



专题：5G

5G 非授权频段组网技术

徐珉, 胡南, 李男

(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 随着移动通信业务需求的不断增长, 授权频段的短缺日益明显, 5G 网络亦开始考虑在非授权频段的部署, 即使用 NR 协议在非授权频段提供接入服务。5G 非授权频段组网的主要挑战是在 5G 新技术特性下支持 LBT 机制, 保障同已有非授权全频段系统 (WLAN、LTE LAA 等) 的公平性, 合理共享频谱。从 LBT 机制的演进入手, 分析了 LBT 对 5G 非授权频段组网的影响, 归纳了相关的标准化进展及挑战, 并针对突出的关键技术问题提出可行的创新解决方案, 保障 5G 非授权频段组网性能, 最小化 LBT 失败带来的影响。

关键词: 5G; 非授权频段; LBT

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019178

5G-based networking in unlicensed spectrum

XU Min, HU Nan, LI Nan

China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: Due to the growing demand for mobile communication services, the shortage of licensed frequency bands is becoming more and more obvious. Therefore 5G networks begin to consider deployment in the unlicensed spectrum, that is, to employ the NR protocol in unlicensed spectrum to provide access services. The main challenge of 5G networking in the unlicensed spectrum is to support LBT mechanism considering 5G new technical features and thus to guarantee fairness with existing systems as well as efficient spectrum sharing, the impact of LBT on 5G networking in the unlicensed spectrum was analyzed, the relevant standardization progress and challenges was summarized. Feasible and innovative solutions were proposed for some key technical issues to minimize the impact of LBT failure and thus to ensure the performance of 5G networking in the unlicensed spectrum.

Key words: 5G, unlicensed spectrum, listen before talk

1 引言

作为工作在授权频段的无线通信系统之一,

4G 移动通信通过合理的频率规划和网络部署实现了无缝覆盖和高频谱效率, 以极高的可靠性满足了用户从语音到多媒体业务等多样化的需求。

收稿日期: 2019-06-01; 修回日期: 2019-07-01

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No. 2017ZX03001028)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project of China (No. 2017ZX03001028)

然而,快速的社会发展进一步促进了通信方式和目标的多元化,进而为 5G 移动通信带来新的挑战,例如 3D/超高清视频、虚拟现实等大流量业务带来的扩容需求^[1]以及人口流动和用户习惯造成的潮汐效应^[2]等。为此,5G 移动通信一方面继续挖掘 FR1 (450 MHz ~ 6 GHz, 又称 sub-6 GHz) 频率的利用潜力,一方面积极拓展 FR2 (24.25~52.6 GHz, 又称 above-6 GHz) 频率的部署选项。但是由于现有频率规划趋近饱和,FR1 已难觅额外的授权频段,且频谱效率提升接近极限,而 FR2 的高频特性导致其覆盖范围小,且亟需大规模、完善的产业链支持。因此与 4G 类似,5G 移动通信网络也开始考虑在非授权频段(unlicensed spectrum, 或称免许可频段,包括 2.4 GHz、3.5 GHz、5 GHz 等)的部署选项,以缓解授权频段的压力。

非授权频段具有无需许可的共享特性,目前主要部署有采用 IEEE 802.11 协议族的 WLAN (wireless local area network, 无线局域网) 接入点等,以竞争频谱的方式提供尽最大努力(best effort)的服务,但不支持切换等移动性管理功能。而融合移动通信网络与 WLAN、实现两者优势互补的思想从 2.5G/3G 时代即被提出^[3-4]。近年来,国内外针对非授权频段组网的研究主要集中在移动通信网络和 WLAN 的共存方面。例如 ABS (almost blank sub-frame, 协同空白时隙)^[5]、duty-cycle^[6]和干扰避免^[7]等早期设计未考虑与 WLAN 之间的公平性,而在考虑 LBT(listen before talk, 先听后说)之后,新的设计方案^[8-9]开始趋向于重用 WLAN 中的竞争机制等,以实现同 WLAN 公平共存。另一方面,除了吞吐量以外,更多的研究转向对 QoS (quality of service, 服务质量)的保障,例如通过量化最大到达速率来保证输出端的 QoS^[10],并已经从点对点链路^[11]扩展至集中式无线网络^[12]和具有无差错无线信道的简化无线局域网^[13]等。

在标准化方面,以授权频段作为 CA (carrier

aggregation, 载波聚合)的主锚点,3GPP pre-R13 接纳了 LTE-U (LTE in unlicensed spectrum, LTE 非授权频段接入),但由于不支持 LBT 机制而无法进入日本、欧洲等国家和地区;3GPP R13 接纳了支持 LBT 的 LAA (licensed assisted access, 授权辅助接入)^[14],同时还支持基于网络间互操作的 LWA (LTE-WLAN aggregation, LTE-WLAN 聚合)。此外,美国高通公司(Qualcomm)还自主开发了不依赖 LTE 授权频段锚点、支持 LTE 独立部署于非授权频段的 MulteFire 系统^[15]。随着 5G 时代频谱赤字的进一步扩大,非授权频段组网和部署也成为选项之一。在 3GPP R15 完成第一版本的 5G NR (new radio, 无线新空口)协议之后,3GPP R16 开始研究支持 NR-U (NR-based access to unlicensed spectrum, 基于 NR 的非授权频段接入)技术^[16],使用 NR 协议在非授权频段提供接入服务,作为 5G NR 的扩展和补充。

与 4G 的 LAA 相比,5G 的 NR-U 具有 5G NR 的所有基本功能,部署场景更为广泛,支持包括 DC (dual connection, 双连接)、NR-U 独立部署和上下行分别部署等场景^[17],同时也面临 LBT 等传统问题和 5G NR 新特性、新场景带来的挑战。因此,本文将基于 NR-U,归纳 5G 非授权频段组网的特性与标准化进展,研究 5G 非授权频段组网协议设计和关键技术,为 5G 非授权频段独立组网以及与授权频段的联合组网提供解决方案,为 5G 非授权频段技术标准化和商用提供参考。

2 5G 非授权频段组网特性与标准化进展

与 5G NR 相比, NR-U 最大的特性和挑战都来自于对 LBT 机制的支持以及 LBT 失败带来的影响,此外还包括对波束成形、去激活态、灵活带宽等 5G 新特性以及独立部署、双连接等新场景的支持。

2.1 LBT

LBT 是 IEEE 802.11 协议族中的术语,



LAA/MultiFire 中又将该流程称为 CCA (clear channel assessment, 空闲信道评估), 即在进行通信前监听信道占用情况, 满足条件方可使用该信道, 且存在最大占用时间。由于非授权频段的免许可和争用特性, 部分国家或地区 (如日本、欧盟等) 将 LBT 列为非授权频段工作的必选项。为保证 NR-U 与 IEEE802.11 系统之间的公平性, NR-U 将沿用与 LAA 一致的 LBT/CCA 机制, 而 LAA 的 LBT/CCA 机制来自于 ETSI (European Telecommunications Standards Institute, 欧洲电信标准化协会) 的基于负载的选项 B, 后者是基于 IEEE 802.11 协议族的 LBT 原则设计, 如图 1 所示。

在 LAA 的 LBT/CCA 机制中, 当出现新的传输请求 (例如终端从空闲态回到连接态) 时, 首先启用 ICCA (initial CCA, 初始 CCA) 流程, 若 ICCA 未能成功占用信道, 或占用信道后达到最大占用时间, 则进入 eCCA 流程 (extended CCA,

扩展 CCA) 流程。两者的区别在于占用信道所需要监听的总空闲时长, ICCA 只需要监听一个默认空闲时长 (最小 $25\ \mu\text{s}$, 包括 $16\ \mu\text{s}$ 的响应时间和 $9\ \mu\text{s}$ 的一个时隙周期 T), 而 eCCA 需要监听一个默认空闲时长和 N (N 由指数退避算法随机取得) 个 $9\ \mu\text{s}$ 时隙周期, 以保证与 IEEE 802.11 系统之间的公平性, 如图 2 所示。其中, q 的更新符合 A 进制指数退避算法, $X=A^x$, $Y=A^y$, x 为当前冲突次数, y 为退避上限冲突次数。当 $x>y$ 时, q 的取值为 Y ; 当 $x>$ 最大冲突次数 z 时, LBT 失败。

2.2 LBT 对 5G 非授权频段组网的影响

由上述内容可见, LBT 失败 (由于信道繁忙而未能成功占用信道) 会对 NR-U 接入网络中的任一空口交互环节产生影响, 即若某一时频资源上发生 LBT 失败, 系统消息、接入请求、RRC 信令和上下行业务数据等均无法在该时频资源上发

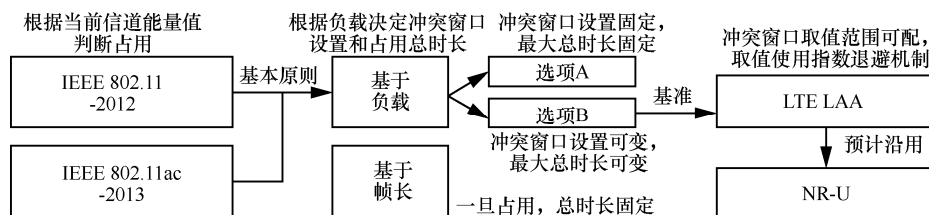


图 1 各标准组织定义的 LBT 机制及其关系

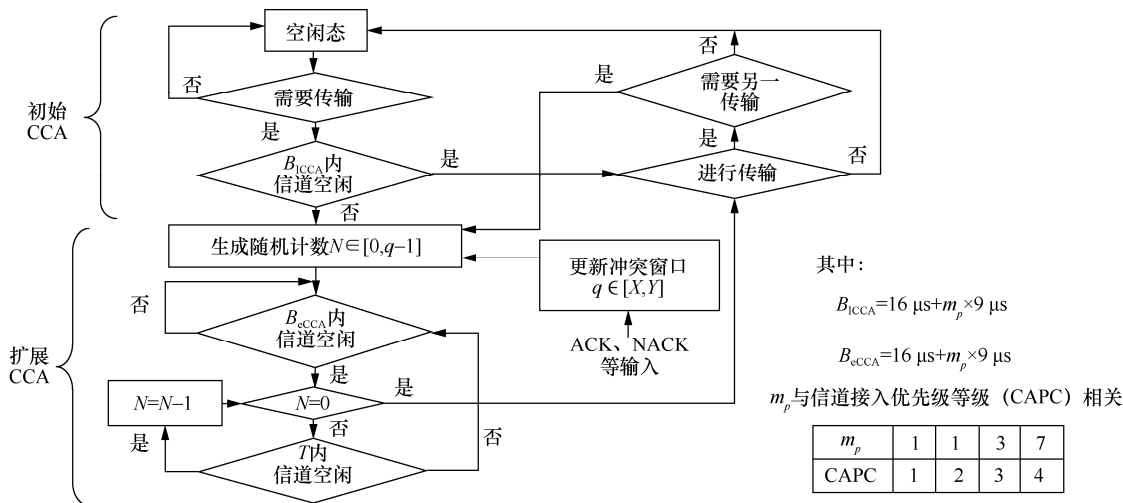


图 2 初始 CCA 与扩展 CCA

送,进而导致网络侧或终端侧接收延迟或失败。从长时间统计平均来看,LBT失败将造成NR-U接入网络的时延增加和可靠性降低,进而影响用户的QoS和业务体验(quality of experience, QoE)。因此,如何提高LBT成功率、减少LBT失败带来的性能影响,是5G非授权频段组网所面临的最主要挑战,相应的技术创新、协议增强和标准化推进也主要围绕该问题展开。

2.3 5G非授权频段组网的标准化研究进展

2.3.1 NR-U部署场景

3GPP定义了NR-U的5个部署场景,相比LAA增加了对双连接、独立部署和上下行分别部署的支持。

- 场景A:授权频段NR(主小区,PCell)和非授权频段NR-U(辅小区,SCell)的载波聚合。
- 场景B:授权频段LTE(主小区,PCell)和非授权频段NR-U(主要辅小区,PSCell)的双连接。
- 场景C:非授权频段NR-U独立部署。
- 场景D:NR小区,下行非授权频段,上行授权频段。
- 场景E:授权频段NR(主小区,PCell)和非授权频段NR-U(主要辅小区,PSCell)的双连接。

2.3.2 用户面

由于传统基于竞争的随机接入(contention based random access,CBRA)需要4步过程。Msg1:前导码发送;Msg2:响应;Msg3:连接请求;Msg4:竞争解决。在非授权频段环境中每一步都需要进行LBT,其成功率将受到较大影响。为此,NR-U引入支持2步过程的随机接入(2-step RACH),通过减少交互次数来提高接入成功率。其中,MsgA将至少包含Msg1和Msg3的内容,MsgB将至少包含Msg2和Msg4的内容。相应地,需要进一步对2-step RACH的消息设计、适用条

件、回退4步机制等进行标准化。

由于LBT机制工作在物理层(physical layer, PHY),媒体接入控制(media access control, MAC)层以上无法获得相关信息,也无法判断传输失败是由LBT失败还是由其他原因导致的。例如当SR(scheduling request,调度请求)消息由于LBT失败无法发送时,sr-ProhibitTimer仍然会启用,从而阻止SR继续发送。为避免类似问题出现,NR-U引入支持PHY对上行LBT持续失败的上报机制,即当LBT失败超过一定次数或时间,终端的PHY将向MAC报告LBT持续失败,MAC可以据此决定不启用sr-ProhibitTimer等。相应地,需要进一步对上行LBT持续失败上报机制的触发条件、适用范围、监测和上报粒度等进行标准化。

2.3.3 控制面

对于连接态的移动性管理,非独立的NR-U部署使用5G NR的机制作为基准,独立的NR-U部署需要支持NR-U和NR-U或NR之间的小区切换。特别地,LBT的失败会不同程度上降低参考信号、测量报告、信令的传输成功率,相应地需要对移动性相关的测量配置进行修改,在测量报告及触发中考虑信道占用情况或RSSI(received signal strength indication,接收信号强度指示)以及如何应对信令延迟、参考信号缺失等情况。与此同时,由于非授权频段可以由多个运营商共享,若运营商之间没有协调机制,可能出现PCI冲突或混淆,需要考虑通过扫描非授权频段邻区或者配置合理的ANR(automatic neighbor relation,自动邻区关系)来解决。

对于空闲态或去激活态的过程,5G NR的小区选择和重选的质量推导、小区选择和重选的机制仍可作为基准。但是与连接态类似,非授权频段可以由多个运营商共享,若运营商之间没有协调机制,终端在重选时所测得的信号最强小区可能不属于其所注册的PLMN(public land mobile network,公共陆地移动网络),此时需要允许终端驻留在



非信号最强小区（该小区为终端所注册 PLMN 中的信号最强小区）。在寻呼过程中，为应对 LBT 失败导致的寻呼消息发送失败，在一个 DRX (discontinuous reception, 非连续接收) 周期内可以为终端配置多个寻呼时机，但同时需要考虑终端功耗的增加。类似地，系统信息 (system information, SI) 的广播也可以配置多个发送时机，例如扩展 SI-window (系统信息窗口) 等。

3 5G 非授权频段组网协议设计与技术方案

为应对 LBT 机制带来的挑战，除了标准化进行的研究之外，针对协议影响较为突出的关键问题提出可行的新技术方案，以保障 5G 非授权频段顺利组网，最小化 LBT 失败带来的影响。

3.1 用户面新设计

3.1.1 BWP 与子频带切换

为实现灵活的带宽利用，5G NR 可以通过广播配置 1 个初始 BWP (bandwidth part, 带宽部分)，终端在初始 BWP 上接收寻呼和系统消息，并在初始 BWP 上发起随机接入。在连接态，终端会被激活 1 个 BWP 并在其上数据进行收发。如果初始 BWP 或者激活 BWP 所在频段信道占用率较高，则获取信道资源的机会较少，进而对系统性能产生影响。

因此对于 NR-U，需要考虑 BWP 切换的方案来应对可能的 LBT 失败，例如可以在多个 BWP 上同时进行 LBT，并在 LBT 最先成功的 BWP，或者符合门限要求的 BWP 上进行数据发送。这里的门限要求可以是 LBT 成功率、成功次数、失败率、失败次数等。另外，出于公平性考虑，NR-U 的最大 LBT 监测带宽与 IEEE 802.11 保持一致，为 20 MHz，因此即使 5G NR 所配置的 BWP 大于该值，LBT 也只能以 20 MHz 的子频带为单位进行。所以除了切换 BWP，相应地也需要考虑切换子频带，或者在多个子频带上同时进行 LBT。

图 3 所示为相同信道繁忙程度 (T 内信道空闲率 α 相等) 下，单个子频带进行 LBT (原始方案)、多个子频带并行 LBT (方案 A)、检测到冲突则切换子频带 (方案 B) 3 种方案的 LBT 成功率蒙特卡洛仿真 (10 000 次 q 和 N 的随机生成)。其中退避算法采用二进制指数模式，即 $A=2$ ；参照 ETSI option B，设置初始 $X=4$ ， $Y=32$ ，则 $q_1=\text{rand}(X,Y)$ ， $N_1=\text{rand}(0,q_1-1)$ ， $q_2=\text{rand}(2X,Y)$ ， $N_2=\text{rand}(0,q_2-1)$ ， $q_3=\text{rand}(4X,Y)$ ， $N_3=\text{rand}(0,q_3-1)$ ， $q_4=32$ ， $N_4=\text{rand}(0,31)$ ；令最大冲突次数 $z=5$ ， $\alpha=[0:0.1:1]$ ， $B=[20:20:80]$ 为 BWP 带宽 (MHz)。可以看出相比原始方案，方案 A 和 B 在相同时间 ($25 \mu\text{s} + (N_1+N_2+\dots+N_4) \times 9 \mu\text{s}$) 内的 LBT 成功率

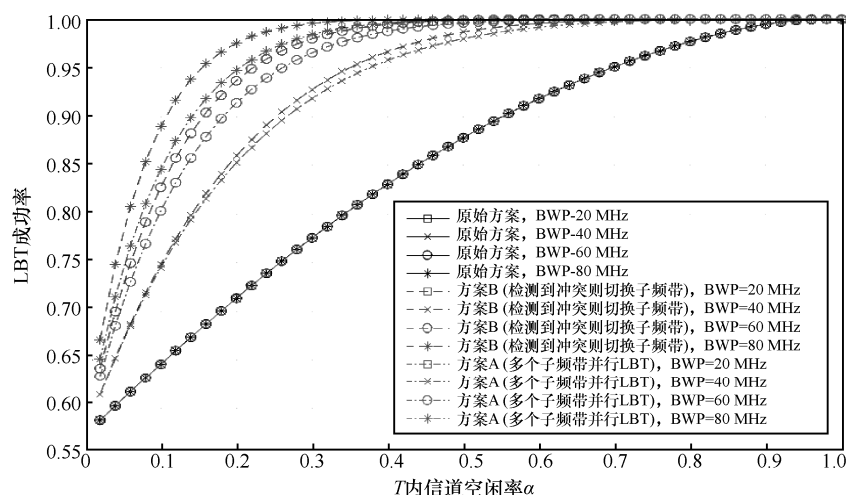


图 3 基于子频带的不同 LBT 工作模式成功率比较

更高,且成功率随BWP带宽增加而增大。

3.1.2 DRB映射延迟

在5G NR负责QoS管理的SDAP层,当网络侧通过为终端侧配置QoS flow(流)到DRB的上行映射时,终端侧应当采用最新的映射关系并覆盖原有映射关系,待原DRB上已缓存数据发送完毕后,发送结束标识(end marker)并释放原DRB,然后使用新配置的DRB承载该QoS flow。但是若新配置的DRB工作于非授权频段,则需要在发送所承载的QoS flow前进行LBT,如LBT失败则当前无法发送。而按照现有SDAP层协议,当出现上述情况时,原映射关系已被覆盖,且原DRB已被释放,因此该QoS flow的传输将因为LBT失败而延迟乃至无法发送。

对于NR-U,一种可能的解决方案如图4所示,基站通知终端为QoS flow新配置的无线承载是否工作于非授权频段,若是,则终端首先保持原映射关系,并在新无线承载的工作频段进行LBT。当LBT成功时,终端采用新的映射关系,否则重复进行LBT直至LBT失败超时或次数超限,丢弃新的映射关系。该方案可以保证只有LBT成功后原映射方案才被覆盖,从而避免用户业务的中断。

3.2 连接态移动性管理增强

3.2.1 小区质量计算

由于引入小区内多波束的概念,与4G直接测

量小区质量不同,5G NR对工作在多波束的小区质量的计算方法为:同一小区内,超过一定门限的 M 个最优波束的质量取线性平均。若实际超过门限的波束数量 K 小于 M ,则按照 K 个波束的质量取线性平均;若实际超过门限 T 的波束数量为0,则按照最优波束的质量作为小区质量。其中,波束质量包括通过SSB(synchronization signal/PBCH block,同步信号资源块)或者CSI-RS(channel state information-reference signal,信道状态信息-参考信号)得到的RSRP/RSRQ/SINR,并未包括反映信道忙闲情况的RSSI(received signal strength indication,接收信号强度指示)和CO(channel occupancy,信道占用率,即RSSI值超过一定门限的样本比例)。

在NR-U小区中,可能出现SSB或CSI-RS由于LBT失败而无法发送,相应会影响小区质量的计算。一种解决方案是,小区质量评估时考虑波束或小区所在信道的忙闲情况,或者能够正常发出概率。例如当终端测量到的信道RSSI和/或CO超过基站所配置的门限时,可以选择:

- 对应的波束不参与计算小区质量;
- 在原有计算公式上增加针对RSSI和/或CO超限的偏移量,该偏移量可以和RSSI值和/或CO值以及相应的门限值相关。

此外,基站还可为终端配置上报信道RSSI和/或CO超限对应波束的ID,相应的RSSI值和/或

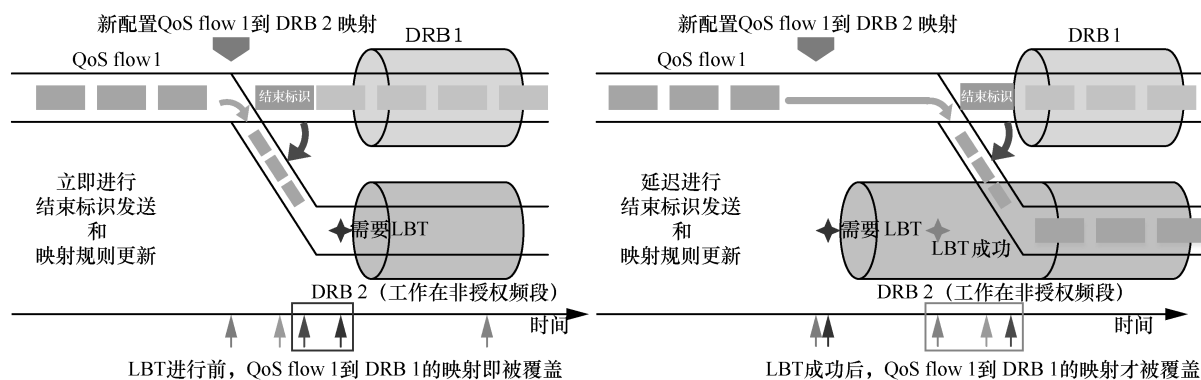


图4 DRB映射延迟方案避免用户业务中断



CO 值以及超限的波束数量等，从而为移动性管理决策提供更详尽的参考信息。

3.2.2 小区切换

对于 5G NR，终端上报测量报告的触发条件是基于一端侧所测得的服务小区和/或相邻小区的 RSRP/RSRQ/SINR，由于授权频段的排他性和蜂窝网络的资源调度机制，根据该结果进行切换决策，可以有效保障终端进入目标小区后的服务性能。但是对于 NR-U，由于非授权频段其免许可的共享特性以及 LBT 机制，完全基于终端侧接收端所测得结果的测量报告上报会导致不必要的上报以及相应的功耗，且完全基于终端侧接收端所测得结果的切换决策难以保障终端进入目标小区后的服务性能。

如图 5 所示，当非授权频段的服务小区或相邻小区附近存在其他运营商或私人部署的工作在非授权频段的接入点时（通常称为隐藏节点问题），终端所测得的测量量不能反映该小区实际的网络性能，例如终端可能测得较强的 RSRP 或较低的信道繁忙率，但服务小区或相邻小区发送端因其他接入点存在而信道繁忙，导致 LBT 成功率低，无法为新接入的终端提供服务。

一种解决方案是，服务基站和相邻基站可以采集并交互非授权频段信道相关信息，包括发送端的 LBT 成功或失败率、单位时间内 LBT 成功或失败次数、平均 LBT 成功时长、基站负载等级、信道空闲时间或被占用时间的比例等。基于上述信息，一方面服务基站可基于此进行切换决策并

通知终端，一方面也可以将该信息指示终端，终端参考该信息以新的触发条件来判断是否上报测量报告。

3.3 空闲态/去激活态流程优化

3.3.1 小区重选

如前文所述，终端在重选时所测得的非授权频段信号最强小区可能不属于其所注册的 PLMN。PLMN 信息在 SIB1 中广播，为了识别小区是否属于注册的 PLMN，在 NR-U 中终端需要获取多于一个小区的 MIB 和 SIB1，这会显著增加终端的功耗并延迟小区重选。同时由于终端测量能力受限（例如终端可测量的同频小区数为 8，异频小区数为 4），检测非注册 PLMN 的小区也可能导致终端的测量能力受限。为此，可能的方法包括允许 SIB1 指示用于相邻小区的 PLMN 信息、白名单小区或者允许 MIB 指示 PLMN ID 的一部分等，但是存在复杂度提升、修改系统信息或适用范围受限等问题。除了预防方案以外，一种可能的解决方案是利用 MDT（minimization of drive test，最小化路测）技术。

MDT 可以通过商用终端自动进行路测实现数据的测量与收集工作，是进行无线网络优化及网络质量评估的一种重要手段。LTE 中 MDT 技术支持终端在空闲态记录 RSRP/RSRQ 等测量结果，并在下次进入连接态时将记录的数据上报给网络。NR 中的 MDT 除了继承上述功能，还可以记录终端在重选时所测得的、不属于其所注册的 PLMN 信号最强小区并上报。即当终端重选到某

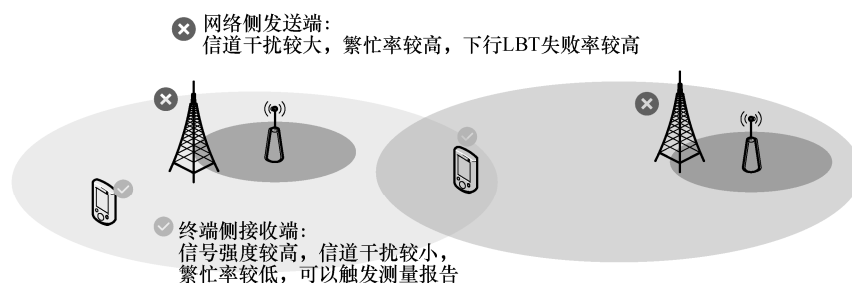


图 5 邻近接入点干扰（隐藏节点问题）导致非授权频段发送端和接收端无线条件差异

非授权频段小区,发现该小区系统消息中的 PLMN 不是终端注册的 PLMN 时将该事件记录,并在下次成功接入网络时上报重选失败小区的 PLMN 和小区标识以及具体的位置信息等,从而帮助所注册的 PLMN 获取相关信息并禁止接入,还可以避免不同运营商之间的小区标识冲突等。

此外,在非授权频段小区重选时,也可以考虑 RSSI 和/或 CO 等信道占用信息,例如在重选测量触发的 S 准则、同频小区排序的 R 准则中加入 RSSI 和/或 CO 相关的条件等。

3.3.2 备用小区

在 LTE LAA 中,非授权频段的部署总有一个授权频段作为锚点,若终端在上行非授权频段 LBT 失败,由于授权频段连接的存在,还可以选择在授权频段上发送信息。而 5G NR-U 支持不依赖授权频段的 NR-U 独立部署,在这种场景下,若终端在上行非授权频段 LBT 失败,将导致终端无法发送任何信息,特别是用户紧急信息或指示网络调整的重要信息等,例如指示终端无法自行解决设备内干扰(in-device coexistence, IDC)问题,需要网络调整来帮助解决的 IDC 指示等。

一种解决方案是设置备用小区,可以是授权频段小区或者忙闲度低的非授权频段小区,终端可以根据收到的备用小区指示以及自身业务特性判断是否需要优先重选至备用小区,以保证重要信息得到及时发送,或重要业务的服务质量得到保障。这种方案的优势在于可针对某些特殊需要的终端(如 LBT 一直失败、有重要信息需要发送)独立地提高该小区的重选优先级,而现有的重选规则只能提高整个频率的优先级或使所有小区适用排序规则。

4 结束语

为应对日益紧张的频谱赤字,5G 非授权频段组网成为可行的解决手段之一,但是同时面临保障公平性和合理利用频谱等带来的挑战,本文梳

理了 LBT 机制的演进过程,分析了其对 5G 网络通信过程、网络性能和服务质量等方面的影响,归纳了 3GPP 标准化进展,并针对突出的关键技术问题提出解决方案。随着 5G 规模化商用的到来和用户需求的不断变化,未来可以进一步研究非授权频段与授权频段联合组网中的业务连续性保障、切换性能提升和动态负载均衡,进一步构建非授权频段无线技术的统一认证和接入机制等,实现两种频段的无缝组网和更高效利用。

参考文献:

- [1] IMT-2020 (5G) Promotion Group. White paper for 5G radio technique architecture[R]. 2015.
- [2] ZHENNIAN S, XU X, XIAO M C, et al. The new architecture with time-spatial consistency for 5G networks[J]. China Communications, 2016, 13(1): 68-79.
- [3] PICHNA R, OJANPERA T, POSTI H, et al. Wireless internet: IMT-2000/wireless LAN interworking[J]. Journal of Communication and Networks, 2000, 2(1): 46-57.
- [4] SALKINTZIS A K, FOR C, PAZHYAN R. WLAN-GPRS integration for next-generation mobile data networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2002, 9(5): 112-124.
- [5] ALMEIDA E, CAUALCAN A M, PAIVA R C D, et al. Enabling LTE/WiFi coexistence by LTE blank subframe allocation[C]//2013 IEEE International Conference on Communications (ICC), June 9-13, 2013, New York, USA. Piscataway: IEEE Press, 2013: 5083-5088.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] LIEN S Y, CHENG S M, CHEN K C, et al. Resource-optimal licensed-assisted access in heterogeneous cloud radio access networks with heterogeneous carrier communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12): 9915-9930.
- [9] VOICU A M, SIMIC L, PETROVA M. Inter-technology coexistence in a spectrum commons: a case study of Wi-Fi and LTE in the 5-GHz unlicensed band[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(11): 3062-3077.



- [10] WU D, NEIGI R. Effective capacity: a wireless link model for support of quality of service[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(4): 630-643.
- [11] MUSAVIAN L, NI Q. Effective capacity maximization with statistical delay and effective energy efficiency requirements[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(7): 3824-3835.
- [12] JIN F, ZHANG R, HANZO L. Resource allocation under delay-guarantee constraints for heterogeneous visible-light and RF femtocell[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 14(2): 1020-1034.
- [13] KAFEZAKIS E, KONTOVASILIS K, STAVRAKAKIS I. A novel effective capacity-based framework for providing statistical QoS guarantees in IEEE 802.11 WLANs[J]. Computer Communications, 2012, 35(2): 249-262.
- [14] 3GPP. Study on licensed-assisted access to unlicensed spectrum (Release 13): TR36.889 V13.0.0 [S]. 2015.
- [15] Qualcomm Technologies, Inc. Progress on LAA and its relationship to LTE-U and MulteFire[EB]. 2016.
- [16] 3GPP. New WID on NR-based access to unlicensed spectrum: RP-182878 [S]. 2018.
- [17] 3GPP. Study on NR-based access to unlicensed spectrum (Release 16): TR38.889 V16.0.0 [S]. 2018.

[作者简介]



徐珉（1987- ），男，博士，中国移动通信有限公司研究院无线网络与协议工程师，主要从事 4G 和 5G 移动通信网络技术研究、高层协议设计和标准化工作。



胡南（1980- ），男，博士，中国移动通信有限公司研究院副主任研究员，主要从事 4G 和 5G 移动通信网络技术研究、高层协议设计和标准化工作。



李男（1981- ），男，中国移动通信有限公司研究院无线与终端技术研究所副所长、高级工程师，主要从事 4G 和 5G 移动通信网络技术研究工作。