

基于 NC-OFDM 的未授权频段 LTE-U 非连续信道绑定方法研究^①

聂长森^② 白 勇^③

(海南大学信息科学技术学院 南海海洋资源利用国家重点实验室 海口 570228)

摘 要 提出了未授权频段 LTE-U 和 WiFi 共存时基于非连续正交频分复用 (NC-OFDM) 技术的非连续信道绑定方法,使 LTE-U 系统通过频谱感知识别到空闲的 WiFi 频段后可进行更加灵活地信道绑定,从而提升频谱利用率。仿真显示基于 NC-OFDM 的非连续信道绑定的功率谱密度 (PSD) 可以满足 IEEE 802.11a 对带外泄露的保护要求。在相同信噪比情况下 NC-OFDM 相比连续正交频分复用 (C-OFDM) 具有较低的误码率,同时在发送端的峰值平均功率比 (PAPR) 也较低。

关键词 非连续正交频分复用 (NC-OFDM), 未授权频段, LTE-U, 峰值平均功率比 (PAPR), 功率谱密度 (PSD)

0 引 言

面对数据流量的千倍增长,千亿设备连接和多样化的业务需求,都将对 5G 系统设计提出严峻的挑战^[1]。ITM-2020(5G) 推进组在《ITM-2020(5G) 推进组^[2] 5G 无线技术架构白皮书》中指出,与 4G 相比,5G 将需要支持更加多样化的场景,融合多种无线接入方式,并充分利用低频和高频等频谱资源。同时,5G 还将满足网络灵活部署和高效运营维护的需求,通过大幅度提升频谱效率、能源效率和成本效率来实现移动通信网络的可持续发展。目前大部分可利用的频谱资源已经授权给特定的用户。面临日益紧缺的频谱资源,5G 技术的发展需要对频谱进行高效利用^[3]。认知无线电 (cognitive radio, CR)^[4,5] 技术可以通过频谱感知技术识别空闲频段进行频谱资源的复用。为打造速率更高、低延迟且耗电量更小的网络,以满足未来各种物联网装置的连结需求,5G 标准中拟扩大使用未授权频谱 (unlicensed spectrum),并将长期演进 (long term evolution, LTE) 扩展为未授权频段 LTE (LTE-unlicensed, LTE-U)。该技术允许未授权用户感知空闲频段,自适应地选取可

用带宽,实现动态频谱接入,有效提高频谱利用率。信道绑定技术将多个射频信道 (物理信道) 绑定在一起建立单一虚拟信道,可为用户提供更高的峰值带宽。传统的信道绑定技术是将两段连续的频谱进行绑定,从而能利用空闲的频谱提升信号的传输速率。连续信道绑定技术实现比较简单,但只能对临近的空闲频段进行复用,所以适用范围非常有限。本文研究应用于 LTE-U 和 WiFi 共存场景的 5GHz 未授权频段的信道绑定技术。WiFi 的工作频段通常配置在非连续信道上,LTE-U 系统对感知到的空闲 WiFi 频段如果可以进行非连续信道绑定,将提高对该频段频谱的利用,提升频谱的使用效率。

正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 调制技术凭借其实现简单、抗多径衰落能力强、抗码间干扰能力强等诸多优点在 4G LTE 中获得广泛应用。IEEE 802.11a 定义的 WiFi 网络可以工作于 5GHz 未授权频段,同样使用 OFDM 作为调制方式。OFDM 面临的一个主要问题是 OFDM 信号是由多个独立且相互正交的子载波叠加而成,具有较高的峰值平均功率比 (peak-to-av-

① 国家自然科学基金 (61561017), 海南省自然科学基金 (617033) 和海南大学南海海洋资源利用国家重点实验室开放项目子课题 (2016013B) 资助项目。
② 男,1994 年生,硕士;研究方向:移动通信;E-mail: niecs@foxmail.com
③ 通信作者,E-mail: bai@hainu.edu.cn
(收稿日期:2017-04-06)

erage power ratio,PAPR)^[6],所以发送端信号的峰值平均功率比非常高,容易导致信号在经过发送端功率放大器时产生失真。

本文提出基于非连续 OFDM (non-contiguous OFDM,NC-OFDM)^[7-9]的未授权频段 LTE-U 和 WiFi 非连续信道绑定方案,可以有效地实现未授权频段 LTE-U 和 WiFi 的共存,增加 LTE-U 系统容量。通过仿真对比发现,NC-OFDM 不仅可以进行更加灵活地信道绑定,利用空闲的未授权频谱提升数据传输速率,更加高效地提升频谱利用率,而且 NC-OFDM 与连续 OFDM (C-OFDM) 在相同信噪比的情况下,NC-OFDM 的误码率更低,传输性能更好,同时 NC-OFDM 与 C-OFDM 相比具有更低的发送端信号的峰值平均功率比,在通过发送端功率放大器时性能更好。

1 基于 NC-OFDM 的非连续信道绑定方法

1.1 未授权频段 LTE-U 和 WiFi 信道绑定原理

LTE-U 和 WiFi 共存场景下通过感知空闲信道,

可实现未授权频段的频谱复用。信道绑定可以有连续信道绑定和非连续信道绑定两种设计方案。连续信道绑定方案曾在 802.22 中提出以解决 VHF/UHF TV 频段无线区域网中的频谱复用问题^[10]。然而通过频谱感知技术识别到的空闲 WiFi 频段有可能是连续的,也有可能是非连续的。如上所述,WiFi 的工作频段通常配置在非连续信道上,所以识别到空闲非连续信道的情形更加常见。连续信道绑定算法只能将识别到的连续频谱进行复用,为了提升空闲频谱的复用率,本文研究在未授权频段 LTE-U 和 WiFi 共存场景下非连续信道绑定方案,使得感知到的任意空闲 WiFi 频段得到复用,可以进一步提升空闲频段的利用率。

图 1 所示为在未授权频段 LTE-U 和 WiFi 场景下进行信道绑定的方案。图 1(a)是不进行信道绑定的情况,单个信道仅用于自身数据传输,对于空闲信道不能充分使用。图 1(b)为进行连续信道绑定 C-OFDM 的情况,将两个相邻的未授权信道 X-1 和信道 X 进行信道绑定,这两个被绑定的信道可以一

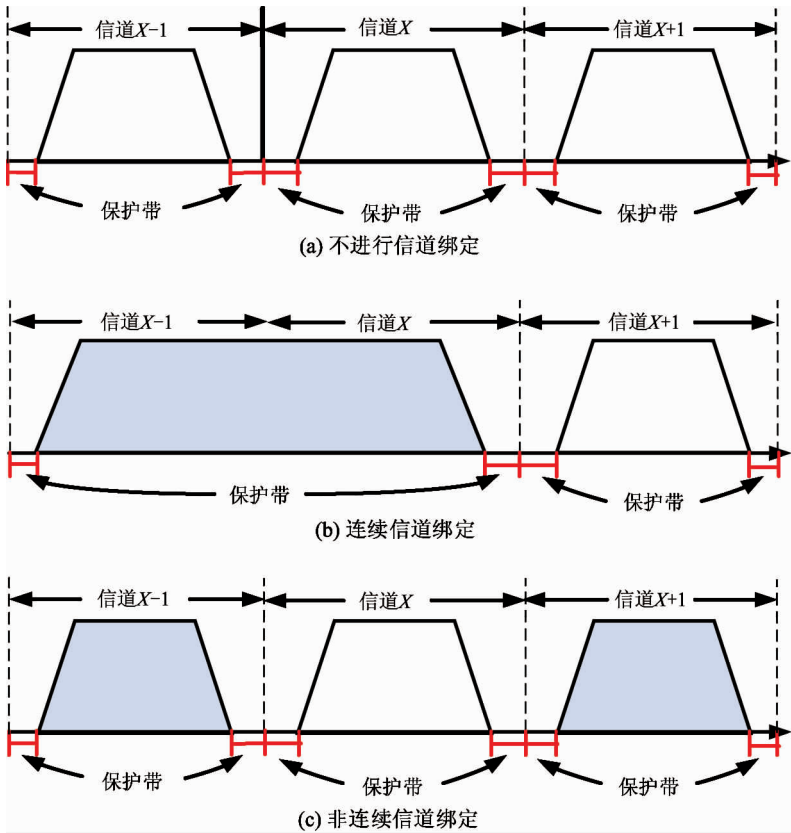


图 1 未授权频段 LTE-U 和 WiFi 共存场景下信道绑定方案

起进行数据的传输,实现未授权频段 LTE-U 和 WiFi 共存,可以提升进行数据传输的带宽,增加 LTE-U 信道容量。而 WiFi 的工作频段通常配置在非连续信道上,这种连续信道绑定方案 C-OFDM 使用范围受到限制。图 1(c) 就是本文提出的非连续信道绑定 NC-OFDM 的方案。如图中所示,将两个不相邻的未授权信道 $X-1$ 和信道 $X+1$ 进行绑定,这种信道绑定方案不仅可以充分利用频谱感知技术感知到的不连续空闲频段,提升频谱利用率,适用范围更加广泛,而且通过仿真发现,基于 NC-OFDM 的非连续信道绑定方案可以保证信号传输的质量。

802.11a 协议是 IEEE 802.11 工作组为 5GHz ISM 频段定义的 WLAN 物理层协议,采用 OFDM 作为信号的多载波调制技术。在该协议中支持信道带宽有 20MHz、10MHz 和 5MHz 3 种。使用信道带宽为 20MHz 时,有效子载波数为 52,其中数据子载波数为 48,占用带宽为 16.6MHz。对传输信号进行连续或非连续的信道绑定后可以将信道带宽提升为 40MHz,从而充分利用空闲频段,提升信号的传输速率,增加频谱利用率。

1.2 基于 NC-OFDM 的信道绑定传输方法

在认知无线电(CR)系统中,认知无线电用户通过未被主用户占用的频段进行通信,因此,基于 OFDM 的认知无线电系统中 OFDM 符号的部分子载波可能会落到主用户占用的频段内。为了避免对主用户造成干扰,这些落入用户占用频段内的子载波上不能用来发送数据或导频,而只能将其置零,这种

子载波非连续的 OFDM 被称为 NC-OFDM。NC-OFDM 通过收集可用子载波实现了高速率数据传输,同时也具有传统 OFDM 的抗多径、频谱效率高的特点,成为认知无线电中理想的数据调制技术。

基于 NC-OFDM 的信道绑定传输时的发射机和接收机框图如图 2 所示。从图中可以看出,基于 NC-OFDM 传输的非连续信道绑定方案与传统的 OFDM 系统相似,不同的是,在 NC-OFDM 系统不是所有的子载波都是有效子载波。NC-OFDM 系统中未授权频段的有效子载波,需要通过频谱感知技术对信道资源的使用情况进行识别,并根据感知到的空闲频段,进行信道绑定的决策。频谱感知技术可以由客户端设备和基站之间的合作来完成,客户端设备可以感知频谱的使用情况,并周期性地发送感知报告到基站。基站根据接收到的感知结果,判断授权频段和未授权频段的使用情况,进行信道绑定的决策,然后控制子载波的开关。当识别到的空闲 WiFi 频段为非连续时,将正在被授权用户使用的频段子载波状态设置为“关”,并将空闲频段的子载波状态设置为“开”,在图 2 的载波分配阶段进行非连续信道绑定的决策。只有子载波状态为“开”的子载波才会分配需要传输的数据。同样在 NC-OFDM 系统的接收端也需要知道信道绑定的信息。NC-OFDM 系统的接收端在载波分解阶段通过接收到的信道绑定信息,根据子载波的开关状态,判断串并变换之后接收到的有效子载波是否携带数据,以进行载波解调而完成数据的接收,从而实现使用非连续

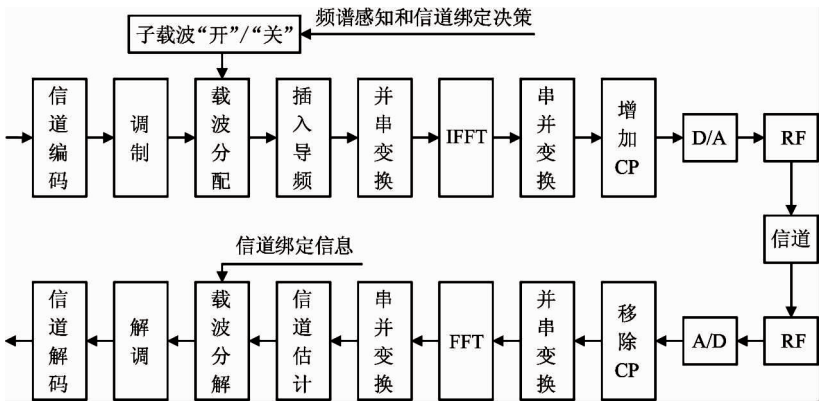


图 2 基于 NC-OFDM 的信道绑定传输框图

空闲 WiFi 频段进行数据传输,增加现有频谱利用率。与 NC-OFDM 类似,C-OFDM 是在基站根据频谱感知技术识别到的空闲 WiFi 频段为连续时,在图 2 中的载波分配阶段同样进行连续信道绑定的决策,并使用 C-OFDM 方法进行信道绑定,而在载波分解阶段根据信道绑定信息,进行载波解调,从而实现数据接收。

2 NC-OFDM 系统性能分析

评价通信系统传输性能的指标主要有发送信号的峰值平均功率比(PAPR)、功率谱密度(PSD)以及信号在接收端的误码率(BER)^[11-14]。目前基于 OFDM 的无线通信系统存在的主要瓶颈是发送的 OFDM 信号是由多个独立且相互正交的子载波叠加而成,具有较高的峰值平均功率比,信号在经过发送端功率放大器时,功率放大器的非线性容易造成信号的失真。此外进行信道绑定,虽然可以增大信号传输的信道带宽,提升信号传输速率,但是连续信道绑定和非连续信道绑定方案的两个信道之间都会存在一定的带外干扰,所以需要 NC-OFDM 系统的功率谱密度进行分析研究,并使其满足通信系统的带外衰减要求。同时接收信号的误码率也需要得到保障。

2.1 NC-OFDM 系统的 PAPR 分析方法

NC-OFDM 可以看作是 OFDM 的一种改进。NC-OFDM 和 OFDM 都同样存在高峰值平均功率比的问题。NC-OFDM 信号是由多个独立的经过调制的子载波信号相加而成的^[15-17]。这样的合成信号就有可能产生比较大的峰值功率,也就会带来较大的峰值平均功率比,简称峰均比。高峰均比会增大对射频放大器的要求,导致射频信号放大器的功率效率降低。

峰均比(PAPR)定义为

$$PAPR_{\text{dB}} = 10 \lg \left\{ \frac{\max_{0 \leq n < N} |X_n|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |X_n|^2} \right\} \quad (1)$$

记发送信号为 X_n , 互补累计分布函数(complementary cumulative distribution function, CCDF)表示

数据的 PAPR 超过给定阈值的概率。通常采用 CCDF 来评估峰均比的性质。抑制 PAPR 的技术主要分为三种,即预畸变技术、概率类技术以及信号编码技术。C-OFDM 系统中两个信道的子载波是相邻的,而 NC-OFDM 系统的两个信道之间是非连续的,两个信道之间无效子载波存在。所以 C-OFDM 系统和 NC-OFDM 系统的有效子载波数虽然是相同的,但是由于 NC-OFDM 系统中无效子载波的存在,两个系统的快速傅立叶变换(FFT)点数是不同的,所以两个系统的 PAPR 分布也是不一样的,本文将通过仿真分析。

2.2 NC-OFDM 系统功率谱密度分析方法

假定基带 OFDM 信号调制波的码型是方波,由 N 个正交子载波组成,其功率谱密度(PSD)可以通过下式计算:

$$|S(f)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left| d_i T \frac{\sin(\pi(f-f_i)T)}{\pi(f-f_i)T} \right|^2 \quad (2)$$

其中 N 是总的子载波数,在使用正交相移键控(QPSK)调制时, $d_i \in \{\pm 1, \pm j\}$ 。

计算 NC-OFDM 系统的 PSD 时,上式同样适用。但是 NC-OFDM 系统的有效子载波数和 OFDM 系统不一样。比如在 NC-OFDM 系统中的无效子载波的 $d_i = 0$ 。通过计算得出 NC-OFDM 和 C-OFDM 信号的 PSD,可以评估信号的带外衰减是否符合 WiFi 场景下的带外衰减要求。同时还可以通过加窗或者增加保护带宽等方法来抑制带外泄露,保证发射信号符合带外衰减的要求。

3 NC-OFDM 系统仿真分析

本节通过使用 Matlab 仿真软件,对非连续信道绑定 NC-OFDM 系统的性能进行仿真,并与传统的连续信道绑定 C-OFDM 系统进行对比分析。系统仿真的主要性能指标有 PAPR、PSD 和 BER。通过仿真发现非连续信道绑定方案,不仅可以使非连续信道进行更加灵活地信道绑定,增加信息传输带宽,提高频谱利用率,而且在相同信噪比的情况下,非连续信道绑定技术 NC-OFDM 比连续信道绑定 C-

OFDM 的误码率更低。这意味着 NC-OFDM 系统的传输可靠性更高。同时由于 NC-OFDM 信号的 2 个不连续子带之间有无效子载波存在,NC-OFDM 和 C-OFDM 的 FFT 点数分布不同,则 PAPR 性能也不同,通过仿真结果发现,NC-OFDM 的 PAPR 相对 C-OFDM 更低,PAPR 性能更好。通过对系统 PSD 的仿真分析发现,非连续信道绑定 NC-OFDM 和连续信道绑定 C-OFDM 的带外泄露和子带间干扰都可以满足 802.11a 的频谱保护要求。

3.1 仿真参数

仿真参数按照 802.11a 标准中对 WiFi 场景下的规定。设置每个未授权频段 LTE-U 和 WiFi 信道的有效子载波数均为 52,子载波间隔为 312.5kHz,有效数据信道带宽为 16.6MHz,FFT 点数为 128,循环前缀(CP)长度为 4。NC-OFDM 系统是将两个非连续的未授权频段 LTE-U 和 WiFi 子带进行绑定,两个子带之间通过一个高斯信道分隔,有效数据子载波为 104,每个子带的保护子载波数为 12,则 NC-OFDM 的 FFT 点数为 320。连续信道绑定是将 2 个连续的未授权频段 LTE-U 和 WiFi 信道进行绑定,有效子载波数为 104,每个子带保护子载波数为 12,FFT 点数为 256。LTE-U 和 WiFi 共存场景下的每个子带详细仿真参数信息如表 1 所示。

表 1 LTE-U 和 WiFi 共存系统子带仿真参数

名称	参数值
调制方式	QPSK
子载波间隔	312.5kHz
FFT 点数	128
载波数	64
有效子载波数	52
保护子载波数	12
CP 长度	8
有效带宽	16.6MHz
符号周期	3.2μs

3.2 PAPR 仿真结果分析

无线传输系统发送端 PAPR 性能对无线通信系统具有重要的影响。PAPR 值高的问题也是目前多载波系统存在的主要性能瓶颈。通过仿真对 NC-

OFDM 和 C-OFDM 系统的 PAPR 性能进行分析对比研究,得出的仿真结果如图 3 所示。由于 NC-OFDM 的子带之间存在无效子载波,而 C-OFDM 的子带之间没有无效子载波,两者的 FFT 点数分布不同,PAPR 性能也是不一样的。通过仿真结果可以看出 NC-OFDM 系统的 PAPR 相比 C-OFDM 系统更低。在图 3 的仿真结果中可以看到互补累计分布函数(CCDFF)同样为 10^{-3} 时,NC-OFDM 的 PAPR 约比 C-OFDM 低 1dB。这就意味着 NC-OFDM 信号在经过发送端功率放大器时,性能更加优越。

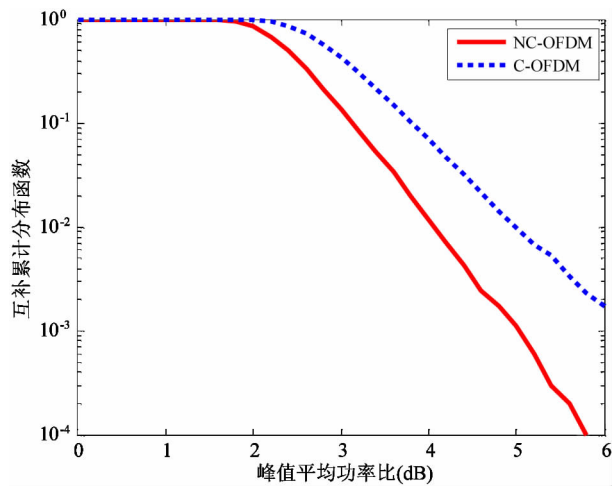


图 3 NC-OFDM 和 C-OFDM 系统 PAPR 性能

3.3 BER 仿真结果分析

误码率性能是对无线传输系统可靠性的保证。仿真中通过计算接收端接收信号的错误码元总数与传输的码元总数的比值分别得到 NC-OFDM 和 C-OFDM 的误码率。误码率的计算公式如下式所示:

$$Pe = \frac{Ne}{N} \tag{3}$$

其中 N 表示传输的二进制码元的总数, Ne 为传错的码元总数。

对 NC-OFDM 和 C-OFDM 系统中在不同信噪比的情况下进行对比分析,仿真结果如图 4 所示。在相同误码率的情况下 NC-OFDM 系统的信噪比更低,由仿真结果可以看出,在误码率同样为 10^{-4} 时,NC-OFDM 系统的信噪比比 C-OFDM 系统的信噪比低 1dB 左右,这意味着 NC-OFDM 系统的传输可靠性比 C-OFDM 更高。

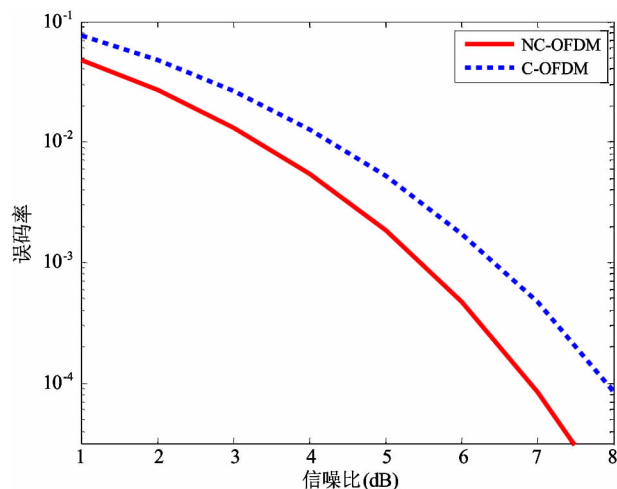


图4 NC-OFDM 和 C-OFDM 系统误码率性能

3.4 PSD 仿真结果分析

功率谱密度是衡量无线通信系统中带外泄露的重要指标。802.11a对 WiFi 场景下的带外泄露作出了明确的规定。仿真按照802.11a中对 WiFi 场景下的标准进行。NC-OFDM 在进行2个非连续的未授权频段 LTE-U 和 WiFi 信道进行绑定时,2个子带之间通过20MHz的无效子带分割,每个信道的有效子载波数为52,保护子载波数为12,信道的有效带宽为16.6MHz。图5为 NC-OFDM 系统的 PSD 性能仿真结果。其中虚线所示是802.11a中对 WiFi 的频谱模板 (spectrum mask) 要求。通过仿真结果可以看出,2个非连续的信道进行绑定时,如果 LTE-U 系统如 femtocell 采取与 WiFi 相当的发射功率,2个子带

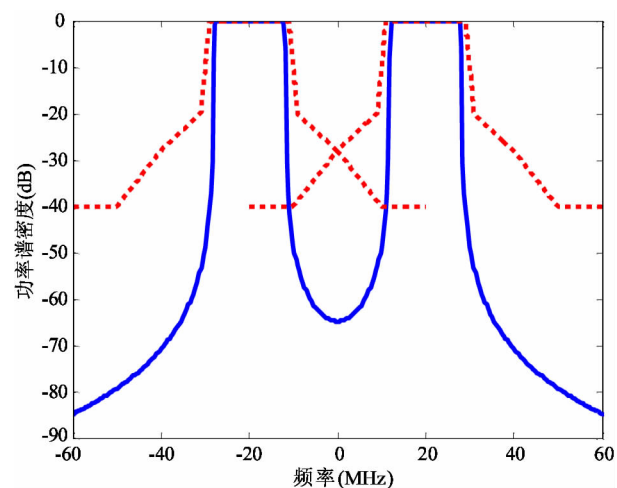


图5 NC-OFDM 系统功率谱密度性能

间的干扰比较低,NC-OFDM 的2个子带的带外泄露和子带间干扰可以满足802.11a的频谱保护要求。

图6所示为进行连续信道绑定的 C-OFDM 系统的功率谱密度(PSD)的仿真结果。进行连续信道绑定的2个子带和 NC-OFDM 中相同,有效子载波数为52,保护子载波数为12,信道的有效带宽为16.6MHz。2个子带之间是连续的,没有无效带宽存在。虚线所示为802.11a中对 WiFi 场景下的带外泄露要求。从图中可以看出 C-OFDM 的频谱处于802.11a中频谱模板之下,符合802.11a的频谱保护要求。

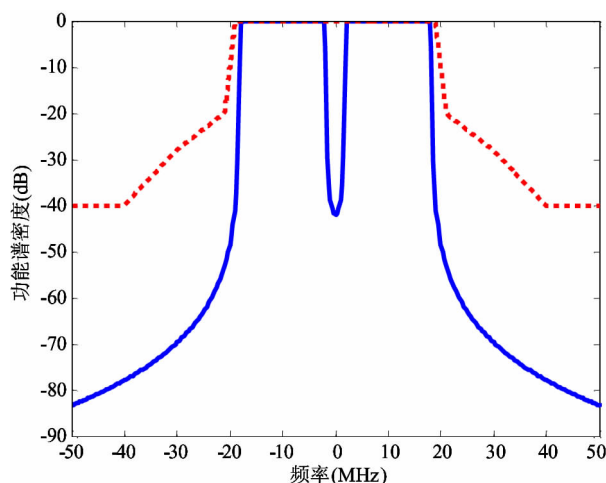


图6 C-OFDM 系统功率谱密度性能

4 结 论

为提升5G频谱资源的利用率,本文提出将非连续信道绑定技术应用于未授权频段 LTE-U 和 WiFi 共存场景下。LTE-U 通过使用 NC-OFDM 技术对频谱感知技术识别到的空闲未授权 WiFi 频段进行非连续的信道绑定,可以增加 LTE-U 系统数据传输的有效带宽,提高数据传输速率,有效地增加频谱利用率。本文提出了基于 NC-OFDM 的非连续信道绑定传输方法,并描述了该方法如何在发射机和接收机中实现。通过仿真发现,在相同信噪比情况下,非连续信道绑定方案 NC-OFDM 相对 C-OFDM 的误码率更低,信号传输的可靠性更高。LTE-U 系统如 femtocell 如果采取同 WiFi 相当的发射功率,NC-OFDM 系统可以满足 802.11a 中对带外泄露要求。

另外,NC-OFDM 信号相对 C-OFDM 信号具有更小的 PAPR,在经过发送端功率放大器时性能更加优越。

参考文献

- [1] 杨峰义, 张建敏, 谢伟良, 等. 5G 蜂窝网络架构分析 [J]. 电信科学, 2015, 31(5): 52-62
- [2] IMT-2020(5G)推进组. 5G 无线技术架构白皮书[EB/OL]. http://www.ctl.cn/data/bps/201510/t20151021_2131170.htm;工业和信息化部电信研究院,2015
- [3] 余莉, 张治中, 程方, 等. 第五代移动通信网络体系架构及其关键技术[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2014, 26(4): 427-433 + 560
- [4] 柳建喜. 基于认知无线电的 NC-OFDM 的 PAPR 的研究[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学·医学版), 2014, 35(1): 98-109
- [5] 刘允, 彭启琮, 邵怀宗, 等. 基于 NC-OFDM 的认知无线电自适应动态资源分配算法[J]. 信号处理, 2011, 27(4): 619-623
- [6] 胡艳龙, 刘明, 韩方景, 等. NC-OFDM 的 PAPR 统计特性分析[J]. 无线电通信技术, 2009, 35(3): 23-25 + 54
- [7] 胡艳龙. 基于认知无线电的 NC-OFDM 关键技术研究: [硕士学位论文][D]. 长沙:国防科学技术大学电子科学与工程学院, 2008. 10-30
- [8] Ajami A, Artail H A. A two stage PAPR reduction technique for the uplink of LTE-advanced with carrier aggregation[C]. In: Proceedings of the IEEE Wireless Conference and Networking Conference, Doha, Qatar, 2016. 1-6
- [9] He X Y, Song R F, Zhou K Q. Compressive sensing based channel estimation for NC-OFDM systems in cognitive radio context [J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(11): 85-94
- [10] Gao J W, Li X L, Wang W. Non-contiguous channel bonding for TV white space usage with NC-OFDM transmission [J]. *Wireless Personal Communications*, 2016, 86(2): 385-401
- [11] Ma D, Shi Y B, Zhang W. Research on acoustic NC-OFDM transmission and noise reduction for logging while drilling data[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(1): 8-16
- [12] Zhang S X, Zhou J, Zhu H B. Cubic metric improvement of aggregated carriers for downlink transmission in LTE-advanced[J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2011, 18(1): 60-63
- [13] Chen K C, Chen W E, Chung W C, et al. Efficient network structure of 5G mobile communications [C]. In: Proceedings of the International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications, Qufu, China, 2015. 19-28
- [14] Lien S Y, Shih S Y, Chen K C. Spectrum map empowered resource management for QoS guarantees in multi-tier cellular networks [C]. In: Proceedings of the IEEE Global Communications Conference, Kathmandu, Nepal, 2011. 1-6
- [15] Jassim K, Hmood, Kamarul A. Noordin. Mitigation of phase noise in all-optical OFDM systems based on minimizing interaction time between subcarriers [J]. *Optics Communications*, 2015, 355: 313-320
- [16] Yang M C, Shin Y. PAPR reduction using tone reservation for NC-OFDM transmissions[C]. In: Proceedings of the 4th International Conference on Ubiquitous and Future Networks, Phuket, Thailand, 2012. 454-455
- [17] Fang H. A novel approach for PAPR reduction of NC-OFDM system [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 519-520:1021-1026

Research on a non-contiguous channel bonding method for LTE-U in unlicensed spectrum based on NC-OFDM

Nie Changsen, Bai Yong

(State Key Laboratory of Marine Resource Utilization in South China Sea, College of Information
Science and Technology, Hainan University, Haikou 570228)

Abstract

The non-contiguous channel bonding under coexistence of LTE-U and WiFi in unlicensed spectrum based on non-contiguous orthogonal frequency division multiplexing (NC-OFDM) is proposed, thus a LTE-U can identify idle spectra by spectrum sensing to improve the spectrum efficiency with more flexible channel bonding. The simulation results demonstrate that the power spectrum density (PSD) of the LTE-U non-contiguous channel bonding based on NC-OFDM can meet the out-of-band leakage requirement of IEEE 802.11a. Furthermore, the NC-OFDM achieves a lower error rate compared with the contiguous orthogonal frequency division multiplexing (C-OFDM) at the same signal-to-noise ratio, and the peak-to-average power ratio (PAPR) at the transmitter is lower as well.

Key words: non-contiguous orthogonal frequency division multiplexing (NC-OFDM), unlicensed spectrum, LTE-U, peak-to-average power ratio (PAPR), power spectrum density (PSD)