



综述

LTE-U: 未来移动通信系统发展的助推剂

赵思聪, 黄磊, 申滨, 黄晓舸

(重庆邮电大学移动通信重点实验室, 重庆 400065)

摘要: LTE-U (LTE in unlicensed spectrum) 是近来 3GPP 标准化组织讨论研究的用于缓解授权频段通信压力的新兴技术。首先对 LTE-U 技术进行概述, 随后分析了 LTE-U 的工作频谱和设计要求, 同时总结了其可能的部署场景和运行模式, 然后对部署 LTE-U 存在的难点和现有的应用解决方案的相关研究进行了详细阐述, 最后对未来的研究方向进行了展望。

关键词: LTE; LTE-U; 非授权频段; 共存

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016086

LTE-U: the propellant for development of future mobile communication system

ZHAO Sicong, HUANG Lei, SHEN Bin, HUANG Xiaoge

Chongqing Key Lab of Mobile Communications, Chongqing University of Posts
and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: Recently, a new technology called LTE-U proposed by 3GPP is under study. It aims to relieve the pressure in licensed spectrum. Firstly, an overview of LTE-U was presented, and then the working frequency spectrum and design principles were analyzed. The possible deployment scenarios and operation modes of LTE-U were also summarized. The difficulties in deploying LTE-U and existing solutions were discussed particularly. Finally, several possible future research directions of LTE-U were presented.

Key words: LTE, LTE-U, unlicensed band, co-existence

1 引言

通信改变世界, 移动通信重塑生活。经过几十年的不断变革和演进, 移动通信技术成为现代生活中不可或缺的一部分。目前已步入 4G 时代, 4G 移动通信系统能够提供给用户最大 100 Mbit/s 的下载速度。但从当下的发展趋势来看, 未来将是万物互联的物联网时代。有行业报道称: 全

球的移动数据流量每年都在成倍增长, 预计到 2020 年, 这个数值将增长到 1 000 倍^[1]。无处不在的物联网和蓬勃发展的移动互联网将是下一代 5G 移动通信系统发展的主要驱动力。业界普遍认为, 5G 移动通信系统将具有超高的频谱利用率, 在传输速率和资源利用率等方面较 4G 移动通信系统提高一个量级或更高, 其无线覆盖范围、传输能力、系统安全和用户体验也将得到显著提高。

收稿日期: 2015-11-27; 修回日期: 2016-02-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61201205, No.61379159); 国家高技术研究计划 (“863”计划) 基金资助项目 (No.2014AA01A701)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61201205, No.61379159), The National High-tech R&D Program (863 Program) (No.2014AA01A701)

要达到 5G 移动通信系统的性能要求,加大传输带宽、提高频谱利用率和扩大通信系统容量是关键^[2]。但是,以上几点都是承载于无线频谱之上的,运营商的通信系统皆部署于授权频段,而授权频段极其有限且成本高昂。德国电信曾花费 77 亿美元才竞拍到 10 MHz 的频宽,可见授权频段的价值。然而,同样非常适合无线传输的非授权频段可用带宽非常大,而且目前部署于非授权频段 WLAN 等无线系统在某些场景和地理区域中对频谱的使用率极低,使得大量的非授权频段的频谱处于闲置状态。诸多公司在 2013 年 12 月 3-6 日举行的 3GPP RAN#62 次全会上提出了“非授权频谱上的 LTE”(LTE in unlicensed spectrum, LTE-U)的概念,旨在利用非授权频段缓解移动通信压力。这一概念的提出,从提高频谱效率的角度拉近了人们与 5G 移动通信时代的距离。本文对 LTE-U 的背景、技术要求和研究现状进行详细阐述,并对未来的研究方向进行展望。

2 LTE-U 概述

为了应对移动设备和多样化移动应用的出现而引发的数据流量压力,工业界和学术界都在集思广益,努力探索研究提升通信系统容量的解决方案,以保证给用户提供高水平的通信服务。在授权频段挖掘更多的容量是运营商的首选,因为排他使用的授权频段能够提供更加安全、可靠的高质量通信,但授权频段资源匮乏。LTE 系统中大部分先进技术就是为了提高授权频段的频谱效率而生的,但在部署非常密集的地区,由于频谱资源有限,再多的先进技术同时发力依然显得捉襟见肘,这就促使运营商不得不考虑开发利用那些使用率很低但资源非常丰富的非授权频段。由此,如图 1 所示的蜂窝/Wi-Fi 交互工作 (cellular/Wi-Fi interworking)^[3]的部署形式应运而生,它能让运营商在授权频段部署 LTE 的同时,在非授权频段部署 Wi-Fi 来提高系统容量,缓解授权频段的通信压力。但这种部署形式下的 LTE 和 Wi-Fi 是两个独立的系统,需采用异步无线接入技术 (RAT) 实现通信管理,另外还必须修改空口协

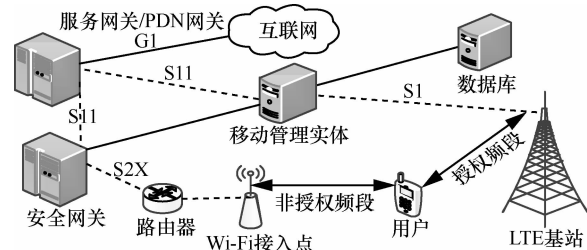


图 1 蜂窝/Wi-Fi 交互工作架构

议,这样不仅使得资源分配变得异常复杂,而且用户的业务连续性也难以保证。

鉴于蜂窝/Wi-Fi 交互工作方式存在的问题,3GPP 在 LTE R13 中引入了 LTE-U 技术^[4,5]。LTE-U 是指在非授权频段部署 LTE 系统,以提供授权频段的协助接入 (licensed assisted access, LAA)^[6]。LTE-U 可以利用现有的载波聚合 (carrier aggregation, CA) 技术,将授权载波和非授权载波聚合,允许用户在同一 LTE 网络架构下同时通过授权和非授权频段接入系统。相比蜂窝/Wi-Fi 交互工作的方式, LTE/LTE-U 的部署形式能够提供更大的覆盖面积和更可观的系统容量。同时基于同一演进的分组核心网,用户可以在授权频段和非授权频段无缝切换。对于运营商来说, LTE-U 能实现同步的网络管理,使用相同的认证方案,获得更高的资源利用率和更低的运营成本。对于无线用户来说, LTE-U 可以提供更好的使用体验,亦即更高的数据率、业务连续性、无处不在的移动性及更高的可靠性。图 2 和图 3 分别展示了相同发射功率和传输配置下 LTE-U 相对 Wi-Fi 在覆盖面积和系统容量上的提升^[7]。

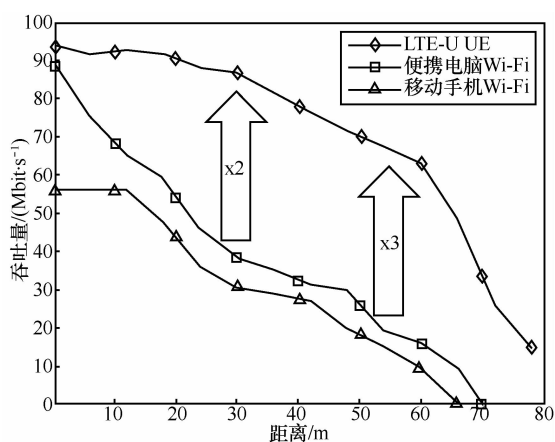


图 2 LTE-U 相对 Wi-Fi 在覆盖范围上的提升

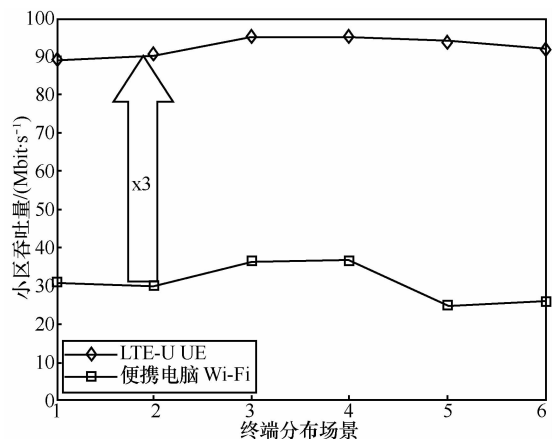


图 3 LTE-U 相对 Wi-Fi 在系统容量上的提升



LTE-U 有很多优势, 但要实现该技术也存在诸多难点。首先就是如何解决它与已部署于非授权频段上的无线系统的共存问题, 如 Wi-Fi 系统。当前的 Wi-Fi 系统遵循带有回退机制的、基于竞争的媒体接入控制 (MAC) 协议^[8]。如果不加限制, LTE-U 可能会一直占用信道, 使得 Wi-Fi 节点感知到信道忙而长期处于退避状态。此外, 本身不具备信道感知能力的 LTE-U 系统在每次接入信道时会强行把 Wi-Fi 挤掉, 使得 Wi-Fi 系统不能正常工作。因此, 为了让 LTE-U 和 Wi-Fi 在非授权频段上和谐共存, 需要设计公平高效的资源管理和系统接入方案。其次, 也必须考虑 LTE-U 背景下的流量转移问题。不同于传统的异构网, LTE-U 需要保护 Wi-Fi 的性能, 在非授权频段运行时要根据 Wi-Fi 的运行情况自动调整业务分流, 这样会使得性能很不稳定, 难以保证服务质量 (QoS)。因此, LTE 系统必须在保证服务质量和非授权频段的分流大小之间进行权衡。最后, 不同于授权频段存在归属权的特点, 同一个非授权频段上也可能会有多个运营商接入使用, 多运营商之间如何高效共享非授权频谱也是一个不可忽视的难题。

3 LTE-U 工作频谱

从医疗监护到对讲机再到无线局域网, 非授权频段给生产生活带来了很大的便捷。美国联邦通讯委员会 (FCC) 开放了很多频段作为非授权频段使用, 如 2.4 GHz 的工业、科学和医疗 (ISM) 频段, 5 GHz 的信息基础设施 (U-NII) 频段以及最新提出的 60 GHz 的毫米波 (mmWave) 频段等。

目前, 2.4 GHz 频段被 ZigBee、蓝牙和 Wi-Fi 等多个无线系统共享使用, 在部署相对密集的区域显得拥堵不堪, 而 5 GHz 频段仅有 Wi-Fi (IEEE 802.11a) 在使用, 可用资源非常丰富。此外, 5 GHz 超高频波具有高传输损耗的特

点, 只适用于小范围的数据传输。近来, 利用高频载波获取更高的系统容量引起越来越多的无线运营商和技术厂商的关注。28~60 GHz 毫米波频段目前作为非授权频段用于本地多点分布服务。但是, 28 GHz 频段实际上并没有被充分利用, FCC 正考虑将这一频段划分为授权频段, 以便更高效地利用它们。60 GHz 频段附近有更多的资源, 可以提供高带宽的多媒体服务^[9]。然而, 在 60 GHz 附近进行通信需要非常复杂的物理层和空口设计。总体来说, 为了使部署变得简单易实现, 3GPP 更多的是考虑将 LTE-U 部署在 5 GHz 左右的非授权频段。图 4 给出了主要国家和地区在 5 GHz 附近的频谱分布情况^[10]。

在美国, 频率段 5.15~5.35 GHz (UNII-1, UNII-2A)、5.47~5.725 GHz (UNII-2C) 和 5.725~5.85 GHz (UNII-3) 是作为非授权频段开放使用的。此外, FCC 正在考虑新增一些频段 (如 UNII-2B 和 UNII-4) 作为非授权频段使用。在欧洲, 5.15~5.35 GHz 和 5.47~5.725 GHz 仅开放给无线接入系统 (WAS) 使用。目前, 欧盟委员会提议开放现在用于固定无线接入 (FWA) 和智能交通系统 (ITS) 的 5.725~5.85 GHz 频段作为非授权频段。在中国, 5.15~5.35 GHz 非授权频段仅用于室内无线使用, 5.725~5.85 GHz 非授权频段可同时用于室内和室外的使用^[10]。5 GHz 非授权频段的存在, 为 LTE-U 的部署提供了良好的频谱载体。

4 LTE-U 设计要求

将 LTE 部署在非授权频段的效益虽然非常可观, 但为了 Let 其在目标频段合理部署, 一些基本的设计和地区管理要求必须满足。这些要求包括传输功率控制、雷达保护、信道接入、载波聚合等^[10]。

(1) 传输功率

在非授权频段上的管理要求中位列前茅的是传输功率管理的问题。这一要求是为了降低非授权频段用户之间

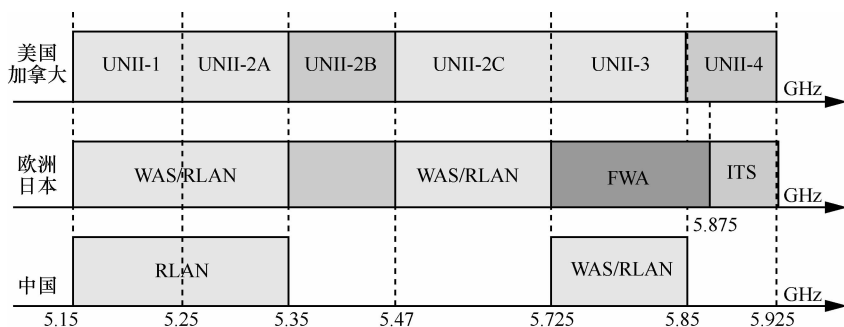


图 4 主要国家和地区在 5 GHz 附近的频谱分布情况

的干扰。例如,室内无线接入点(AP)如需在 5.15~5.35 GHz 频段发射信号,美国要求其发射功率控制在 24 dBm 以内,欧洲要求其功率控制在 23 dBm 以内。而作为室外使用的运行于 5.47~5.85 GHz 频段的微小区接入点,允许最大发射功率为 30 dBm。另外 5.25~5.35 GHz 和 5.47~5.725 GHz 频段有强制的传输功率控制(transmit power control,TPC)协议。在保证通信质量的前提下,TPC 协议要求尽量降低传输功率,以降低对其他用户的干扰,同时延长电池的使用时长。

(2)雷达保护

气象雷达系统运行于 5 GHz 非授权频段,如果不加以控制,其他运行于 5 GHz 非授权频段的设备将会对雷达系统造成不可忽视的影响。为了更好地保护雷达系统而提出的应用于 5.25~5.35 GHz 和 5.47~5.725 GHz 频段的干扰避免机制称为动态频率选择(dynamic frequency selection,DFS)。在 DFS 下,LTE-U 设备需要对目标频段进行周期性的检测,判断是否有雷达信号存在,如果检测到有雷达信号,必须跳转到没有雷达信号的信道。不同地区的 DFS 要求是不同的,如在欧洲和美国,用户允许在雷达频段发射信号,但接入的设备必须有检测雷达信号并及时避让的能力;但在加拿大,用户是被禁止接入 5.6~5.65 GHz 天气雷达频段的。

(3)信道接入

借助于高效的物理层编码和高度集中的 MAC 层资源调度,LTE 通常有很强的抗干扰能力。目前有很多研究结果^[11-13]显示,如果 LTE-U 不考虑使用新的信道接入机制而

沿用当下的 MAC 层协议,会对采用基于竞争的 MAC 层协议的 Wi-Fi 系统造成巨大的影响。为了和谐共存,LTE-U 设备在接入信道之前也需要对信道进行检测,这也就意味着只有当 LTE-U 设备检测到信道空闲时才能进行数据传输。实际上,在欧洲和日本等地区和国家,在非授权频段是有强制配置 LBT(listen-before-talk)要求的。LBT 机制使得设备在传输数据前先进行空闲信道评估 (clear channel assessment,CCA),若在 CCA 的过程中检测到的能量值小于预设阈值,那么可视信道为空闲,即可占用信道并传输数据,数据传输完成后要留出一段空闲时隙。欧洲电信标准协会(ETSI)制定的基于时间框架的 LBT 机制及相关参数如图 5 所示^[10]。尽管在北美等没有强制要求 LBT 的地区可以应用 3GPP R10~R12 的相关技术实现 LTE-U 的部署,但在 3GPP R13 中,LTE-U 的部署方案是要求全球适用的,也要考虑 LBT 管理的问题。

(4)载波聚合

由于非授权频段的信道环境不稳定,在非授权频段上传输数据很难对 QoS 进行保障,为了确保 QoS 并提供更好的用户体验,在非授权频段上传输数据的同时需要在授权频段传输关键信息。如图 6 所示,通过 CA 技术,可以将不同频段的子载波聚合成一个更宽的虚拟载波以提供更高的数据率。在 CA 技术下,无线资源控制信号等控制层的信号将由授权载波传送,这样就能保证 QoS,而用户层数据可以选择在授权或非授权频段传输。在这种方式下,控制信息能够通过授权频段稳定安全地传送,而非授权频段又能大幅提高传输数据量。

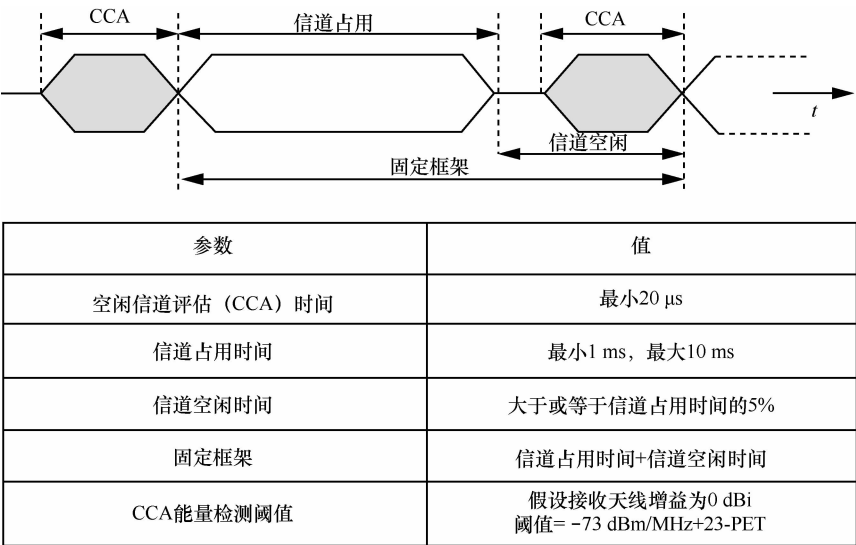


图 5 ETSI 制定的 LBT 机制及其参数

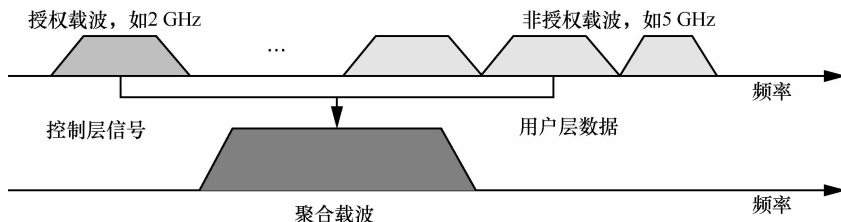


图6 LTE-U下的载波聚合

5 部署场景和运行模式

5.1 部署场景

在非授权频段有传输功率的限制,使得LTE-U技术更适合应用于小区域的数据传输。因此,LTE-U将最有可能出现在运营商已经部署运行的小蜂窝中。借助于CA技术,聚合的授权和非授权载波能提供给小小区用户更高的数据率和无缝切换的宽带多媒体服务。在数据传输过程中,称为主载波(PCC)的授权载波和多个称为辅载波(SCC)的非授权载波同时接入。可以根据用户的流量需求和小区蜂窝负载情况适当地增减子载波个数。目前3GPP讨论的关于LTE-U的4种部署场景^[9]如图7所示,具体介绍如下。

场景1:在宏蜂窝授权载波(F1)和小蜂窝非授权载波(F3)之间进行载波聚合。

场景2:没有宏蜂窝的覆盖,在小蜂窝授权载波(F2)和小蜂窝非授权载波(F3)之间进行载波聚合。

场景3:宏蜂窝和小蜂窝运行在同一授权频段,在小蜂窝授权载波(F1)和小蜂窝非授权载波(F3)之间进行载波聚合。

场景4:宏蜂窝和小蜂窝运行在不同的授权频段,在小蜂窝授权载波(F2)和小蜂窝非授权载波(F3)之间进行载波聚合。如果宏蜂窝和小蜂窝之间存在理想回程,那么载波聚合可以用于授权载波(F1)、授权载波(F2)和非授权载波(F3)三者之间。如果双连接可用,那么可以在宏蜂窝和小蜂窝之间使用双连接。

上述4种场景均需在基站与基站之间建立回程网络。将来小蜂窝的部署会十分密集,且其吞吐量会达到GB级。在此背景下,下一代无线回程网络需要建立在高能效和高吞吐量的基础上^[14]。

5.2 运行模式

根据LTE-U的特点和运行环境,LTE-U将有如图8所示的3种运行模式:补充下行(supplemental downlink,SDL)、时分双工(TDD)和独立(standalone,SA)模式。

(1)SDL模式

SDL模式是3GPP重点讨论研究的模式,指LTE仅利用非授权频段进行数据下行传输,是一种相对简单的模式。通常情况下,下行的数据负担比上行要大得多。这一模式可以用于用户需要下载较大文件、听高品质音乐、观看

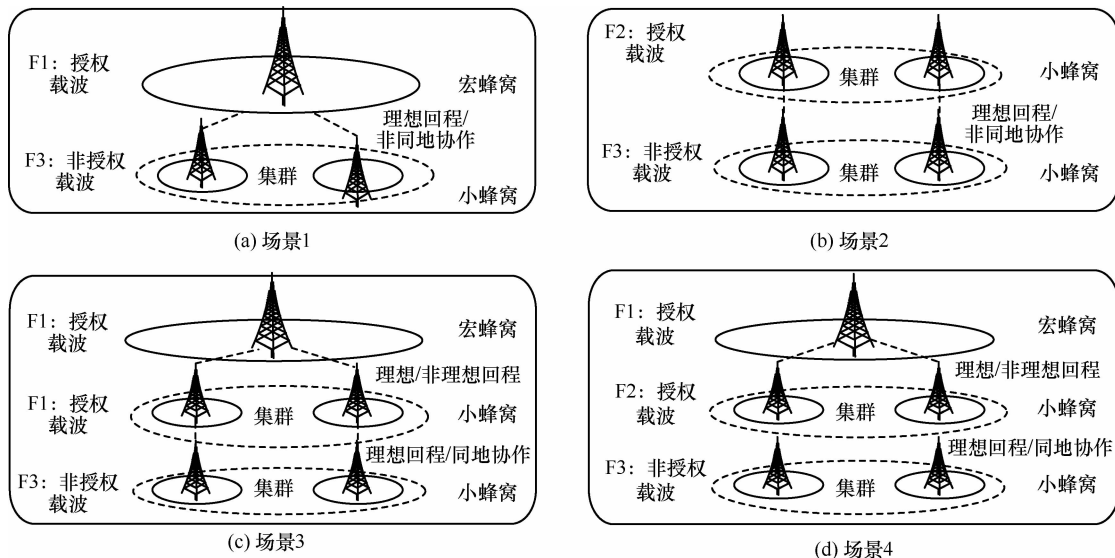


图7 LTE-U的4种部署场景

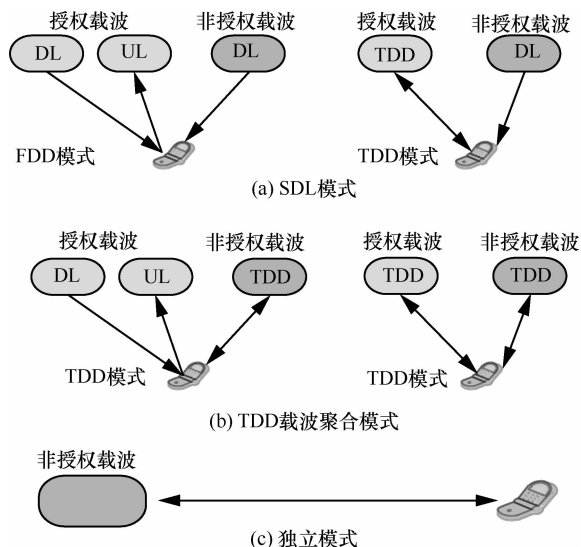


图8 LTE-U的3种运行模式

在线视频等需要大量数据流量的情况。

(2) TDD 模式

TDD 模式是 3GPP 讨论研究的关于 LTE-U 的候选模式,非授权频段同时用作上行和下行的数据传输,与授权频段的 TDD 模式一样。TDD 模式可以提供更加灵活的上下行资源分配,当然这也会增加系统的复杂度,例如,UE 端也需要具有 LBT 和雷达信号检测的能力。TDD 模式适用于有大量数据上传或者实时视讯的情况。

(3) 独立模式

除了 3GPP 讨论研究的 SDL 和 TDD 模式外,还有一种被部分运营商提议的独立 LTE-U 模式,这一模式指 LTE-U 完全独立于授权频段,包括控制信息等全部信息都

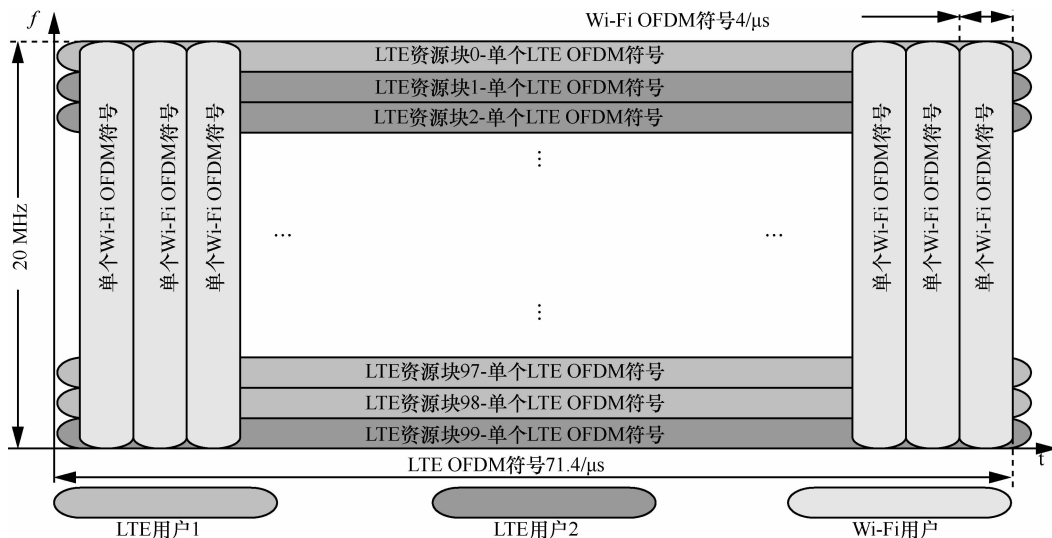
在非授权频段传输。这一模式可以为那些目前没有授权频段使用权的运营商在非授权频段部署 LTE 系统提供可能,但实现更为复杂且 QoS 为一大难题。

6 技术挑战和研究方向

虽然 LTE-U 是为解决暴增的数据流量而生的,但要实现 LTE-U,除了前文提及的设计要求外,还存在一些技术难点。本节主要讨论 LTE-U 关键的技术难点,分析一些研究方向并阐述目前在该方向上的研究现状。

6.1 LTE-U 的实现难点

让 LTE-U 系统在非授权频段上与其他系统公平高效地共享频率资源是首要难点。多个无线接入技术在同一频段运行时,缺少协调和干扰管理就难以保证高效共存。当前,不同无线接入技术的资源管理都是相互独立的,其物理(PHY)层和媒体接入控制(MAC)层的干扰管理机制大相径庭,这使得在多个无线接入技术之间进行协调变得十分困难。LTE 采用的是一种集中式的 MAC 协议,以资源块的方式进行资源调度分配;而 Wi-Fi 的 MAC 层协议则完全不同,采用的是分布式协调(DCF)机制。分布式协调也指基于竞争的载波监听多址接入/碰撞避免(CSMA/CA)技术。Wi-Fi 节点传输数据前,先感知信道,如果干扰水平超出阈值,节点将会回退一个随机长度的时间,在这种方式下,降低碰撞概率是以牺牲信道使用效率为代价的^[5]。除了 MAC 层协议以外,两个系统在物理层上也有很大差别,如图 9 所示,LTE 在物理层采用正交频分复用多址接入(OFDMA)技术,系统带宽在没有 CA 技术的情况下通常是

图9 LTE与Wi-Fi物理层资源配置对比^[11]



1.4~20 MHz,采用 CA 技术最大可达 100 MHz。其整个带宽被分为一系列的物理资源块(PRB),每个资源块由 12 个 OFDMA 子载波组成。同一子帧中的不同资源块可以调度给不同用户,以实现多用户分集增益。Wi-Fi 系统在物理层采用正交频分复用(OFDM)技术,但每次占用信道时,Wi-Fi 系统只允许一个用户传递数据,信道带宽通常是 20 MHz。两个系统之间的 OFDM 符号也是不同的,LTE 中的 OFDM 符号时长是 71.4 μ s,而 Wi-Fi 中的 OFDM 符号时长仅为 4 μ s。由上述分析可知,要让 LTE 和 Wi-Fi 在非授权频段和谐共存,无线资源的共享和管理及干扰控制的问题亟待解决。

第二个难点在于单个运营商如何将授权频段上的流量合理地转移到非授权频段。LTE-U 的流量转移问题受到非授权频段管理的牵制,呈现出不稳定的特性。以往的 LTE 场景主要关注于同一系统内的资源分配问题。但 LTE-U 背景下的流量转移问题需要考虑其他无线系统,就算是 LTE-U 用户需要转移流量,LTE-U 的基站也不能保证在特定的时间及时抢占到非授权频谱上的资源,所以非授权频段的 LTE-U 的系统性能很大程度上取决于其他无线系统的活动情况。这是一个两难的问题,希望 LTE-U 小蜂窝能够分担更多的流量来缓解宏蜂窝的压力,但其在非授权频段上的性能又不稳定,难以保证 QoS。因此,在不同频段上流量的合理分配也是一个技术难点^[16]。如图 10 所示的不同运营商之间如何在非授权频段有效公平地共享资源,实现多个 LTE-U 之间合理高效的共存也是一个值得关注的问题。不同的运营商要有相同的接入非授权频段的机会,如果缺少资源的协调管理,两个运营商选择重叠的频段进行数据传输毫无疑问会产生巨大的干扰。因此不同运营商之间的共存研究也不可忽视。

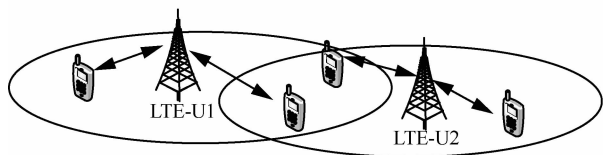


图 10 多运营商 LTE-U 共存场景

6.2 LTE-U 研究方向及研究现状

根据上文提到的 LTE-U 存在的问题或实现上的难点,本节先分别从干扰避免和干扰协调的角度探讨 LTE-U 和 Wi-Fi 之间的共存问题,然后从 LTE-U 的角度讨论运营商之间的频谱共享和流量转移问题。

6.2.1 动态信道选择

非授权频段的带宽很大,在非授权频段找到一个干扰很小的信道是极有可能的,让小区基站选择最空闲的信道,那么不仅小区之间,LTE-U 和 Wi-Fi 设备之间的干扰都可以有效避免。高通公司提出一种简单有效的信道选择策略^[17],由于非授权频段的干扰水平受到独立运行的 Wi-Fi 系统的影响,要求干扰测量持续周期地进行。如果所在信道的干扰超过门限值,LTE-U 的传输将跳转到其他干扰在允许值范围内的信道。再者,干扰测量应该在网络端和用户端同时进行,通过用户终端的信息反馈,如利用信道指标指示符(CQI)可以大幅提高测量的精准性并避免隐藏终端问题。另外,参考文献[18]讨论了如何利用 LTE 和 Wi-Fi 现有的内嵌技术来实现动态的信道选择,研究发现,LTE 中的自适应带宽配置和 Wi-Fi 系统的最小阻塞信道搜索(least congested channel search, LCCS)都可以用于信道选择。LTE 可以自行配置非授权的带宽大小,找出合适的传输频段,在频谱资源丰富的情况下避开干扰信道。目前部分 Wi-Fi 的接入点(AP)已经部署了如 LCCS 的信道选择技术,AP 监视器监控自己占用的信道的同时还检测其他 AP 站点发送的信息,必要时跳转到最小拥塞的信道。

通常干扰检测有两种^[17],第一种是忽视干扰类型和数量的非先验能量检测,另外一种是集集干扰源大量信息的、有更高感知灵敏度的先验检测。例如,Wi-Fi 的前导信号一般用于接收端和发送端同步,利用前导信号,LTE 小区基站可以估算出覆盖范围内有多少个 Wi-Fi 系统的 AP。同样,LTE 的控制信号也可以用于检测灵敏度的提高。

6.2.2 与 Wi-Fi 系统同信道共存

尽管非授权频段可用资源非常丰富,但在数据暴增的将来,LTE-U 和 Wi-Fi 作为两种竞争主体在同信道上共存的情况将不可避免。实际上,自 LTE-U 提出以来,绝大多数共存研究都是在同信道运行的背景下展开的。

大部分研究者在研究初期都提议 LTE-U 和 Wi-Fi 的共存要尽量使用现有的标准和技术,做到尽量不改变 LTE 的空口和整体架构。美国有线电视实验室(CableLabs)在 3GPP RAN # 64 次全会上给出了如图 11 所示的基于时分复用的共存方案^[19],方案中设定了一个工作周期(duty cycle),让 LTE-U 占用信道一段时间,然后关闭 LTE-U,让 Wi-Fi 系统有机会接入,占用信道的时间可以根据各系统的流量大小自动调整。高通公司在其白皮书^[17]中提出的载波监听自适应传输(carrier sensing adaptive transmission,

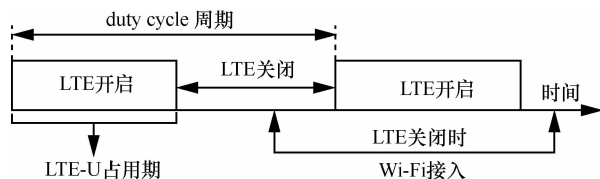


图 11 duty cycle 共存方案

CSAT)的共存方案也是这种结构。此外,在参考文献[11]中提出的LTE静音(LTE muting)方案,也是基于这种思想,LTE每5个子帧就静音 n ($0 \leq n \leq 5$)个子帧。让Wi-Fi系统有机会接入信道中。这类方案在LTE标准R10的支持下就能实现,既保留了现有的技术,又实现了系统间的良好共存。

另外,LTE标准中的近乎空白子帧(ABS)也可以用如图12所示的方式来实现共存^[20]。ABS是用来解决控制信道的干扰问题的,通过配置ABS,干扰源小区在这些ABS子帧的某些物理信道上降低功率发射或者不发射,可以避免对被干扰小区UE的PDCCH以及PDSCH的干扰。对于Wi-Fi系统来说,ABS就是很好的信道接入机会。但这似乎违背了LTE设计ABS的初衷,Wi-Fi信号在ABS的存在会对LTE某些控制信道造成干扰。

然而,上述几种共存方案都存在一个明显的缺陷:共存时都以LTE为主,LTE占用并控制信道,然后通过关闭

LTE让出时间以便让Wi-Fi有接入机会。虽然收获了相对可观的共存性能,但违背了公平性原则。Google公司在2015年6月向FCC提交了一份技术报告,指出LTE-U会给Wi-Fi带来巨大的干扰,而且当下所研究的共存方案并不公平^[21]。前期的研究中,LTE-U和Wi-Fi之间的“切换”主要采用duty-cycling(循环占空)机制,由于两者是分时共享,如果LTE-U使用了50%的工作周期,那么这看起来是公平的。可是,Google的研究发现,LTE-U在每次进入LTE-U on周期时,并不会检测无线环境是否干净,这导致每次LTE-U周期都会干扰(打断)Wi-Fi信号传送,引起误帧率上升,Wi-Fi吞吐率下降。Google实验证明,当LTE-U设备使用50%的工作周期时,Wi-Fi速率会下降1/4^[21]。

为了保证公平性,后续的共存方案研究逐渐向公平性和高效率偏移。目前基于公平性考虑的共存方案主要分为两类:LBT和CSMA/CA,即让LTE-U使用这种“先听后说”的信道接入机制。根据LBT和CSMA/CA的协议要求,给出了这两种信道接入机制下,LTE-U与Wi-Fi同信道共存时的信道接入时序,如图13、图14所示。

可以发现,配置LBT机制具有更高的效率,因为LBT不需要回退,当CCA周期内检测到信道空闲后,立马接入信道。目前共存方案的研究基本是在这两类信道接入机制

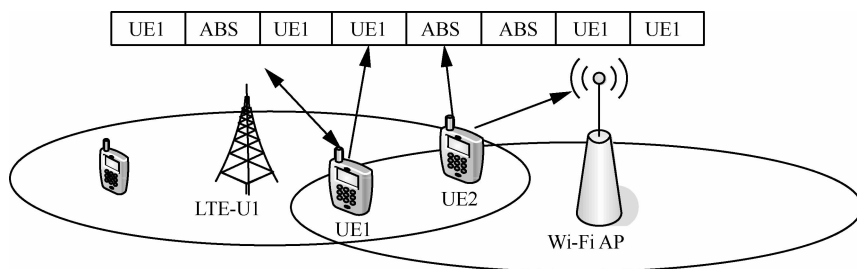


图 12 利用空白指针共存方案示意

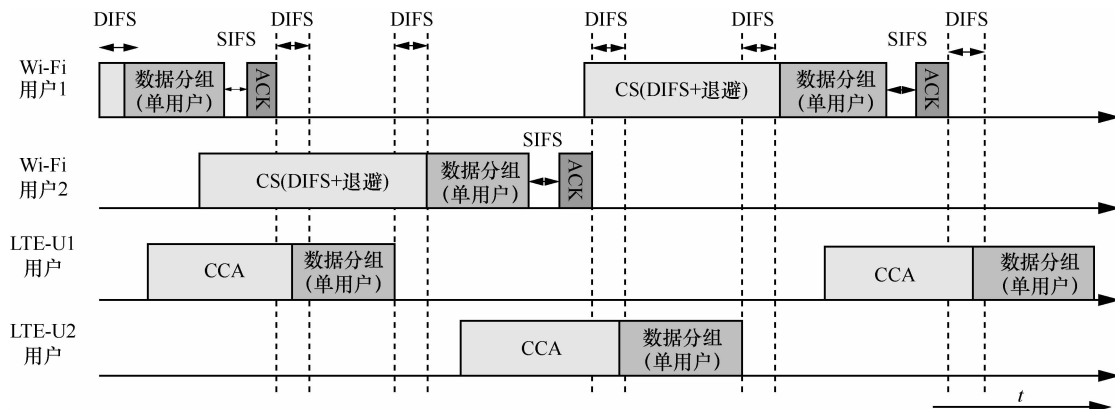


图 13 LBT-LTE-U 与 Wi-Fi 用户的信道接入时序

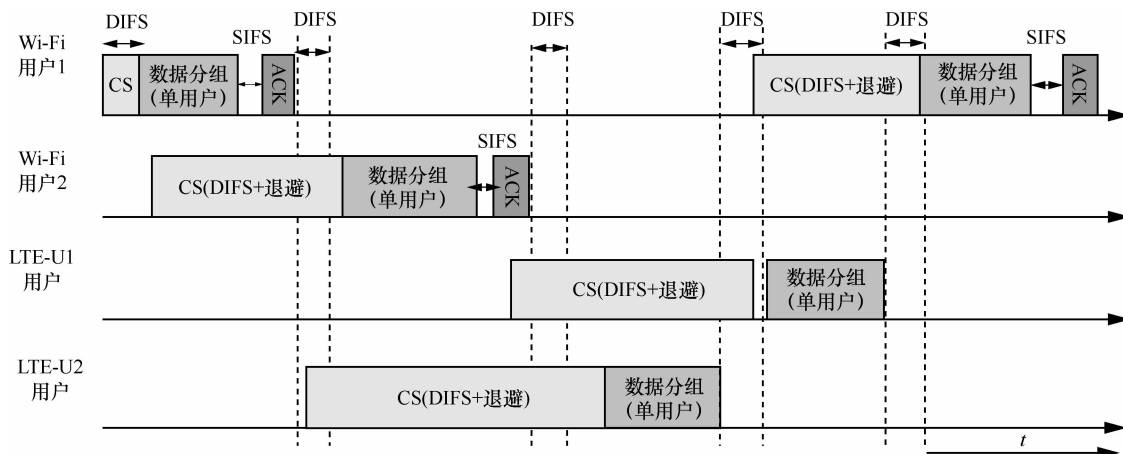


图 14 CSMA/CA-LTE-U 与 Wi-Fi 用户的信道接入时序

上进行改进。参考文献[20]提出了一种自适应 LBT 机制,在 LBT 的基础上加入了信道跳转的概念,在 LTE-U 接入信道前先感知信道,可用则接入,不可用则继续感知多条信道判断是否空闲。占用信道一段时间之后若要继续传输数据,应当跳到其他空闲信道,避免长时间占用同一信道,同时根据坏帧数判断该信道上 Wi-Fi 系统的流量大小,自动调整传输时长,以保证与 Wi-Fi 公平合理地使用频谱资源。参考文献[22]基于 Wi-Fi 系统的 CSMA/CA 机制为 LTE-U 设计了一种更为细致的 LBT 机制(如图 15 所示),它分为同步 LBT 和异步 LBT。同步 LBT 指 LTE-U 抢占到信道之

后,先与授权频段的子帧进行同步,同步完成之后再传输数据;异步 LBT 是一种触发传输机制,抢占到信道之后就进行数据传输。异步 LBT 有着更高效的频谱使用效率,而同步 LBT 因为支持混合自动重传请求(HARQ),与现有的 LTE 系统兼容性更好。

文中还考虑了在密集部署的地区数据分组容易发生碰撞的问题,在 LBT 方案中引入了 CSMA/CA 中的竞争窗和随机退避机制,有效降低了数据分组的碰撞概率。参考文献 [23] 中提出了一种如图 16 所示的 LAA-LBT 共存方案,LAA 指用户通过授权频段连接到主小区(Pcell),同时

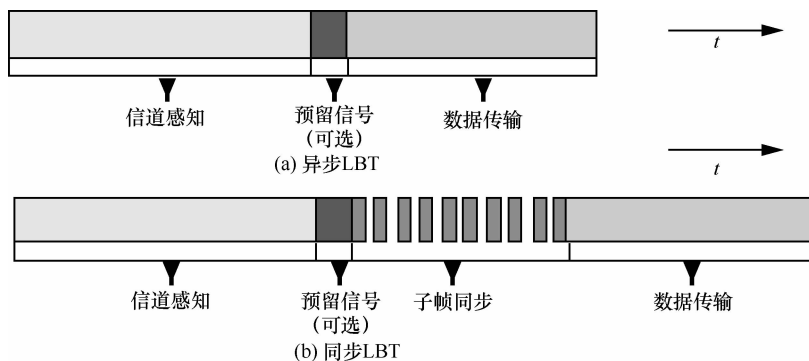


图 15 同步 LBT 和异步 LBT

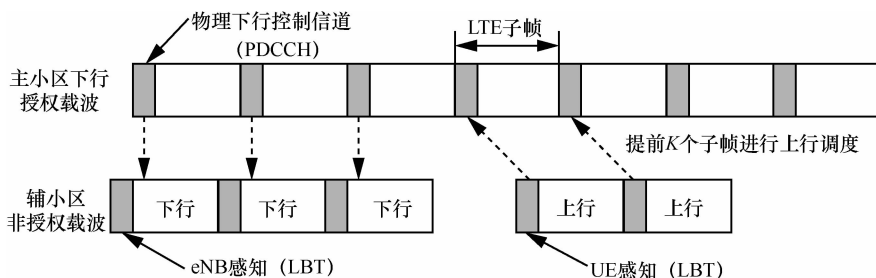


图 16 LAA-LBT 方案

通过非授权频段连接到 $N(N \leq 1)$ 个辅小区 (Scell), 重要的控制层信息通过授权载波发送, 非授权载波主要进行数据的传输, 通过 CA 技术将授权载波和非授权载波聚合起来。下行传输数据前, eNB 需要去感知信道, 若可用, 传输多个帧, 上行传输数据时, 为了保持同步和 HARQ 的配置, 要求发送每一帧之前都执行 LBT。考虑到目前采用了 CSMA/CA 的 Wi-Fi 系统可以很好地与其他系统共存, 参考文献[24]中提出了一种如图 17 所示的在 LTE 中加入 IEEE 802.11 射频模块的方案, 此模块完全沿用 CSMA/CA 的信道接入机制, 当 IEEE 802.11 模块抢占到信道之后, 把信道的信息传递给 LTE 模块, 数据的传输由 LTE 模块来完成。这在本质上是把具备 LBT 功能的 Wi-Fi 节点与 LTE 高效数传相融合。

除了时分复用的方法, LTE 上行传输功率控制也可以作为 LTE-Wi-Fi 共存的可选方案之一, 传统的上行功率控

制是基于用户的路径损耗, 不考虑 Wi-Fi 的活动状态。小区边缘的用户有更高的传输功率, 有可能会影响到周边 Wi-Fi 的传输。在参考文献[25]中提出了一种改良的上行功率控制方法, 在功率控制中加入了 LTE 干扰测量, 通过降低用户的发射功率来减少对 Wi-Fi 的干扰。表 1 列出了现有的 LTE-U 和 Wi-Fi 的共存方案及其优劣势对比。

6.2.3 单运营商流量转移

前文提到, 在 LTE-U 的背景下, 流量的分配问题必须考虑到 Wi-Fi 的活动情况, 流量的分配转移需要在转移量和用户 QoS 之间进行权衡。目前已经有一些针对 LTE-U 背景下流量平衡的研究工作。如参考文献[16]中, 微蜂窝基于 duty-cycling 的方式和 Wi-Fi 系统共享非授权频段, 通过将 Wi-Fi 系统的指数退避机制建模为二维马尔可夫链, 在此模型上进行系统级仿真, 结果显示, 共存时 Wi-Fi 和 LTE 的吞吐性能比之前的系统性能要优越。在文中的扩展

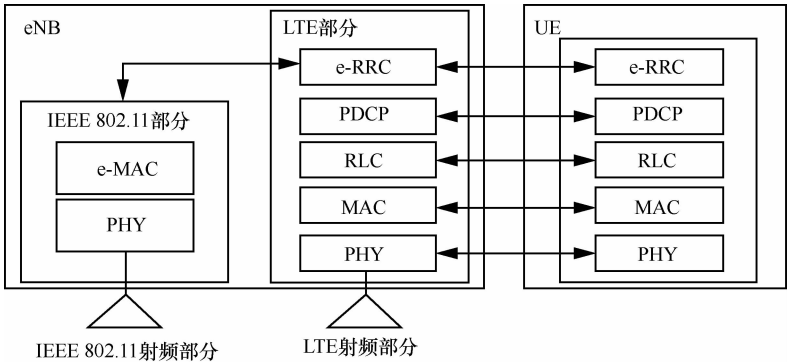


图 17 加入 IEEE 802.11 射频模块的 LTE-U

表 1 LTE-U 与 Wi-Fi 共存方案优劣势对比

LTE-U 与 Wi-Fi 共存						
类别	方案	优势	不足	复杂度	公平性	总效率
信道选择	CSAT ^[17]	支持多信道跳转, 有效避免干扰	部署密集的区域, 没有空闲信道可用, 此类方案局限性很强, 需配合其他共存方案使用	中	—	高
	LCCS ^[18]	自行选择最小干扰的信道进行数据传输		低	—	高
	LTE 带宽配置 ^[18]	自行配置传输带宽大小, 高效利用空闲信道		低	—	高
同信道共存	工作周期 ^[19]	现有标准即可实现, 可动态调整信道占用时长	LTE 控制信道, 公平性差。	中	低	中
	LTE-muting ^[12]	现有标准下通过配置 LTE 子帧即可实现共存	LTE-U 恢复信道使用时, 直接将 Wi-Fi 系统挤掉, 系统间干扰较大	低	低	中
	ABS ^[19]	完全利用现有技术实现, 通过配置 ABS 即可		低	低	中
	LAA-LBT ^[23]	引入 LBT 保证公平性, 采用 CA 技术跨频段载波聚合	直接引入 LBT 机制没有考虑随机退避, 易发生数据分组碰撞, 引起错误帧, 影响系统性能	高	中	中
	自适应 LBT ^[20]	多信道跳转避免长时间占用同一信道, 能够动态调整占用信道时长, 增加信道使用效率		高	中	中
	同/异步 LBT (带回退) ^[22]	同步 LBT 兼容性强。异步 LBT 效率高, 可用于不同的场景。加入随机退避降低数据分组碰撞概率	降低数据分组碰撞概率是以牺牲信道使用率为代价的	高	高	中
	CSMA/CA-LTE ^[24]	采用 CSMA/CA 协议, 保证公平性, 有效降低数据分组碰撞概率	退避增加了信道空闲时间, 频谱效率不高	中	高	中
其他	上行功率控制 ^[25]	降低发射功率, 从而有效降低系统间的干扰	发射功率低, 系统性能较差	低	中	低



工作中,提出了一个最优流量平衡策略。

6.2.4 运营商之间的频谱共享

当多个运营商的 LTE-U 小基站在同一区域出现时,多运营商之间就需要进行协调。参考文献[26]研究了这一主题,讨论了在两个和多个运营商的情景下利用博弈论中的纳什均衡来实现运营商之间的频谱共享。而参考文献[27]则利用时分复用的思想,通过多运营商配置 LBT 和文中提出的分布式 Learning Q 算法来实现频谱共享。其他方面虽然没有直接研究非授权频段上多运营商的频谱共享问题,但运营商之间在授权频段的频谱共享问题还是有研究案例的,这些共享方法可以用于 LTE-U 背景下的资源共享。如参考文献[28]中提出的一种同时接收和感知的认知 LTE-A 系统,就可以用于 LTE-U 的共存场景。

7 结束语

本文对新兴的 LTE-U 技术进行了概述,将 LTE 部署在非授权频段上对于运营商和用户都有巨大的利益,同时能为将来的巨大流量需求提供出路。本文详细介绍了 LTE-U 的设计要求、原理和可能的部署方案,并进一步分析了部署 LTE-U 的难点,重点讨论了 LTE-U 和 Wi-Fi 共存的相关研究工作。

从研究的现状和趋势来看,LTE-U 要实现良好的部署和运行,信道感知是非常关键的一环,因为它决定了其他无线系统能否得到资源,也决定了 LTE-U 是否能和其他系统公平有效地在非授权频段共享资源。所以对于将来的研究,这几个方面非常值得关注:首先是 LTE-U 背景下的信号检测研究,快速准确的信号检测可以有效地提高信道使用效率并降低系统间的干扰。对现有的 LBT 或 CSMA/CA 中的信道感知算法的改进,也可提升信道接入机制的效率。其次是共存方案的设计,高效公平的共存方案使无线频谱资源得到充分利用的同时,可大幅提升共存系统的性能。再次,如何将现有的 LTE 和 Wi-Fi 内嵌技术应用于 LTE-U 的背景下,也值得重点关注,LTE-U 的相关研究要尽可能地使用现有技术,降低开发成本,例如认知 LTE 系统在 LTE-U 背景下的应用研究。最后,运营商内流量的合理转移和多运营商之间的资源共享也是很好的研究点。

参考文献:

[1] BLEICHER. A surge in small cell sites[J]. IEEE Spectrum, 2013, 50(1): 38-39.

[2] 王胡成,徐晖,程志密,等. 5G 网络技术研究现状和发展趋势[J]. 电信科学, 2015, 31(9): 149-155.
WANG H C, XU H, CHENG Z M, et al. Current research and development trend of 5G network technologies [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(9): 149-155.

[3] ISMAIL M, ABDRABOU A, ZHUANG W. Cooperative decentralized resource allocation in heterogeneous wireless access medium [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(2): 714-724.

[4] 3GPP workshop on LTE in unlicensed spectrum, Jun 2014[S/OL]. [2015-11-27]. <http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1603-lte-in-unlicensed>.

[5] Study on licensed assisted access to unlicensed spectrum (Release 13): 3GPP TR 36.889:2014[S/OL]. [2015-11-27]. <http://www.in2eps.com/3g36/tk-3gpp-36-889.html>.

[6] Study on licensed-assisted access using LTE:3GPP Study Item -RP-141397:2014[S/OL]. [2015-11-27]. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_65/Docs/RP-141397.zip.

[7] Huawei, HiSilicon. Scenarios, spectrum considerations and preliminary assessment results of U-LTE: 3GPP RAN1 standard contribution- RWS- 140005: 2014[S/OL]. [2015-11-27]. http://www.3gpp.org/ftp/workshop/2014-06-13_LTE-U/Docs/RWS-140005.zip.

[8] CAI L X, SHEN X, MARK J W, et al. Voice capacity analysis of WLAN with unbalanced traffic [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(3): 752-761.

[9] QIAO J, SHEN X, MARK J W, et al. MAC-layer concurrent beamforming protocol for indoor millimeter-wave networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64 (1): 327-338.

[10] Review of regulatory requirements for unlicensed spectrum: 3GPP RP-140808. 2014[S/OL]. [2015-11-27]. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_64/Docs/RP-140808.zip.

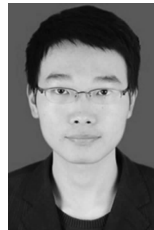
[11] NIHTILA T, TYKHOMYROV V, ALANEN O, et al. System performance of LTE and IEEE 802.11 coexisting on a shared frequency band[C]//Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), April 7-10, 2013, Shanghai, China. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1038-1043.

[12] BABAEI A, ANDREOLI-FANG J, HAMZEH B. On the impact of LTE-U on Wi-Fi performance[C]// 2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC), September 2-5, 2014, Washington DC, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: 336-344.

[13] CAVALCANTE A M, ALMEIDA E, VIEIRA R D, et al. Performance evaluation of LTE and Wi-Fi coexistence in unlicensed bands[C]// 2013 IEEE 77th Vehicular Technology

- Conference (VTC Spring), June 2-5, 2013, Dresden, Germany. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-6.
- [14] GE X, CHENG H, GUIZANI M, et al. 5G wireless backhaul networks: challenges and research advances[J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 6-11.
- [15] 马辉. IEEE 802.11 MAC 协议的性能分析与动态优化[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- MA H. Performance analysis and dynamic optimization of IEEE 802.11 MAC[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [16] LIU F, BALA E, ERKIP E, et al. Small-cell traffic balancing over licensed and unlicensed bands [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(12): 5850-5865.
- [17] Qualcomm. Qualcomm research LTE in unlicensed spectrum: harmonious coexistence with WiFi, June 2014 [EB/OL]. [2015-11-27]. <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/lteunlicensed-coexistence-whitepaper.pdf>.
- [18] ABINADER F M, ALMEIDA E P L, CHAVES F S, et al. Enabling the coexistence of LTE and Wi-Fi in unlicensed bands[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(11): 54-61.
- [19] CableLabs. CableLabs perspective on LTE-U Coexistence with Wi-Fi and operational modes for LTE-U. 3GPP RAN1 standard contribution- RWS- 140004, Sophia Antipolis, France, Jun. 2014 [S/OL]. [2015-11-27]. http://www.3gpp.org/ftp/workshop/2014-06-13_LTE-U/Docs/RWS-140004.zip.
- [20] 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.
- [21] Google. LTE and Wi-Fi in unlicensed spectrum: a coexistence study Nihar Jindal & Donald Breslin[EB/OL]. [2015-11-27]. <http://apps.fcc.gov/ecfs/document/view?id=60001078145>.
- [22] BHORKAR A, IBARS C, PAPATHANASSIOU A, et al. Medium access design for LTE in unlicensed band[C]//Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), March 9-12, 2015, New Orleans, LA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 369-373.
- [23] RATASUK R, MANGALVEDHE N, GHOSH A. LTE in unlicensed spectrum using licensed-assisted access [C]// Globecom Workshops (GC Wkshps), December 8-12, 2014, Austin, TX, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: 746-751.
- [24] SONG H, FANG X. A spectrum etiquette protocol and interference coordination for LTE in unlicensed bands (LTE-U)[C] // International Conference on Communication Workshop (ICCW), June 29 - July 2, 2015, Columbus, Ohio, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 2338-2343.
- [25] CHAVES F S, ALMEIDA E P L, VIEIRA R D, et al. LTE UL power control for the improvement of LTE/Wi-Fi coexistence[C] //Vehicular Technology Conference (VTC Fall), September 2-5, 2013, Las Vegas, NV, USA. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-6.
- [26] TENG F, GUO D, HONIG M L. Sharing of unlicensed spectrum by strategic operators [C]//Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), December 3- 5, 2014, GA, Atlanta, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: 288-292.
- [27] SALLENT O, PEREZ-ROMERO J, FERRUS R, et al. Learning-based coexistence for LTE operation in unlicensed bands[C]// 2015 IEEE International Conference on International Conference on Communication Workshop (ICCW). New Jersey: IEEE Press, 2015: 2307-2313.
- [28] KARUNAKARAN P, WAGNER T, SCHERB A, et al. On simultaneous sensing and reception for cognitive LTE-A systems [C]//International Workshop on Cognitive Cellular Systems (CCS), November 3-7, 2014, Scottsdale, Arizona, USA. New York: ACM Press, 2014: 1-5.

[作者简介]



赵思聪 (1992-), 男, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为 LTE-U 关键技术研究及通信信号检测。



黄磊 (1992-), 男, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为 LTE-U 关键技术研究及通信信号检测。



申滨 (1978-), 男, 博士, 重庆邮电大学教授, 主要研究方向为移动通信技术、通信信号检测和处理等。



黄晓舸 (1982-), 女, 博士, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为移动通信技术、认知无线电动态频谱分配等。