



研究与开发

无线接入系统干扰规避检测方法研究

宫剑, 石旭, 许巧春

(国家无线电监测中心检测中心, 北京 100041)

摘要: 介绍了无线接入系统为实现频谱的兼容共享所采取的干扰规避机制的类型, 并对具体的检测方法, 如信道占用时间评估、空闲信道评估、空闲信道评估时间累积概率分布统计、干扰信号检测阈值的判定、静默期时长以及等效占用率等, 进行了阐述。重点指出了在实际的设备检测系统中存在的问题, 并给出了更加有效的信道占用时间和空闲信道评估算法以及判定流程。

关键词: 信道占用时间; 空闲信道评估; 静默期时长; 等效占用率

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024023

Research on interference avoidance detection method for wireless access system

GONG Jian, SHI Xu, XU Qiaochun

The State Radio Monitoring Center Testing Center, Beijing 100041, China

Abstract: The types of interference avoidance mechanisms adopted by wireless access systems to realize spectrum sharing and compatibility were introduced, and the specific detection methods such as channel occupancy time, idle channel evaluation, idle channel evaluation time cumulative probability distribution statistics, determination of interference signal detection threshold, silent period duration and equivalent utility were explained. The problems in the actual device detection system were highlighted, and new effective channel occupancy time and idle channel evaluation algorithms and the determination process were given.

Key words: COT, CCA, silence period, EU

0 引言

2021 年, 工业和信息化部无线电管理局印发了《关于加强和规范 2 400 MHz、5 100 MHz 和 5 800 MHz 频段无线电管理有关事宜的通知》(以下简称《通知》)。随着这 3 个免许可频段的无线

接入系统, 包括无线局域网、蓝牙、无人机、电子不停车收费 (electronic toll collection system, ETC) 等相关技术及应用在我国的迅猛发展, 使用这些频段的设备数量不断增多, 使得频段内不同无线电系统的频率兼容和共存问题凸显, 甚至出现抢占资源、独占资源的不合理现象。为高效、

收稿日期: 2023-09-04; 修回日期: 2024-02-04

通信作者: 许巧春, xuqiaochun@srtc.org.cn

公平、合理利用和共享频率资源，在《通知》附件 2 中新增了对无线电发射设备干扰规避测试的技术要求。

本文针对《通知》中所述频段无线接入系统设备的干扰规避机制的检测方法和相关算法进行研究，切实可行地提供了无线接入设备干扰规避性能的检测系统实现方案，并重点论述了在传导直连模式下信道占用时间与空闲信道评估时间的算法和实现。

1 干扰规避技术分类与检测方法概述

干扰规避技术已经大量出现在不同无线系统间解决干扰和共存问题，例如，5G 系统受到大气波导的干扰而采取的规避技术^[1]，超宽带（ultrawideband, UWB）系统与同频系统的干扰避让技术^[2]，作为认知无线电重要分支的动态频谱接入（dynamic spectrum access, DSA）的关键技术就是频谱的侦测与干扰的避让^[3]，5G 系统非授权（unlicensed）频段与现有无线接入系统之间的干扰规避技术^[4]等。

总体来说，无线接入系统所使用的干扰规避机制分为三大类别：发射前搜寻（listen before talk, LBT）机制^[5-8]、探测与避让（detection and avoidance, DAA）机制^[9]和等效占用率（equivalent utility, EU）机制。其中 LBT 和 DAA，从设备类型来说，又可分为基于跳频和基于非跳频、基于

帧和基于负载。无论分类的机制如何，从检测和验证算法来说，又可以总结为以下几种。

（1）信道占用时间和空闲信道评估时间检测

干扰规避测试的目的是资源共享、合理避让、杜绝路霸、公平接入。而从实现资源共享和兼容的角度来看，一般系统会从频域、时域、空域、参数配置等方面进行考虑。频率资源是非常有限的，3 个免许可频段的频率范围分别是：2 400~2 483.5 MHz、5 150~5 350 MHz、5 725~5 850 MHz。如果以 20 MHz 一个信道来算，3 个频段总共同时可用的信道不超过 20 个。从空间域来说，无线接入设备的使用场景复杂、区域受限、实施难度较高。所以时域共享成为最容易实现的资源共享方式。时域共享，首先是要对其最大的信道占用时间（channel occupied time, COT）和最小的空闲信道评估（clear channel assessment, CCA）时间进行限制，信道占用时间和信道空闲时间示例如图 1 所示，为无线接入设备在 30 ms 内的一段时域波形，其中包含了 6 段信道占用时长和 7 段信道空闲时长，在信道空闲时段可以用于 CCA。

（2）空闲信道评估时间累积概率分布统计

对于帧长不固定的基于负载的设备类型，资源占用的管理和限定还可以使用信道评估机制（channel access mechanism, CAM）。CAM 的核心是对所有的空闲期时长的累积分布概率进行管理

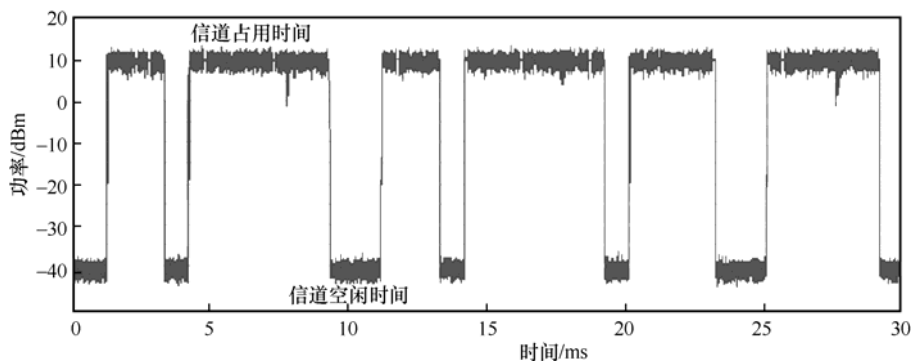


图 1 信道占用时间和信道空闲时间示例



和限制。基于上述对统计时间段内的所有空闲态的时长统计, 计算其累积分布概率。也就是说, 即使最大 COT 和最小 CCA 可以满足指标要求, 仍然需要监测资源使用的过程中空闲状态下的时长分布。根据欧洲电信标准组织 (ETSI) 标准建议^[10], 把所有空闲期的时长分成 $k+1$ 等份, 即将总的空闲期时间按照相同的时长进行分段, 共分成 $k+1$ 等份。对于不同类型和不同优先级 (priority class) 的设备, 空闲状态时长的概率分布有不同的统计要求, 例如, 优先级为 1 时, k 值为 16, 不同的等份用 B_n 表示, 具体定义如式 (1) 所示。

$$B_n = \begin{cases} (0 \sim 77) \mu\text{s}, n=0 \\ (77+9 \times (n-1), 77+9 \times n) \mu\text{s}, 1 \leq n \leq 15 \\ (212, \infty) \mu\text{s}, n=16 \end{cases} \quad (1)$$

其中, B_n 表示时间长度等份, 不同等份分别用 $B_0 \sim B_{16}$ 表示, 然后定义 E 为式 (2)。

$$E = \sum_{n=0}^k H(B_n) \quad (2)$$

其中, $H(B_n)$ 为不同 B_n 下对应的数量, 所以 E 为 $H(B_n)$ 的总数, 即所有空闲时长种类的数量总和。接着定义:

$$p(n) = \frac{\sum_{i=0}^n H(B_i)}{E} \quad (3)$$

其中, $p(n)$ 代表一定时间段内的空闲时长累积分布概率, 例如, $p(n)$ 的限值可以定义如式 (4) 所示。

$$p(n) \leq \begin{cases} 0.05, n=0 \\ 0.12, n=1 \\ 0.12 + (n-1) \times 0.0625, 2 \leq n \leq 15 \\ 1, n > 15 \end{cases} \quad (4)$$

可以看出, 式 (4) 的限值是对空闲信道评估时长的分布要求, 要求从小到大稳步递增, 而不能过多地集中在某一个时长范围, 不同时长应近似均匀地分布。空闲时长概率统计实测结果与限值比较如图 2 所示, 为一个实际的测试结果与式 (4) 中限值的比较情况。

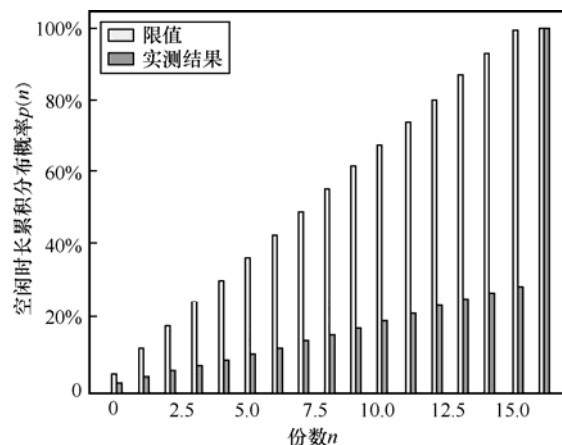


图2 空闲时长概率统计实测结果与限值比较

(3) 干扰信号检测阈值的判定

在频率共享条件下, 某个信道并非可以一直占用, 而是为了不断监测当前信道是否继续可用, 必须在信道占用的间歇, 留出一段空闲时间。如果监测到无法继续使用当前信道, 那么发射设备就必须采取避让措施, 因此, 避让的条件是非常关键的。

从 2.4 GHz 来看, 它的避让阈值水平 (threshold level) 与设备本身的发射功率有关^[11], 如式 (5) 所示。

$$\text{threshold level} = -70 \frac{\text{dBm}}{\text{MHz}} + 10 \times \lg \left(100 \frac{\text{mW}}{P_{\text{out}}} \right) \quad (5)$$

其中, P_{out} 为以 mW 为单位的最大等效全向辐射功率。从式 (5) 的逻辑看, 设备本身发射的功率越大, 则需要执行避让的检测功率阈值越小。这种共享规则是比较合理的, 即设备本身的发射功率越大, 意味着越容易干扰其他设备, 那么就要求它能够更加灵敏地探测功率更低的同频信号的存在并且给予避让。干扰阈值的检测示意图如图 3 所示。图 3 中被测设备需要搭配配对设备进行实际的通信链路的互通, 数据源可以是集成在被测设备中的控制软件。在被测设备端通过耦合器等接入频谱仪进行信号的观测, 并加入另一耦合器设备在被测设备端加入干扰信号, 配对设备端需要加入衰减器调节并降低其发射功率对链路观测的影响, 即不影响被测设备信号的统计和测量。

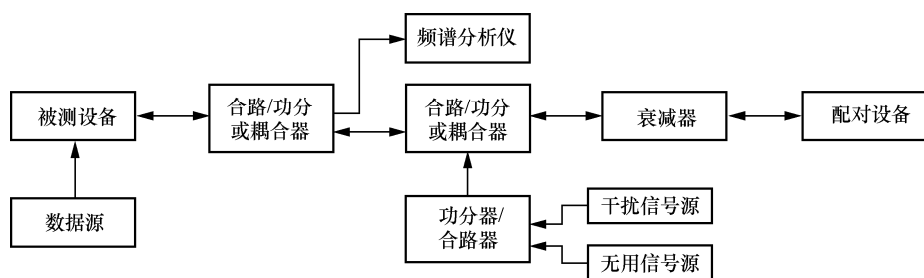


图3 干扰阈值的检测示意图

这里需要注意的是，在被测设备端加入的作为模拟其他同频设备的干扰信号应符合相关规范的具体要求^[10-11]。此外，对于 2.4 GHz 而言，还需要检测在工作频段外-35 dBm 功率的无用单音信号存在的情况下，是否也能正常进行干扰阈值的检测与避让。

(4) 静默期时长

对于 DAA 机制的跳频设备而言，避让后会将当前使用频率标记为“不可用”，在此之后，该跳频频率可再次被视为“可用”频率。从“不可用”到“可用”的这段时间，称为“静默期时长 (silent period, SP)”。它的意义在于，即使当前资源已变为可用，也不能立刻就使用，静默期时长的要求最短为 1 s，或设备当前使用的跳频频率数量（用 H_n 表示）的 5 倍乘以最大 COT，以较大者为准，如式 (6) 所示。

$$SP \geq \max(1 \text{ s}, 5 \times H_n \times \max(\text{COT})) \quad (6)$$

(5) 等效占用率机制

等效占用率机制是一种干扰缓解机制，根据国内文件的规定，是面向工作在 2.4 GHz 频段且不支持上面一系列干扰规避技术的无线电发射设备，以及工作在 5.8 GHz 频段的电子不停车收费设备。无线电设备的等效占用率，即设备的功率以及占空比综合利用率，应不大于 10%。计算方式如式 (7) 所示。

$$EU = \left(\frac{P_{\text{e.i.r.p}}}{P_{\text{limit}}} \right) \times \text{DC} \quad (7)$$

其中，EU 为等效占用率；DC 为设备占空比； $P_{\text{e.i.r.p}}$

为设备的实际等效全向辐射功率， P_{limit} 为 2 400~2 483.5 MHz 和 5 725~5 850 MHz 频段设备的最大等效全向辐射功率限值，单位均为 mW。DC 的定义如式 (8) 所示。

$$\text{DC} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{COT}_i}{T_{\text{observe}}} \quad (8)$$

其中， T_{observe} 为总观察期，测试框图参考图 4。仍然需要统计 COT，只是将所有 COT 的数值记录并求和，得到总信道占用期，再除以 T_{observe} ， T_{observe} 通常取不少于 1 s。

2 信道占用时间与空闲信道评估的检测方法

上面给出了信道占用时间和空闲信道评估时间的基本概念，但在具体的检测中，信道占用时间和信道空闲时间的确定与硬件的具体实现有非常紧密的联系，往往导致无法使用常规定义的测量方法得到最终的结果。以下是本文建议在传导直连模式环境中所采用的检测评估和判定方法。

信道占用时间和信道空闲时间的检测示意图如图 4 所示，频谱分析仪用于监测被测设备，如图 1 显示的发射波形，测试需要被测设备在正常工作模式数据流信令交互条件下进行。被测设备为《通知》中所适用的无线接入系统设备，配对设备需要与被测设备为同一类型设备，工作状态为正常工作模式下的信令连接方式。选取某一个天线端口进行测试，此端口应具备并配置成设备最大输出功率电平。调节衰减器使得被测设备和配对设备足以维持可靠的连接，并且通过耦合器

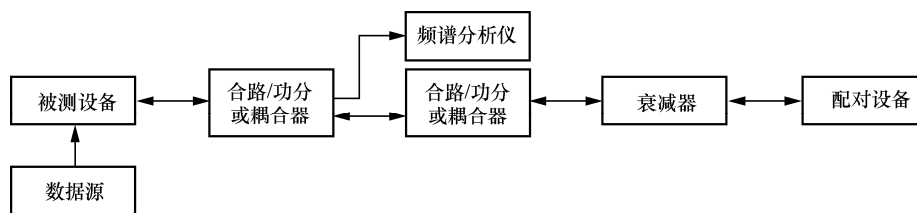


图4 信道占用时间和信道空闲时间的检测示意图

和衰减器等的使用和调节,使得频谱分析仪上观测到的配对设备的信号幅度相对于被测设备幅度尽量小。避免将配对设备所发信号纳入统计中。数据源可以作为被测设备本身的一部分,所发数据尽量填满被测设备的缓冲区,使被测设备始终有传输队列向配对设备传输。如果被测设备无法做到这一点,则应将被测设备配置为最大限度地占用固定帧周期的通道占用时间。为避免对测量结果产生不利影响,应采用单向数据流量源以尽量避免触发上层协议的反向流量。

在实际的检测中,应考虑在较长的一段时间内采样以获取足够多的样本数量,尤其是针对帧长不断变化的基于负载的设备类型。具体计算如式(9)和式(10)所示。

$$\max \text{COT} = \max_{i=1 \sim n} (\text{COT}_i) \quad (9)$$

$$\min(\text{CCA}) = \min_{j=1 \sim m} (\text{CCA}_j) \quad (10)$$

其中, n 和 m 分别是所统计的信道占用和信道空闲的数量,假设 n 和 m 分别为 10 000,例如,图1显示了 30 ms 的扫描时间,其中包含了 6 段信道占用和 7 段信道空闲时长,那么总共需要连续抓取上千段数据进行处理。此外,为了满足足够的

时间分辨率指标^[12],如 1 μs ,往往所使用的频谱分析仪的每段扫描时间不能设置过长,并根据频谱仪的点数设置上限。

3 干扰规避检测的实际问题与解决方案

研究发现,在上述信道占用时间和空闲信道评估时间的检测方法中存在一系列问题。问题一,实际的无线接入设备在发射过程中的关闭期,即信道空闲时间可以低至 1 μs 。根据 IEEE 标准,对于基于负载的无线接入设备而言,在 1 μs 内是不可能完成一次空闲信道评估的,在《通知》中所规定的在不同的机制或频段下空闲评估时间的技术要求一般为不小于 16 μs 或 25 μs 。所以本文建议在测试系统的实际软件实现中,将发射关闭期小于 16 μs 或 25 μs 的信道空闲期,均算作 COT 时间,并以此作为统计 COT 的基准时间,然后按照上述方法统计与判定所得的 COT 时间是否满足指标要求。无线接入设备时域发射示例如图 5 所示。

图 5 中, t_x 表示信道被占用的时间点, d_x 表示信道随后被占用的持续时间。 i_y 表示信道未被占用的时间点, g_y 表示信道随后未被占用的持续时间。如果在区间 $[t_e, t_h + d_h]$ 内,信道未占用的所有时段

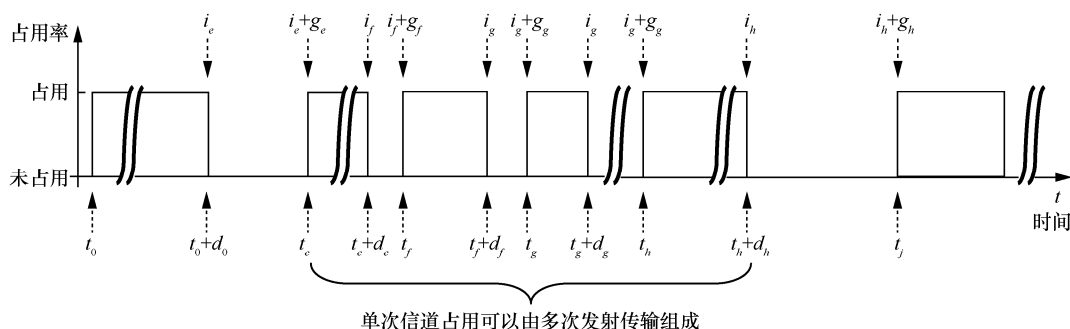


图5 无线接入设备时域发射示例

g_y 的持续时间小于 $16\ \mu\text{s}$ 或 $25\ \mu\text{s}$, 则任何信道占用时间 O_x 定义为 $(t_h + d_h - t_e)$, $t_e < t_h$ 。所以说任何信道占用时间都可能包括被测发射设备的一次或多次传输和配对设备的零次或多次传输。

但这样的系统实现又会带来问题二, 即信道空闲时间的评估和检测变得没有意义, 因为对这一指标的技术要求, 已然成为 COT 统计与判定的前提。针对这一问题论述如下。

前文描述了干扰信号阈值检测的基本方法, 即加入被测试设备端口的干扰信号功率达到规定的阈值时, 被测设备需要采取正确的避让措施。正确的避让应发生在干扰加入后紧接着的第一次信道空闲评估时间后的一个帧周期内, 即执行避让的时间 ($T_{\text{avoidance}}$) 应小于从上述测量步骤得出的最大信道占用时间与最小信道空闲 (Idle) 的时间之和, 如式 (11) 所示。

$$T_{\text{avoidance}} < \max(\text{COT}) + \min(\text{Idle}) \quad (11)$$

避让前后的发射波形如图 6 所示, 假如依据上述方法在图 6 (a) 中检测到的最大信道占用和最小空闲时间分别为 $10\ \text{ms}$ 和 $16\ \mu\text{s}$, 则加入干扰信号后观测避让后的时域信号波形, 如图 6 (b) 所示, 仪表设置显示, 是在近似 $2\ \text{ms}$ 内停止发射的, 这个结果是符合要求的。但发现在执行多次干扰信号阈值检测的情况下, 还可能出现图 6 (c) 的情况, 此时停止发射的时间已经超过了 $1.3\ \text{s}$, 那么这个结果是不符合要求的。如果刻意选择更小的信道空闲时间作为统计的基准, 则统计出来的 COT 时长就更加容易符合限值的要求, 但此时

执行避让的时长超标的可能性就会更大。反之则是 COT 时长更不易符合限值要求, 则执行避让的时间会更加容易满足要求。这里实际应用了判定结果互为牵制的反噬理论。

此外又引出了问题三, 在每次加入达到检测阈值的干扰信号后, 无线接入设备理论上都应该能够在正确的避让时间内关闭数据发射, 但是由于设备硬件水平的限制以及协议的功能性执行概率的情况, 无法做到 100% 的避让也是允许存在的。此外还需要考虑测试的置信度与不确定度。本文又给出了一种结合干扰检测阈值判定的概率分析方法作为最终信道占用与信道空闲时间判定的方案。即在上述情况下, 宜确定一个统计概率, 例如, 在正常的避让时间内应满足不小于 95% 的执行成功率等, 需要进行多次干扰规避测试并计算成功执行避让的概率作为最终的判定结论。

最后, 问题四是某些无线接入设备类型分为主设备和从设备, 与其他设备不同的是, 某些从设备是否执行避让, 取决于主设备给它发送的命令, 而非通过信道空闲评估对加入的干扰信号功率进行判断。在这种情况下, 干扰信号阈值检测就需要通过系统中配对的主设备端执行。所以在系统实现的过程中, 存在一个干扰信号到达被测从设备和配对主设备端口的功率校准问题。为了兼容其他的测试, 需要在图 3 中的被测设备和配对设备两端分别增加可调衰减器, 以方便随时调节链路的损耗值, 进行干扰信号的阈值检测。

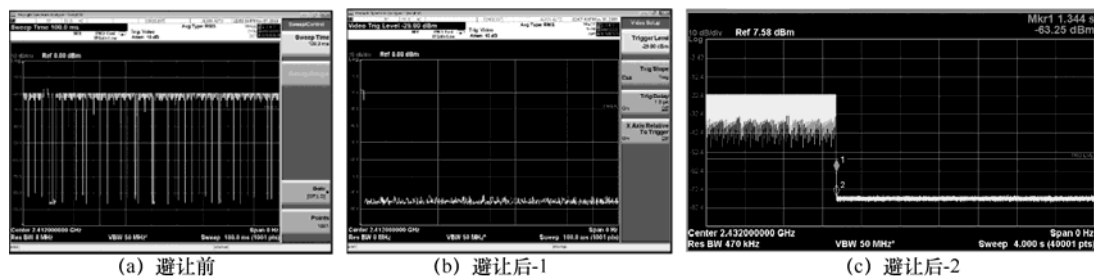


图 6 避让前后的发射波形



4 结束语

干扰规避机制是实现频谱兼容共存、合理共享资源的重要检测手段,尤其对于非授权频段的无线通信设备而言。本文从检测手段的角度出发,分析了主要的无线接入系统的干扰规避机制算法和检测实现方法,重点讨论了信道占用时间和空闲信道评估的检测与干扰阈值检测的相互关联与制约,并指出了在实际的检测系统中所面临的具体问题。总的来说,硬件实现的原因使得无法使用直接的方法获取最小空闲信道评估时间,而需要通过一个预估的最小空闲时间来统计最大信道占用时间,并以此作为执行干扰避让的时间基准,判定避让时间。此外,由于干扰规避测试属于带有一定成功概率的统计特性的测试^[13],还应考虑将避让成功执行的概率作为判定依据。未来,在无线接入系统的空口测试中还可以考虑信道模型所带来的影响,这给测试系统提出了更多的挑战和要求。

参考文献:

- [1] 汪汀岚,李行政,左怡民,等. 5G 大气波导干扰分析及规避方法研究[J]. 电信科学, 2022, 38(4): 130-137.
WANG T L, LI X Z, ZUO Y M, et al. Analysis and avoidance method of 5G atmospheric duct interference[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(4): 130-137.
- [2] 李英丹,郑拓,周贤伟,等. 超宽带无线通信系统 MB-OFDM-UWB 与 WiMAX 共存干扰仿真研究[J]. 电信科学, 2012, 28(1): 26-30.
LI Y D, ZHENG T, ZHOU X W, et al. Simulation research of coexistence and interference between MB-OFDM-UWB and WiMAX system[J]. Telecommunications Science, 2012, 28(1): 26-30.
- [3] 时颖,林茂六. 动态频谱接入中的侦测与避让技术[J]. 电信科学, 2010, 26(3): 35-40.
SHI Y, LIN M L. A survey of detect and avoid technology of dynamic spectrum access[J]. Telecommunications Science, 2010, 26(3): 35-40.
- [4] MUHAMMAD S, AL KALAA M O, REFAI H H. Wireless coexistence of cellular LBT systems and BLE 5[J]. IEEE Access, 2021(9): 24604-24615.
- [5] ZHANG Z N, CHEN J Y, DONG M Y, et al. Hybrid channel access mechanism based on coexistence scenario of NR-unlicensed[J]. China Communications, 2020, 17(1): 49-62.
- [6] XIAO J, ZHENG J, CHU L Y, et al. Performance modeling and analysis of the LAA category-4 LBT procedure[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(10): 10045-10055.
- [7] KO H, LEE J, PACK S. A fair listen-before-talk algorithm for coexistence of LTE-U and WLAN[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12): 10116-10120.
- [8] WANG Q, DU X J, GAO Z P, et al. An optimal channel occupation time adjustment method for LBE in unlicensed spectrum[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(11): 10943-10955.
- [9] MISHRA S M, BRODERSEN R W, TEN BRINK S, et al. Detect and avoid: an ultra-wideband/WiMAX coexistence mechanism[J]. IEEE Communications Magazine, 2007, 45(6): 68-75.
- [10] ETSI EN 301 893 5 GHz RLAN. Harmonised standard covering the essential requirements of article 3.2 of directive 2014/53/EU[S]. 2019.
- [11] ETSI EN 300 328. Wideband transmission systems; data transmission equipment operating in the 2.4 GHz band; harmonised standard for access to radio spectrum[S]. 2017.
- [12] 李贝,胡煜华,刘光海,等. 同频共享技术在 2.1 GHz 中的应用研究[J]. 电信科学, 2022, 38(12): 112-120.
LI B, HU Y H, LIU G H, et al. Research on co-spectrum sharing technology in LTE 2.1 GHz[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(12): 112-120.
- [13] IEEE standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems - local and metropolitan area networks--specific requirements - part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: IEEE 802.11-2020 [S]. 2020

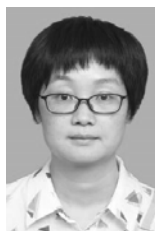
[作者简介]



宫剑(1977-),女,国家无线电监测中心检测中心工程师,主要研究方向为 5G、无线接入系统和毫米波雷达等。



石旭(1990-),男,国家无线电监测中心检测中心工程师,主要研究方向为无线电设备。



许巧春(1982-),女,国家无线电监测中心检测中心高级工程师,主要研究方向为无线电设备管理、无线射频测试技术和实验室质量管理。