135–140. doi: [10.3969/j.issn.1672-1454.2012.03.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-1454.2012.03.030).
- [23] 3GPP. Technical specification group radio access network: Study on licensed-assisted access to unlicensed spectrum TR 36.889 V13.0. 0[S]. 3GPP, 2015.
- [24] HOFFMAN J I E. Biostatistics for Medical and Biomedical Practitioners[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015: 269–270.
- [25] 3GPP. TR 36.331 V16.0. 0 Technical specification group radio access network: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Radio Resource Control (RRC), protocol specification[S]. 3GPP, 2020.
- 裴旭明：男，1984年生，工程师，博士生，研究方向为LTE与5G无线通信系统。
- 钱 骅：男，1976年生，研究员，研究方向为无线通信系统的物理层理论与实现，非线性信号处理及大数据信号处理理论。
- 王海峰：男，1969年生，研究员，研究方向为5G无线通信系统。
- 康 凯：男，1977年生，正高级工程师，研究方向为下一代无线通信系统、5G与Wi-Fi系统。