

一种新的双模微基站非授权信道接入方法

廖树日^{*①} 何世文^{①②} 杨绿溪^①

^①(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

^②(桂林电子科技大学认知无线电与信息处理教育部重点实验室 桂林 541004)

摘要: 利用非授权频段频谱资源提升网络容量需要有效地解决 LTE(Long Term Evaluation)与 WiFi 的共存问题。最近,学术界和工业界相继提出了授权频段辅助接入机制和双模微基站技术提升蜂窝通信系统容量。考虑双模微基站与 WiFi 接入点覆盖范围存在部分重叠场景,该文提出一种新的双模微基站非授权信道接入机制及联合授权非授权的优化频谱资源分配方案。仿真结果表明,双模微基站和 WiFi 接入点互不可见时,新方案相比于现有方案由于考虑了空间复用具有更好的系统性能;双模微基站和 WiFi 接入点互相可见时,新方案与现有方案性能一致,即两者分时独立占用非授权频段频谱资源。

关键词: 授权频段辅助接入; 双模微基站; 信道接入机制; 资源分配; 覆盖重叠

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)11-2556-07

DOI: 10.11999/JEIT170184

A Novel Dual-band Femtocells Unlicensed Channel Access Mechanism

LIAO Shuri^① HE Shiwen^{①②} YANG Luxi^②

^①(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

^②(Key Laboratory of Cognitive Radio and Information, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to efficiently utilize the unlicensed band to improve the network capacity, it is necessary to solve the problem of the coexistence between Long Term Evaluation (LTE) and WiFi. Licensed-Assisted Access (LAA) and the Dual-Band Femtocell (DBF) which can access both the licensed and unlicensed bands are proposed recently. In this paper, considering the case that a DBF partly overlaps with just one WiFi Access Point (AP), a novel DBF unlicensed channel access mechanism is proposed. Then, the optimal traffic balancing scheme over licensed and unlicensed bands considering the effect of coverage overlap is developed. Numerical results show that if DBF and WiFi AP are invisible mutually, the proposed scheme outperforms the existing scheme in terms of sum utility and throughput because of extra fraction of unlicensed channel time for DBF using spatial reuse. Otherwise the performance is the same as the existing scheme, that is, DBF and WiFi AP use the unlicensed band alternately.

Key words: Licensed-Assisted Access (LAA); Dual-Band Femtocell (DBF); Channel access mechanism; Traffic balancing; Coverage overlapping

1 引言

近年来,随着移动应用的快速发展、移动数据业务的高速增长,蜂窝网络系统容量提升面临的压力日趋增加^[1]。为了应对这一挑战,针对 LTE 系统,相关学者提出了很多有效技术,例如多输入多输出(MIMO)、微基站技术、设备到设备通信(Device-to-

Device, D2D)等。然而,影响蜂窝网络系统容量提升的主要瓶颈在于稀缺的授权频段频谱资源。另一方面,无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN)系统所占用的非授权频段频谱具有丰富的带宽资源,因此更加高效地利用非授权频段频谱资源是一种潜在的提升蜂窝网络系统容量的有效方案^[2,3]。

针对 LTE 与 WiFi 的共存问题,学术界和工业界提出了授权频段辅助接入机制(Licensed-Assisted Access, LAA)并且获得了广泛关注^[4,5], 3GPP 在最新发布的 Release 13 中成立了专门的项目组实施 LAA 标准的制定。为了实现 LAA 技术,在传统蜂窝网络基站的基础上,文献[6]和文献[7]分别提出了

收稿日期: 2017-03-01; 改回日期: 2017-07-20; 网络出版: 2017-09-14

*通信作者: 廖树日 220140692@seu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61471120, 61422105, 61671145), 桂林电子科技大学教育部重点实验室开放基金(CRKL160203)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471120, 61422105, 61671145), The Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing, Ministry of Education (Guilin University of Electronic Technology) (CRKL160203)

双模微基站(Dual-Band Femtocell, DBF)和融合蜂窝 WiFi 基站(Integrated Femto-WiFi, IFW)的概念,前者使用 LTE 空中接口可同时工作在授权及非授权频段,而后者使用 LTE 空中接口工作在授权频段,使用 WiFi 空中接口工作在非授权频段。在最新的 LAA 标准中, DBF 采用类似于 WiFi 系统中的竞争机制同 WiFi 站点共同竞争非授权信道,即先听后说机制(Listen-Before-Talk, LBT)^[8];另一种得到广泛关注的 LTE 与 WiFi 共存接入技术是几乎空白子帧(Almost Blank Sub-frame, ABS)技术^[9],即 LTE 在非授权信道周期性地挂起用于 WiFi 使用非授权信道。此外,国内外学者和相关组织从不同的角度出发也提出了很多其他有效可行的非授权信道接入机制^[10,11]。

除了新型的接入机制外,另一种提高非授权频段频谱利用效率的方案是高效的资源管理分配策略^[12-17]。针对 DBF 网络,文献[13]提出了一种基于 LBT 机制的流量平衡策略,有效地权衡了 LTE 和 WiFi 的综合效益。考虑融合 DBF 和 IFW 的网络场景,文献[14]提出了适用性更强的优化功率和频谱资源分配策略。文献[15]则对文献[14]的内容进行扩展,分析了多微基站和多用户的复杂场景。同时,针对使用多个非授权频段的网络场景,文献[16]提出了一种改进的优化资源分配方案。此外,文献[17]提出一种联合流量卸载和频谱资源分配的优化方案,在保持 WiFi 系统性能的基础上最大化地提升 LTE 系统性能。对于 LTE 与 WiFi 共存场景,现有文献未考虑 DBF 和 WiFi 接入点(WiFi Access Point, WiFi AP)之间不同相对距离对系统性能的影响,未能充分利用空间复用,最大化使用非授权频段频谱资源。

针对现有方案存在的缺点,考虑 DBF 基站和 WiFi AP 覆盖范围存在部分重叠的情形,本文提出一种新的 DBF 非授权信道接入机制,该机制满足对于 DBF 和 WiFi AP 覆盖范围存在部分重叠且互不可见场景,当 WiFi AP 和覆盖重叠范围外的用户通信时, DBF 可同时占用非授权信道调度覆盖重叠范围外的 DBF 用户进行数据传输,即充分利用了空间复用,提高频谱利用率;同时,针对研究场景本文提出一种联合授权非授权的优化频谱资源分配方案。仿真结果表明,若 DBF 和 WiFi AP 互不可见,新方案相比于文献[14]方案由于考虑了空间复用具有更好的系统性能;若 DBF 和 WiFi AP 互相可见,则新方案和文献[14]中方案一致,即 DBF 和 WiFi AP 分时独立占用非授权频段频谱资源。

2 系统模型

考虑单一 DBF 和 WiFi AP 覆盖范围存在部分

重叠的特殊场景,如图 1 所示,其中 N_d 个 DBF 用户和 N_w 个 WiFi 用户竞争使用非授权信道,同时和宏基站用户共享授权信道,设 K 和 D 分别表示授权频带集合和 DBF 用户集合。假设所有的 DBF 或 WiFi 用户在对应的 DBF 或 WiFi AP 覆盖范围内均匀分布,并且任意时刻 DBF 或 WiFi AP 最多与其覆盖范围内的一个用户成功建立通信。同时,假设 DBF 或 WiFi 节点(WiFi AP 或 WiFi 用户)总是有数据需要传输,一旦 DBF 或 WiFi 节点获得非授权信道的所有权,其占据整个带宽资源。此外,假设与 DBF 或 WiFi AP 通信的用户都是“智能”用户,即存在 LTE 和 WiFi 两种空中接口。

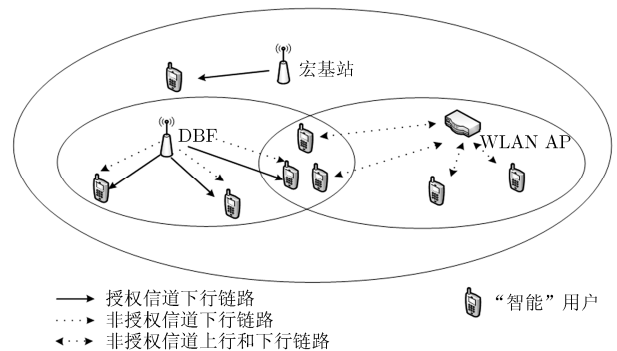


图 1 DBF 和 WiFi AP 覆盖范围部分重叠场景

针对图 1 所示的系统场景,本文提出一种新的 DBF 非授权信道接入机制,如图 2 所示。DBF 以 T_a 为周期尝试接入非授权信道, WiFi 节点则采用带 RTS(Request To Send)/CTS(Clear To Send)的基于碰撞避免的载波侦听多址技术(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA)接入非授权信道。由该机制的传输规则可知,任意 WiFi 节点在向目标节点发送数据前首先发送 RTS 帧,目标节点收到 RTS 帧后响应 CTS 帧。而非发送或目标节点收到 RTS 帧或 CTS 帧后将设置自身 NAV(Network Allocation Vector), DBF 也可能因收到 RTS 帧或 CTS 帧而设置自身 NAV,此时, DBF 禁止参与竞争非授权信道。因此,对于任意一次信道接入尝试, DBF 首先检测自身是否处于 NAV 阶段,否则 DBF 以 T_s 时间检测非授权信道是否处于空闲状态,其中 T_s 满足条件: $T_s \ll T_a$ 。综上所述, DBF 周期性尝试接入信道的结果包括以下几种情形:

(1) DBF 已设置自身 NAV, 即位于覆盖重叠范围内的 WiFi 节点在与其他节点进行相互通信, 此时 DBF 禁止参与竞争非授权信道。

(2) DBF 未设置 NAV, 且在 T_s 时间内检测信道

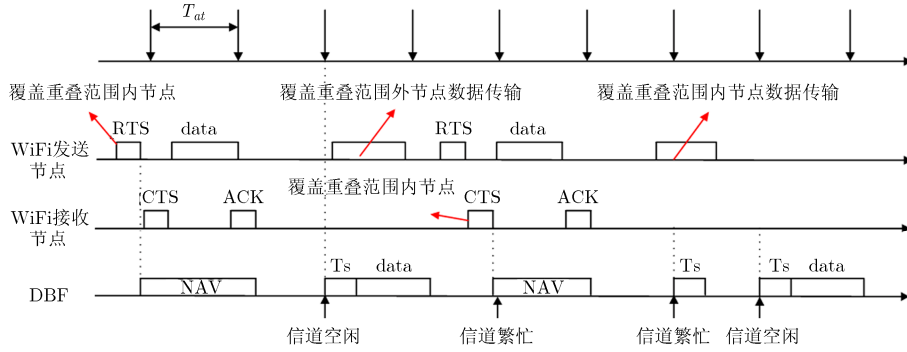


图 2 覆盖重叠情景 DBF 非授权信道接入机制

空闲, 则 DBF 占据非授权信道并调度其用户进行数据传输。此时, 存在两种情形: 若 DBF 和 WiFi AP 互相可见, 则 DBF 可调度覆盖范围内的所有用户进行数据传输, 需要注意的是此时 WiFi 节点由于检测信道繁忙不参与竞争信道; 若 DBF 和 WiFi AP 互不可见, 则 DBF 和 WiFi AP 可同时占用非授权信道调度覆盖重叠范围外的用户进行数据传输。

(3) DBF 未设置 NAV, 且在 T_s 时间内检测信道繁忙, 则 DBF 禁止参与竞争非授权信道。

此外, 需要注意的是 DBF 可以占据授权信道调度覆盖范围内的所有用户进行数据传输。

3 联合授权和非授权频段频谱资源分配方案

在考虑覆盖重叠面积对 LTE 和 WiFi 共存场景系统性能影响的基础上对文献[14]中的频谱资源分配方案进行扩展, 本文提出一种优化的联合授权和非授权频段频谱资源分配方案。

3.1 覆盖重叠场景参数

针对图 1 所示场景, 设 $r_d(r_w)$, d , $N_{di}(N_{do})$, $N_{wi}(N_{wo})$ 和 $S_{ol}(d)$ 分别表示 DBF(WiFi AP)的传输半径, DBF 和 WiFi AP 的相对距离, 覆盖重叠范围内(范围外)的 DBF(WiFi)用户数目和 DBF 与 WiFi AP 覆盖范围重叠面积的大小。此外, 设 D_I , D_O 分别表示覆盖重叠范围内或范围外的 DBF 用户集合。根据 DBF 或 WiFi 用户在对应的 DBF 或 WiFi AP 覆盖范围内均匀分布的假设, WiFi AP 和覆盖重叠范围内或范围外的 WiFi 用户通信的概率分别为 $P_{wi} = S_{ol}(d)/\pi r_w^2$ 和 $P_{wo} = 1 - P_{wi}$ 。同时, 根据图 2 给出的 DBF 非授权信道接入机制可知, 非授权频段频谱资源的分配可以通过控制 DBF, WiFi 节点占用非授权信道的时间比例 t_d , t_w 来实现。两者分别满足 $t_d = t_{dl} + t_{ds}$, $t_w = t_{wl} + t_{ws}$, 其中 t_{dl} , t_{ds} 分别表示 DBF 单独及和 WiFi 节点共同占用非授权信道的时间比例, t_{wl} , t_{ws} 具有相似的定义。

由以上定义可知, $t_{ws} = t_{ds}$, 同时, 需要注意的是若 DBF 和 WiFi AP 互不可见, 则为了避免产生冲突, t_d 仅被用于 DBF 调度覆盖重叠范围外的用户进行数据传输, t_{wl} 和 t_{ws} 也分别被用于覆盖重叠范围内及范围外的 WiFi 用户进行数据传输; 若 DBF 和 WiFi AP 互相可见, 则 t_d 和 t_w 可分别用于 DBF 及 WiFi AP 覆盖范围内的所有用户进行数据传输。

3.2 优化目标建立

考虑 DBF 和 WiFi AP 互不可见场景, DBF 和 WiFi 节点可同时占用非授权信道进行数据传输的时间比例和满足所有 WiFi 用户数据流量需求所需要的总时间比例 $\bar{t}_w$ 相关, 其满足关系式: $t_{ds} = t_{ws} = P_{wo} \bar{t}_w$ 。则针对所考虑场景, 覆盖重叠范围外、内的单一 WiFi 用户的吞吐量表达式分别为

$$S_{wout,j} = R_{wout,j} t_{wout,j} = R_{wout,j} \theta_j t_{ws}, j = 1, 2, \dots, N_{wo} \quad (1)$$

$$S_{win,j} = R_{win,j} t_{win,j} = R_{win,j} \alpha_j t_{wl}, j = 1, 2, \dots, N_{wi} \quad (2)$$

其中, $R_{wout,j}$ 表示覆盖范围外 WiFi 用户的数据传输速率, θ_j 表示第 j 个 WiFi 用户占据时间 t_{ws} 的比例值, $R_{wout,j}$ 和 θ_j 都是由 WiFi 参数所决定的常量; 同时, $R_{win,j}$ 和 α_j 具有相似的定义。

此外, 覆盖重叠范围外的单一 DBF 用户的吞吐量由授权和非授权频段两部分组成, 表达式为

$$S_{dout,m} = \sum_k R_L \left(P_{dout}^{(m,k)} \gamma_{dout}^{(m,k)} \right) + \beta_m t_{dl} R_U + \mu_m t_{ds} R_U \quad (3)$$

$$R_L \left(P_{dout}^{(m,k)} \gamma_{dout}^{(m,k)} \right) = B \log_2 \left(1 + P_{dout}^{(m,k)} \gamma_{dout}^{(m,k)} \right) \quad (4)$$

其中, $P_{dout}^{(m,k)}$, $\gamma_{dout}^{(m,k)}$ 分别表示第 m 个 DBF 用户在授权频段子带 k 上的传输功率及信干噪比, B 表示授权频段每一子带的带宽; β_m , μ_m 分别表示覆盖重叠范围外的单一 DBF 用户占据 t_{dl} 和 t_{ds} 的时间比例, 而 R_U 作为一个常数表示非授权信道的数据传输速率。同理, 可得到覆盖重叠范围内的单一 DBF 用户的吞吐量的表达式, 其仅由授权频段构成, 即

$$S_{din,m} = \sum_k R_L \left(P_{din}^{(m,k)} \gamma_{din}^{(m,k)} \right) \quad (5)$$

在建立优化目标函数前，首先给出用户满意度的定义，由文献[18]可知用户满意度函数通常可由用户吞吐量的对数函数来表示，即 $U(S) = \ln(S)$ 。然后针对 DBF 和 WiFi AP 覆盖范围存在部分重叠且互不可见的系统场景，建立关于所有 DBF 用户和 WiFi 用户的综合满意度最大化目标函数为

$$\begin{aligned} \max_{P_{\text{din}}^{(m,k)}, P_{\text{dout}}^{(m,k)}, t_{dl}, t_{wl}} U_{\text{sum}} &= \sum_{j=1}^{N_{wi}} U(S_{\text{win},j}) + \sum_{j=1}^{N_{wo}} U(S_{\text{wout},j}) \\ &+ \sum_{m=1}^{N_{di}} U(S_{\text{din},m}) + \sum_{m=1}^{N_{do}} U(S_{\text{dout},m}) \\ &= \sum_{j=1}^{N_{wi}} U(R_{\text{win},j} \alpha_j t_{wl}) \\ &+ \sum_{j=1}^{N_{wo}} U(R_{\text{wout},j} \theta_j t_{ws}) \\ &+ \sum_{m=1}^{N_{di}} U \left(\sum_k R_L(P_{\text{din}}^{(m,k)} \gamma_{\text{din}}^{(m,k)}) \right) \\ &+ \sum_{m=1}^{N_{do}} U \left(\sum_k R_L(P_{\text{dout}}^{(m,k)} \gamma_{\text{dout}}^{(m,k)}) \right) \\ &+ \beta_m t_{dl} R_U + \mu_m t_{ds} R_U \end{aligned} \quad (6)$$

约束条件：

$$P_{\text{din}}^{(m,k)} |h_d^{(m,k)}|^2 \leq \bar{I}_{m,k}, \quad k \in K, \quad m \in D_I \quad (7)$$

$$P_{\text{dout}}^{(m,k)} |h_d^{(m,k)}|^2 \leq \bar{I}_{m,k}, \quad k \in K, \quad m \in D_O \quad (8)$$

$$t_{dl} + t_{wl} + t_{ws} \leq t_{\max} \quad (9)$$

$$t_{wl} + t_{ws} \leq \bar{t}_w \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^{N_{di}} \sum_k P_{\text{din}}^{(m,k)} + \sum_{m=1}^{N_{do}} \sum_k P_{\text{dout}}^{(m,k)} \leq P_{\text{tol}} \quad (11)$$

$$t_{dl} \geq 0, \quad t_{ds} \geq 0, \quad t_{wl} \geq 0, \quad t_{ws} \geq 0, \quad P_{\text{din}}^{(m,k)} \geq 0,$$

$$P_{\text{dout}}^{(m,k)} \geq 0, \quad m \in D_I \text{ or } D_O, \quad k \in K \quad (12)$$

其中，条件式(7)和式(8)表示 DBF 对宏基站的干扰值不能超过阈值 $\bar{I}_{m,k}$ ， $h_d^{(m,k)}$ 表示由 DBF 泄露到宏基站的干扰功率所引起的路径损耗；条件式(9)给出非授权信道的时间占用不能超过系统给定的最大值 $t_{\max}$ ；条件式(10)表示 WiFi 用户占用非授权信道进行数据传输的时间不能超过最大值 $\bar{t}_w$ ；条件式(11)给出总功率的约束条件。

3.3 优化目标求解

考虑到在授权及非授权频段上对每个 DBF 用户资源分配的公平性，假设分配在每个 DBF 用户上的功率相同，即为等功率分配。由于满意度函数 $U(S) = \ln(S)$ 是吞吐量 S 的单调递增函数，因此欲求式(6)中的满意度最大值可先求得吞吐量最大值

$$\max \left(\sum_k R_L(P_{\text{din}}^{(m,k)} \gamma_{\text{din}}^{(m,k)}) \right)$$

$$\max \left(\sum_k R_L(P_{\text{dout}}^{(m,k)} \gamma_{\text{dout}}^{(m,k)}) \right)$$

由于 DBF 用户的等功率分配原则，则上述两个吞吐量最大化的目标函数具有相似的解形式，具体根据条件式(7)、式(8)、式(11)、式(12)得到最优解的表达式为

$$P_d^{*(m,k)} = \min \left(\left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\gamma_d^{(m,k)}} \right)^+, \frac{\bar{I}_{m,k}}{|h_d^{(m,k)}|} \right) \quad (13)$$

其中， $x^+ = \max(0, x)$ ， μ 表示满足条件式(11)等式成立的参数值。

求出最优的 $P_d^{*(m,k)}$ 值后，则 DBF 用户在授权频段总吞吐量值为

$$\begin{aligned} R_L^{\text{tot}} &= (N_{do} + N_{di}) R_L^s = N_d R_L^s, \\ R_L^s &= \sum_k R_L(P_d^{*(m,k)} \gamma_d^{(m,k)}) \end{aligned} \quad (14)$$

其中， R_L^s 表示单一 DBF 用户的授权频段吞吐量。将式(14)代入式(6)，由于式(6)的第 3 部分为一常量值，则其可简化为

$$\begin{aligned} \max_{t_{dl}, t_{wl}} U_{\text{sum}} &= N_{wi} \ln(t_{wl}) + N_{wo} \ln(t_{ws}) \\ &+ N_{do} \ln(R_L^s + \beta_m t_{dl} R_U + \mu_m t_{ds} R_U) \end{aligned} \quad (15)$$

进一步地，求取式(15)的最大值，则需满足条件式(9)的成立，即 $t_{wl} = t_{\max} - t_{dl} - t_{ws}$ 。同时，由于 t_{ds} ， t_{ws} 是由覆盖重叠面积决定的常量，因此式(15)的最大值与其第 2 项无关，可进一步简化为

$$\begin{aligned} \max_{t_{dl}} U_{\text{sum}} &= N_{wi} \ln(t_{\max} - t_{dl} - t_{ws}) \\ &+ N_{do} \ln \left(\frac{R_L^{\text{tot}}}{N_d} + \frac{t_{dl} R_U}{N_{do}} + \frac{t_{ds} R_U}{N_{do}} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)对 t_{dl} 求导可得到导函数解的表达式为

$$t_{dl}^d = \frac{1}{\left(\frac{N_{wi}}{N_{do}} + 1 \right)} \left(t_{\max} - \frac{N_{wi} R_L^{\text{tot}}}{N_d R_U} - \left(\frac{N_{wi}}{N_{do}} + 1 \right) t_{ws} \right) \quad (17)$$

同时，考虑式(10)的约束条件，得到 t_{dl} ， t_{wl} 的最优解表达式分别为

$$\begin{aligned} t_{dl}^* &= \max \left((t_{\max} - \bar{t}_w)^+, (t_{dl}^d)^+ \right) \\ &= \max \left((t_{\max} - \bar{t}_w)^+, \left(\frac{1}{\left(\frac{N_{wi}}{N_{do}} + 1 \right)} \cdot t_{\max} - \frac{N_{wi} R_L^{\text{tot}}}{N_d R_U} - \left(\frac{N_{wi}}{N_{do}} + 1 \right) t_{ws} \right)^+ \right) \end{aligned} \quad (18)$$

$$t_{wl}^* = t_{\max} - t_{dl}^* - t_{ws} \quad (19)$$

则 t_d, t_w 的最优解表达式分别为: $t_d^* = t_{dl}^* + t_{ds}$
 $= t_{dl}^* + t_{ws}$ 和 $t_w^* = t_{wl}^* + t_{ws} = t_{\max} - t_{dl}^*$ 。

此外, 针对 DBF 和 WiFi AP 覆盖范围存在部分重叠且互相可见的场景, 采用文献[14]中的相同方法得到 t_d, t_w 的最优解表达式为

$$t_d^* = \max \left((t_{\max} - \bar{t}_w)^+, \left(\frac{1}{(N_w N_d + 1)} \cdot \left(t_{\max} - N_w N_d \frac{R_L^{\text{tot}}}{R_U} \right) \right)^+ \right) \quad (20)$$

$$t_w^* = t_{\max} - t_d^* \quad (21)$$

4 仿真结果与分析

考虑 DBF 和 WiFi AP 覆盖范围存在部分重叠的场景, 如图 1 所示。利用 MATLAB 软件对所提新的 DBF 非授权信道接入机制及联合授权非授权的优化频谱资源分配方案进行仿真分析。仿真场景的设置: DBF 和 WiFi AP 覆盖范围半径均为 50 m; 归一化的 DBF 和 WiFi AP 相对距离为 $d/(r_{\text{DBF}} + r_{\text{WiFi}}) \in [0, \infty)$, 其中 d, r_{DBF} 和 r_{WiFi} 分别表示 DBF 和 WiFi AP 的相对距离, DBF 及 WiFi AP 的覆盖范围半径; 同时假设 $P_d^{(m,k)}, \gamma_d^{(m,k)}$ 取得合适值使得 DBF 在授权和非授权频段的频谱效率都为 3.9 bit/(s·Hz), 此时比值 R_L^{tot}/R_U 仅取决于授权或非授权频带的带宽; 设定非授权频带的带宽为 20 MHz, 授权频带的带宽变化为 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 和 30 MHz; 此外, 设 WiFi 的数据传输速率为 72 Mb/s。

图 3 给出了 DBF 和 WiFi AP 互不可见场景采用新的 DBF 非授权信道接入机制及优化频谱资源分配方案下 DBF 占据非授权信道的时间比例与 R_L^{tot}/R_U 比值的关系图。仿真条件设置为: $N_d = 24$,

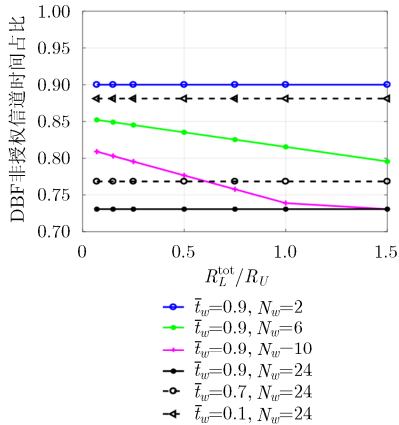


图 3 不同 R_L^{tot}/R_U 比值下 DBF 非授权信道占比时间比较(DBF 和 WiFi AP 互不可见)

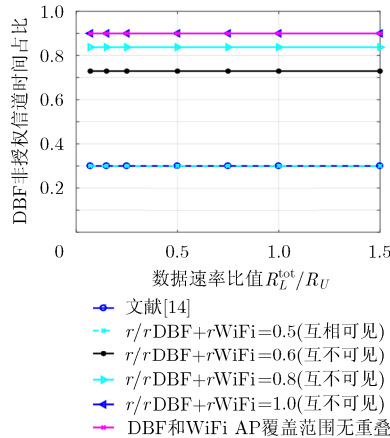


图 4 不同 R_L^{tot}/R_U 比值下 DBF 非授权信道占比时间比较

$t_{\max} = 0.9$, $d = 70$ m。由图 3 可知, DBF 占据非授权信道的时间比例为非授权信道的空闲时间比例、DBF 占用 WiFi 系统的非授权信道时间比例和空间复用时间比例之和。

图 4 给出了考虑 DBF 和 WiFi AP 覆盖范围存在部分重叠场景采用现有方案和新方案下 DBF 占据非授权信道的时间比例比较图。仿真条件设置为: $N_d = 24$, $N_w = 24$, $t_{\max} = 0.9$, $\bar{t}_w = 0.6$ 。由图 4 可知, 若 DBF 和 WiFi AP 的相对距离小于或等于两者的覆盖范围半径, 即两者互相可见时, DBF 时间占比与文献[14]中方案结果相同, 即为非授权信道空闲的时间比例; 若 DBF 和 WiFi AP 的相对距离大于两者的覆盖范围半径, 即两者互不可见时, DBF 时间占比优于文献[14]中方案, 同时其随着 DBF 和 WiFi AP 的相对距离的增大而增加直至两者不存在覆盖范围重叠。产生上述结果的原因是当 DBF 和 WiFi AP 存在覆盖范围部分重叠且互不可见时, 新方案考虑了 WiFi AP 在和覆盖重叠范围外的用户通信时, DBF 可同时占用非授权信道调度覆盖重叠范围外的 DBF 用户进行数据传输, 因此 DBF 非授权信道时间占比提升。图 5 则考虑了最优的 DBF 占据非授权信道的时间比例存在估计误差时对系统总体满意度的影响。仿真条件设置为: $N_d = 24$, $N_w = 24$, $t_{\max} = 0.9$, $\bar{t}_w = 0.6$, $d = 70$ m。 Δt_d 表示 t_d^* 的正偏差值, 通过计算可知其最大值为 $\Delta t_d = 0.1129$, 图 5 给出正偏差值取值不同时系统总体满意度的比较。由图 5 可知, 采用优化频谱资源分配方案得到的 DBF 非授权信道时间占据比例最优值 t_d^* 能实现系统总体满意度的最大化; 正偏差值的取值越大, 即 t_d 的取值越偏离最优值, 系统总体满意度性能越差。同理, 偏差值取负值时可得到相似的结论。

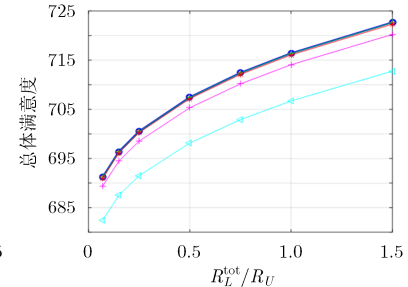


图 5 系统总体满意度误差影响分析

图 6 和图 8 分别给出了在不同 R_L^{tot}/R_U 比值下考虑 DBF 和 WiFi AP 不同相对距离时所有用户总体满意度及吞吐量变化；图 7 和图 9 则分别给出了固定授权频段带宽为 1.4 MHz 情况下 DBF 用户或 WiFi 用户的满意度及吞吐量比较。仿真条件设置为： $N_d = 24$, $N_w = 24$, $t_{\max} = 0.9$, $\bar{t}_w = 0.6$ 。由图 6 可知，若 DBF 和 WiFi AP 互相可见，则新方案和文献[14]中方案具有相同的用户总体满意度；若 DBF 和 WiFi AP 互不可见，则新方案相比于文献[14]中方案具有更高的用户总体满意度且随着 DBF 和 WiFi AP 相对距离的增大，系统性能更优，直至 DBF 和 WiFi AP 不存在覆盖范围重叠。产生上述仿真结果的主要原因是当 DBF 和 WiFi AP 覆盖范围存在部分重叠且互不可见时，新方案相比于文献[14]中方案由于考虑了空间复用具有更高的非授权信道时间占用比例，同时由于 LTE 系统相比于 WiFi 系统具有更高的频谱效率，因此总体满意度性能更优。此外，由图 7 可知，新方案主要通过在保持 WiFi 用户满意度的基础上提高 DBF 用户满意度性能来提高系统的总体满意度性能。关于 DBF 和

WiFi 用户系统总体吞吐量性能及用户吞吐量性能的类似仿真结果可以由图 8 和图 9 得到。

5 结论

对于 LTE 与 WiFi 共存场景，针对现有 DBF 非授权信道接入机制未考虑 DBF 和 WiFi AP 之间不同相对距离对系统性能的影响，未能充分利用空间复用，最大化使用非授权频段频谱资源的缺点，本文提出一种新的 DBF 非授权信道接入机制，该机制满足对于 DBF 和 WiFi AP 覆盖范围存在部分重叠且互不可见场景，当 WiFi AP 和覆盖重叠范围外的用户通信时，DBF 可同时占用非授权信道调度覆盖重叠范围外的 DBF 用户进行数据传输，即考虑空间复用，充分利用非授权频段，提高频谱利用率，同时针对研究场景本文提出一种联合授权非授权的优化频谱资源分配方案。仿真结果表明，若 DBF 和 WiFi AP 互不可见，新方案相比于文献[14]中方案由于考虑了空间复用具有更好的用户满意度和更高的系统吞吐量；若 DBF 和 WiFi AP 互相可见，则新方案和文献[14]中方案一致，即 DBF 和 WiFi AP 分时独立占用非授权频段频谱资源。

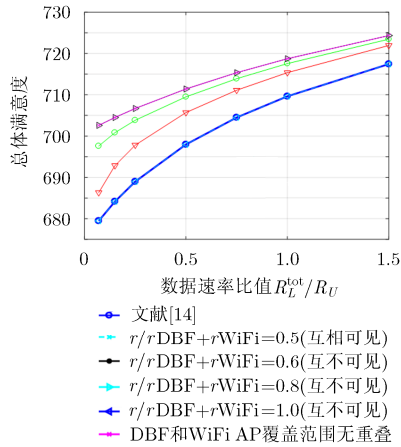


图 6 不同 R_L^{tot}/R_U 比值下用户总体满意度比较

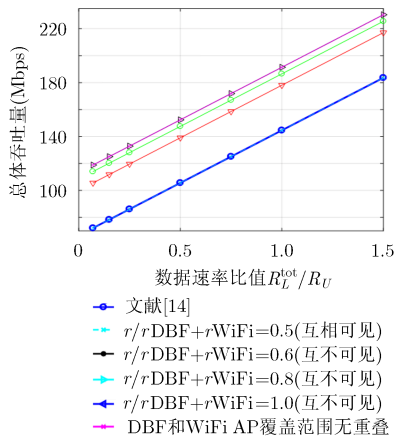


图 8 不同 R_L^{tot}/R_U 比值下用户总体吞吐量比较

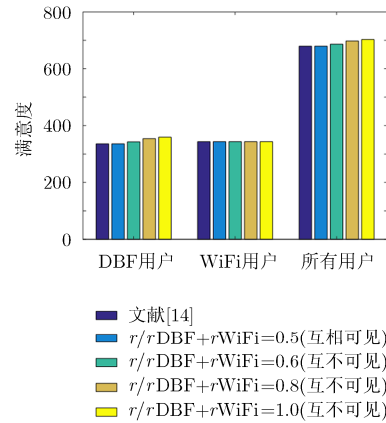


图 7 DBF 用户和 WiFi 用户满意度性能比较

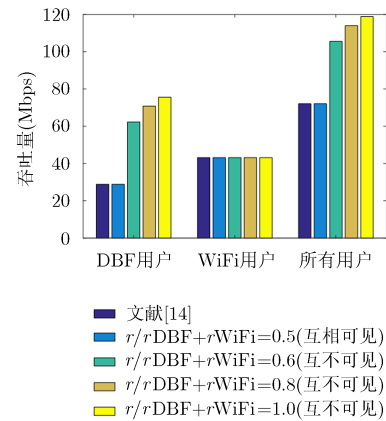


图 9 DBF 用户和 WiFi 用户吞吐量性能比较

参考文献

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, WAN C, *et al.* What will 5G be[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6): 1065–1082. doi: 10.1109/JSAC.2014.2328098.
 - [2] 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. doi: 10.1109/MCOM.2014.6957143.
 - [3] RATASUK R, MANGALVEDHE N, and GHOSH A. LTE in unlicensed spectrum using licensed-assisted access[C]. *IEEE GLOBECOM Workshops*, Austin, TX, USA, 2015: 746–751.
 - [4] U-LTE: Unlicensed spectrum utilization of LTE, Huawei White Paper, 2014. <http://docplayer.net/24763933-U-lte-unlicensed-spectrum-utilization-of-lte.html>.
 - [5] LTE for unlicensed spectrum, Nokia White Paper, 2014. <http://www.scribd.com/doc/250566780/Nokia-Lte-Unlicensed-White-Paper>.
 - [6] LIU F, BALA E, ERKIP E, *et al.* A framework for femtocells to access both licensed and unlicensed bands[C]. *IEEE International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*, Princeton, NJ, USA, 2011: 407–411.
 - [7] Small Cell Forum, Integrated Femto-WiFi (IFW) Networks, White paper at smallcellforum.org, Feb. 2012. smallcellforum.org/.
 - [8] KWAN R, PAZHYANNUR R, SEYMOUR J, *et al.* Fair coexistence of licensed assisted access lte (laa-lte) and wi-fi in unlicensed spectrum[C]. *Computer Science and Electronic Engineering Conference*, Colchester, UK, 2015: 13–18.
 - [9] ALMEIDA E, CAVALCANTE A M, PAIVA R C D, *et al.* Enabling LTE/WiFi coexistence by LTE blank subframe allocation[C]. *IEEE International Conference on Communications*, Budapest, Hungary, 2013: 5083–5088.
 - [10] YIN R, YU G, MAAREF A, *et al.* Adaptive LBT for licensed assisted access LTE networks[C]. *IEEE GLOBECOM*, San Diego, CA, USA, 2015: 1–6.
 - [11] CHOI S and PARK S. Co-existence analysis of duty cycle method with Wi-Fi in unlicensed bands[C]. *IEEE International Conference on Information and Communication Technology Convergence*, Jeju, South Korea, 2015: 894–897.
 - [12] ELSHERIF A R, CHEN W P, ITO A, *et al.* Resource allocation and inter-cell interference management for dual-access small cells[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(6): 1082–1096. doi: 10.1109/JSAC.2015.2416990.
 - [13] LIU F, ERKIP E, BELURI M C, *et al.* Dual-band femtocell traffic balancing over licensed and unlicensed bands[C]. *IEEE International Conference on Communications*, Ottawa, ON, Canada, 2012: 6809–6814.
 - [14] 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. doi: 10.1109/TVT.2014.2387798.
 - [15] ELSHERIF A R, CHEN W P, ITO A, *et al.* Adaptive small cell access of licensed and unlicensed bands[C]. *IEEE International Conference on Communications*, Budapest, Hungary, 2013: 6327–6332.
 - [16] FANG Y, WANG C, DING G, *et al.* Optimal traffic balancing scheme in small cells between licensed and unlicensed bands [C]. *IEEE International Conference on Wireless Communications & Signal Processing*, Nanjing, China, 2015: 1–6.
 - [17] CHEN Q, YU G, SHAN H, *et al.* Cellular meets WiFi: Traffic offloading or resource sharing[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(5): 3354–3367. doi: 10.1109/TWC.2016.2520478.
 - [18] MO J and WALRAND J. Fair end-to-end window-based congestion control[J]. *IEEE Transactions on ACM Networking*, 2000, 8(5): 556–567. doi: 10.1109/90.879343.
- 廖树日：男，1988 年生，硕士，研究方向为高低频段混合组网、LTE 与 WiFi 共存问题。
- 何世文：男，1978 年生，博士，研究方向为多输入多输出通信、协作通信、绿色通信、大规模多输入多输出通信、毫米波通信无线局域网通信技术和优化理论。
- 杨绿溪：男，1964 年生，教授，博士生导师，研究方向为移动通信中的 MIMO 空时信号处理、中继协作通信与网络编码、盲信号处理与阵列信号处理。