

文章编号:1007-5321(2017)04-0016-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2017.04.003

动态信道切换及静默策略下的 LTE-U 共存方案

申 滨, 赵思聪

(重庆邮电大学 移动通信技术重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 提出了一种针对非授权频段的长期演进(LTE-U)系统在 5 GHz 非授权频段与 WIFI 系统共存的方案. 该方案基于先听后说(LBT)信道接入机制,通过引入动态信道切换技术,有效避免了因 LTE-U 系统长时间占用同一信道而对无线保真(WIFI)系统造成的干扰. 在此基础上,对 LBT 机制中的静默时长进行了优化,以进一步提升 LTE-U 与 WIFI 系统共存的效率. 理论分析和实验结果表明,所提方案可使 LTE-U 与 WIFI 在同频段和谐共存,并取得较好的系统性能.

关 键 词: 非授权频段的长期演进; 先听后说; 共存方案; 信道接入机制

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

A LTE-U Coexistence Scheme Based on Dynamic Channel Switching and Muting Strategy

SHEN Bin, ZHAO Si-cong

(Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Based on listen before talk (LBT) channel access mechanism, a scheme allowing the LTE-U system coexistence with WIFI system in 5 GHz unlicensed band was proposed. At the same time, by introducing the dynamic channel switching technology, it is effective to avoid the interference to the WIFI system caused by the LTE-U system which occupies the same channel for a long time. On this basis, the silence length of the LBT mechanism is optimized to further enhance the coexistence efficiency with the WIFI system. Experiments show that the proposed scheme can make LTE-U and WIFI coexist well in the same frequency band and achieve a better system performance.

Key words: LTE-unlicensed; listen before talk; coexistence scheme; channel access mechanism

非授权频段的 LTE (LTE-U, LTE in unlicensed spectrum) 是 3GPP 提出的用于缓解授权频段通信压力的新兴技术^[1]. 要实现 LTE-U, 需先解决其与 WIFI 系统在同频段共存的问题^[2]. 基于现有协议设计的共存方案有循环占空 (duty cycle)^[3] 和几乎空白子帧^[4] 等, 而基于公平性考虑的共存方案是采用先听后说 (LBT, listen before talk) 信道接入机制^[5]. 然而, 现有方案在兼顾信道接入公平性和资

源利用率上存在不足, 难以获得较好的共存性能.

提出了一种可进行信道切换并遵循自适应静默策略的 LBT (MSAM-LBT, LBT with multi-channel switching and adaptive muting period) 信道接入共存方案. 该方案基于欧洲电信标准委员会 (ETSI, European telecommunication standards institute) 制定的 LBT 机制, 在提升资源利用率的同时还可降低 LTE-U 对 WIFI 系统造成的影响.

收稿日期: 2017-04-04

基金项目: 国家科技重大专项项目 (2016ZX03001010-004); 重庆市自然科学基金项目 (cstc2016jcyjA0595)

作者简介: 申 滨 (1978—), 男, 教授, E-mail: shenbin@cqupt.edu.cn.

1 共存方案设计

1.1 ETSI-LBT

ETSI 在关于 5 GHz 频段的管理要求中制定了一种基于帧结构 (FBE, frame based equipment) 的 LBT 机制^[5], 采用该机制的设备在接入信道前, 需先执行至少 20 μs 的基于能量检测 (ED, energy detection) 的空闲信道评估 (CCA, clear channel assessment), 若发现信道处于空闲状态, 设备方可占用信道并传输数据, 数据传输完成后需留出一段空闲时隙供其他系统有机会接入信道. 因此采用 LBT 机制

的 LTE-U 设备有如下 3 种状态: 时长为 T_{CCA} 的空闲信道评估状态、时长为 T_0 的信道占用状态以及时长为 T_{idle} 的静默状态, 则 LBT 的帧长 $T_{\text{LBT}} = T_{\text{CCA}} + T_0 + T_{\text{idle}}$. 考虑到 LTE 系统采用固定的帧长, 为更好地兼容 LTE 系统, 假设 LTE-U 系统采用 FBE-LBT.

1.2 MSAM-LBT

各国在 5 GHz 非授权频段都划分了多个信道, 因此在多个信道中去选择空闲的信道传输数据, 不仅可以避免系统间的传输干扰, 还能有效增大频谱利用率. 在 ETSI 制定的 FBE-LBT 框架基础上, 提出的 MSAM-LBT 方案如图 1 所示.

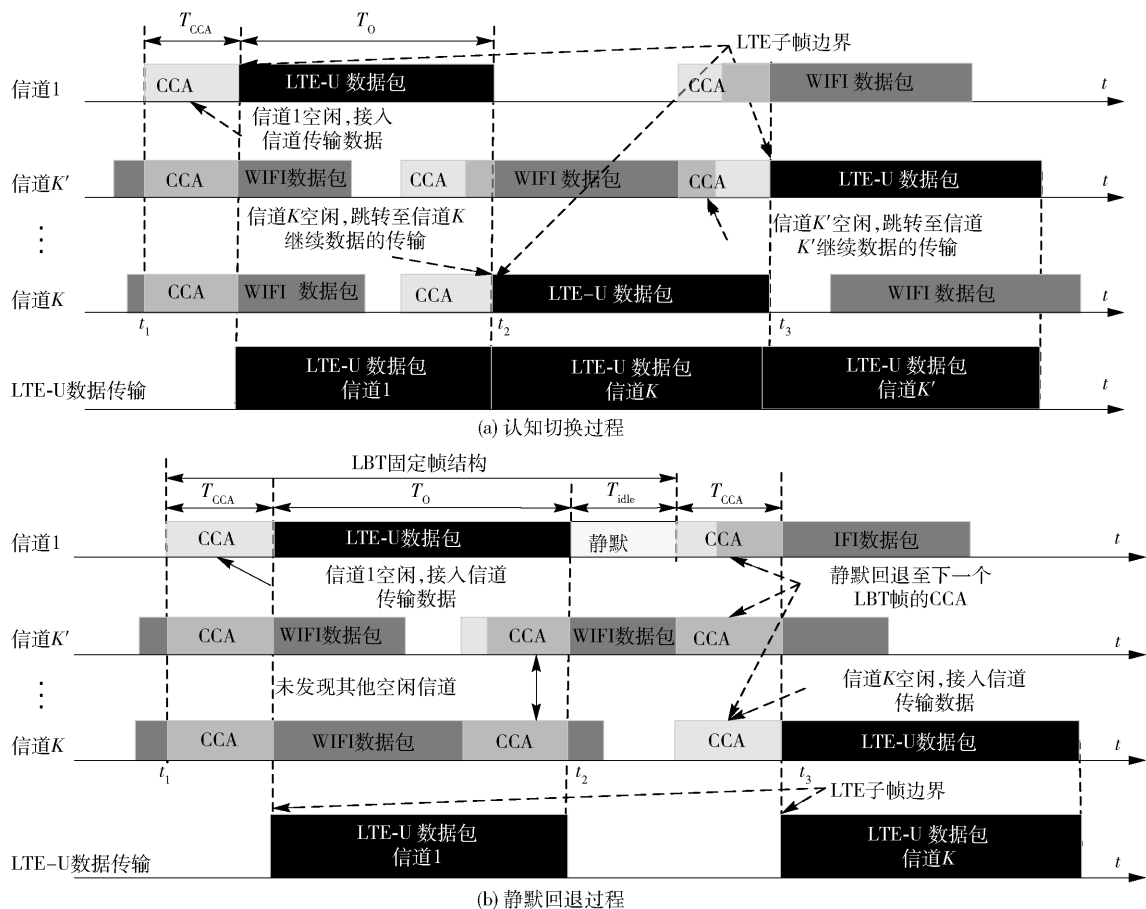


图1 MSAM-LBT 信道接入方案示意图

设非授权频段共有 K 个信道, LTE-U 在图 1(a) 的 t_1 时刻请求接入信道. 设备首先执行多信道并行 CCA (由 LTE-U eNB 完成), 发现信道 1 空闲, 于是接入信道 1 传输数据 (若多条信道空闲, 则随机接入其中的一条). 若设备在 LBT 机制限定的 T_0 后仍需传输数据, 即在传输结束前的 T_{CCA} 里, 对除当前信道外的其他信道进行并行 CCA. 如图 1(a) 所示, 在信道 1 完成传输 (即 t_2 时刻) 时已经确认信道 K 是

空闲的, 即切换至信道 K 继续传输数据. 同理在 t_1 时刻切换至信道 K' 继续传输. 多信道跳转策略增大 LTE-U 总体传输时长的同时, 一定程度上避免了因 LTE-U 长时间占用同一信道给 WIFI 系统带去的干扰. 若 LTE-U 终端在图 1(b) 所示的 t_2 时刻依然有数据要传输, 且没有发现其他可用信道, 此时就在当前信道采取静默回退策略, 即留出空闲时隙, 并在下一个 LBT 帧的 CCA 周期再次对所有信道进行并行

CCA,直至发现空闲信道.

2 系统模型建立

2.1 WIFI 系统模型

假设 WIFI 系统采用请求发送/允许发送模式 (RTS/CTS) 接入信道, 并设 WIFI 站点的类型均相同, 且其缓存区总有待传输的数据. 在上述假设下, WIFI 系统 (采用二进制指数回退机制) 的归一化吞吐可用离散时间的马尔可夫链模型进行分析^[6].

根据文献[6]的推导, 信道 k 上各 WIFI 站点在某一媒体接入控制层 (MAC, media access control) 时隙发送数据的概率为 τ_k ($\tau_k \in [0, 2/(W_{\min} + 1)]$, 其中 W_{\min} 为最小竞争窗长度), 那么该 MAC 时隙空闲的概率为 $P_{i,k} = (1 - \tau_k)^{n_k}$. 当只有一个 WIFI 站点工作时不会发生数据碰撞, 因此该 MAC 时隙 WIFI 系统成功传输数据的概率为 $P_{s,k} = n_k \tau_k (1 - \tau_k)^{n_k - 1}$, 由此可以得到该 MAC 时隙上发生数据包碰撞的概率为 $P_{c,k} = 1 - P_{i,k} - P_{s,k}$. 由此可得, 第 k 个信道上 WIFI 系统的归一化吞吐为

$$S_k = \frac{P_{s,k} E[L]}{P_{s,k} T_{s,k} + P_{c,k} T_{c,k} + P_{i,k} T_{i,k}} \quad (1)$$

其中: $E[L]$ 表示平均数据包有效载荷, $T_{s,k}$ 表示成功传输的平均时长, $T_{c,k}$ 表示数据碰撞的平均时长, $T_{i,k}$ 是空闲的 MAC 时隙时长.

2.2 LTE-U 系统模型

LTE-U 接入信道时进行多信道并行 ED-CCA, 令 $x_k(n)$ 表示信道 k 上的 WIFI 信号, 且其综合了信道衰落、畸变等影响因素. 假设 $x_k(n)$ 为独立同分布的高斯信号, 且 $x_k(n) \sim N(0, \sigma_x^2)$, 并假设噪声信号 $\eta(n)$ 为高斯信号, 且 $\eta(n) \sim N(0, \sigma_\eta^2)$. 接收信号 $y_k(n)$ 服从二元假设模型: H_0 (目标信道上不存在 WIFI 信号的假设) 和 H_1 (目标信道上存在 WIFI 信号的假设). 因此, 多信道 CCA 模型的二元假设为

$$y_k(n) = \begin{cases} x_k(n) + \eta(n), & H_1 \\ \eta(n), & H_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, N 为 CCA 内的采样数. 设检测信道 k 时, LTE-U 的检测概率和虚警概率分别为 $P_{d,k}$ 和 $P_{f,k}$. 根据前文分析, $P_{i,k}$ 为信道 k 上 WIFI 系统不活动的概率, 假设 T_{CCA} 过程中 WIFI 系统的状态不变, 由此可得信道 k 上二元假设模型的概率: $P_k(H_0) = P_{i,k}$, $P_k(H_1) = 1 - P_{i,k}$. 那么 LTE-U 接入信道 k 时发生阻塞的概率为 $P_{b,k} = P_k(H_1) P_{d,k} + P_k(H_0) P_{f,k}$. 则多信道接入时的阻塞率为

$$P_b^{(K)} = \prod_{k=1}^K P_{b,k} = \prod_{k=1}^K (P_k(H_1) P_{d,k} + P_k(H_0) P_{f,k}) \quad (3)$$

令 C_0 表示信道上不存在 WIFI 信号时的 LTE-U 吞吐量, C_1 表示信道上存在 WIFI 信号时的 LTE-U 吞吐量, 并将接入信道 k 时的 C_0 和 C_1 分别表示为 $C_{0,k}$, $C_{1,k}$. 设 WIFI 和 LTE-U 的信号相互独立, 则

$$\left. \begin{aligned} C_{0,k} &= \text{lb}(1 + \Gamma_{L,k}) \\ C_{1,k} &= \text{lb}\left(1 + \frac{\Gamma_{L,k}}{\Gamma_{W,k} + 1}\right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中: $\Gamma_{W,k}$ 是信道 k 上 WIFI 信号的信噪比, $\Gamma_{L,k}$ 是信道 k 上 LTE-U 信号的信噪比.

当可用信道数 K 为 1 时, $C_{0,1}$ 和 $C_{1,1}$ 发生的概率分别为 $P_1(H_0)(1 - P_{f,1})$ 和 $P_1(H_1)(1 - P_{d,1})$. 此时两类情况下的信道感知接入吞吐量分别为

$$\left. \begin{aligned} R_0^{(1)} &= C_{0,1} P_1(H_0)(1 - P_{f,1}) \\ R_1^{(1)} &= C_{1,1} P_1(H_1)(1 - P_{d,1}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

则基于 LBT 的 LTE-U 可获得的平均吞吐量为

$$R^{(1)} = \frac{T_{\text{LBT}} - T_{\text{idle}} - T_{\text{CCA}}}{T_{\text{LBT}}} (R_0^{(1)} + R_1^{(1)}) \quad (6)$$

3 多信道认知接入及切换吞吐分析

当非授权频段上共有 $K(K > 1)$ 条信道开放使用时, 若 LTE-U 可在 K 条信道中寻找可用资源, 理论上可提升系统的认知接入吞吐量. 为便于分析和数学推导, 假设各信道相互独立, 且各信道上 WIFI 系统的站点数和发射功率均相同, 这时可认为各信道在各 MAC 时隙的空闲概率相同, 且 LTE-U 对目标信道进行频谱状态认知的检测概率和虚警概率也一致. 在上述假设条件下, 可令 $P_1(H_1) = \dots = P_K(H_1) = P(H_1)$, $P_1(H_0) = \dots = P_K(H_0) = P(H_0)$, $P_{d,1} = \dots = P_{d,K} = P_d$, $P_{f,1} = \dots = P_{f,K} = P_f$.

当 K 等于 2 时, LTE-U 同时对这两个信道的状态进行辨识, 根据结果接入到其中一条. 此时 $C_{0,1}$ 发生的概率 $P_{C_{0,1}}$ 由 4 部分组成:

1) 2 条信道均空闲, LTE-U 检测二者均未发生虚警, 随机接入信道 1 的概率为

$$P_{C_{0,1}} = P_1(H_0)(1 - P_{f,1}) P_2(H_0)(1 - P_{f,2}) / 2 \quad (7)$$

2) 2 条信道均空闲, LTE-U 检测信道 1 未发生虚警, 检测信道 2 发生虚警时, 接入信道 1 的概率为

$$P_{C_{0,1,2}} = P_1(H_0)(1 - P_{f,1}) P_2(H_0) P_{f,2} \quad (8)$$

3) 信道 1 处于空闲状态, 信道 2 存在 WIFI 信号, LTE-U 检测信道 1 未发生虚警, 检测信道 2 发生漏检时, 接入信道 1 的概率为

$$P_{C_{0,1,3}} = P_1(H_0)(1 - P_{f,1})P_2(H_1)(1 - P_{d,2})/2 \quad (9)$$

4) 信道 1 处于空闲状态, 信道 2 存在 WIFI 信号, LTE-U 检测信道 1 未发生虚警, 检测信道 2 未发生漏检时, 接入信道 1 的概率为

$$P_{C_{0,1,4}} = P_1(H_0)(1 - P_{f,1})P_2(H_1)P_{d,2} \quad (10)$$

从而可得

$$P_{C_{0,1}} = P_{C_{0,1,1}} + P_{C_{0,1,2}} + P_{C_{0,1,3}} + P_{C_{0,1,4}} \quad (11)$$

根据前文假设, 可将 $P_{C_{0,1}}$ 写为

$$P_{C_{0,1}} = P(H_0)(1 - P_f)[P(H_0)(1 - P_f)/2 + P(H_0)P_f] + P(H_1)(1 - P_d)/2 + P(H_1)P_d \quad (12)$$

通过类似的分析方法可得信道 1 忙, 但 LTE-U 检测信道 1 发生漏检而接入该信道的概率为 $P_{C_{1,1}}$. 同理可得 $P_{C_{0,2}}$ 和 $P_{C_{1,2}}$. 依据假设可得出有 2 条信道可用时, C_0 和 C_1 发生的概率, 分别为

$$\left. \begin{aligned} P_{C_0}^{(2)} &= P_{C_{0,1}} + P_{C_{0,2}} = 2P_{C_{0,1}} \\ P_{C_1}^{(2)} &= P_{C_{1,1}} + P_{C_{1,2}} = 2P_{C_{1,1}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

令 $\alpha = P(H_0)(1 - P_f)$, $\beta = P(H_1)(1 - P_d)$, $\alpha_1 = P(H_0)P_f$, $\beta_1 = P(H_1)P_d$. 上式可写为

$$\left. \begin{aligned} P_{C_0}^{(2)} &= 2\alpha \left[\frac{\alpha}{2} + \frac{\beta}{2} + \alpha_1 + \beta_1 \right] \\ P_{C_1}^{(2)} &= 2\beta \left[\frac{\beta}{2} + \frac{\alpha}{2} + \beta_1 + \alpha_1 \right] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由前文可知, LTE-U 在 H_0 和 H_1 状态下接入各信道的吞吐均为 C_0 和 C_1 , 此时两类情况下的吞吐量分别为 $R_0^{(2)} = C_0P_{C_0}^{(2)}$, $R_1^{(2)} = C_1P_{C_1}^{(2)}$. 则基于 LBT 机制的 LTE-U 可获得的平均吞吐量为

$$R^{(2)} = \frac{T_{LBT} - T_{idle} - T_{CCA}}{T_{LBT}}(R_0^{(2)} + R_1^{(2)}) \quad (15)$$

采用上述的分析方法, 并令 $\mu = \alpha + \beta$, $\nu = \alpha_1 + \beta_1$, 可以得到当 K 为 3 时, LTE-U 根据检测结果接入到其中一条信道时, C_0 和 C_1 发生的概率为

$$\left. \begin{aligned} P_{C_0}^{(3)} &= 3\alpha \left[\frac{1}{3}\mu^2 + \mu\nu + \nu^2 \right] \\ P_{C_1}^{(3)} &= 3\beta \left[\frac{1}{3}\mu^2 + \mu\nu + \nu^2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

利用数学归纳法可求得信道数为 k 时, C_0 和 C_1 发生的概率分别为

$$\left. \begin{aligned} P_{C_0}^{(k)} &= k\alpha \sum_{m=0}^{k-1} \frac{1}{k-m} \binom{m}{k-1} \mu^{k-(m+1)} \nu^m \\ P_{C_1}^{(k)} &= k\beta \sum_{m=0}^{k-1} \frac{1}{k-m} \binom{m}{k-1} \mu^{k-(m+1)} \nu^m \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

由此两类情况下的吞吐量分别为 $R_0^{(k)} = C_0P_{C_0}^{(k)}$, $R_1^{(k)} = C_1P_{C_1}^{(k)}$. 则采用 LBT 结构的 LTE-U 在有 k 条信道可用时, 接入信道的平均吞吐量为

$$R^{(k)} = \frac{T_{LBT} - T_{idle} - T_{CCA}}{T_{LBT}}(R_0^{(k)} + R_1^{(k)}) \quad (18)$$

当信道数大于 1 时, LTE-U 在当前信道限定的 T_o 时长内传输完成后, 可切换至其他可用信道. 相比回退等待, 信道切换后继续传输数据的方式可获得一定量的信道切换吞吐量增益 R_{switch} . 这里选取信道数为 2 的情况, 对信道切换吞吐量增益 R_{switch} 的获取过程进行简要分析. 如图 2 所示, 初始状态时, LTE-U 设备在 2 条信道中进行认知接入, 选择信道 1 接入后传输其数据. 在传输 T_o 时长后, 设备仍需传输数据, 且此时发现信道 2 空闲, 于是跳转至信道 2 继续数据的传输. 认知跳转至信道 2 的接入吞吐量可参考仅有 1 条信道时的接入吞吐量分析.

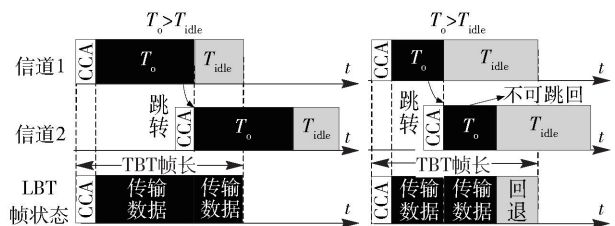


图 2 多信道切换传输示意图

当 $T_o > T_{idle}$ 时, 切换至信道 2 可完成当前 LBT 帧的传输, 此时的信道切换吞吐量增益为

$$R_{switch}^{(T_o > T_{idle})} = (R_0^{(1)} + R_1^{(1)}) \frac{T_{idle}}{T_{LBT}} \quad (19)$$

由此, 在当前 LBT 帧的传输总吞吐量为

$$R = R^{(2)} + R_{switch}^{(T_o > T_{idle})} \quad (20)$$

当 $T_o < T_{idle}$ 时, 在切换后的信道完成 T_o 传输时, 因切换前的信道还处于静默状态, 故不能接入之前的信道. 由此信道切换吞吐量增益为

$$R_{switch}^{(T_o < T_{idle})} = (R_0^{(1)} + R_1^{(1)}) \frac{T_o}{T_{LBT}} \quad (21)$$

即此时最多能完成 $2T_o$ 的传输, 对应的总吞吐量为

$$R = R^{(2)} + R_{switch}^{(T_o < T_{idle})} \quad (22)$$

4 静默时长及估计策略

根据 LBT 帧结构, LTE-U 的信道占用比为

$$\Phi_k = \frac{P_{\text{suc},k}(T_{\text{LBT}} - T_{\text{idle}} - T_{\text{CCA}})}{T_{\text{LBT}}} \quad (23)$$

其中: $P_{\text{suc},k}$ 表示成功接入信道 k 的概率, 且 $P_{\text{suc},k} = (1 - P_{\text{f},k})P_k(H_0) + (1 - P_{\text{d},k})P_k(H_1)$. 假设 WIFI 系统在仅有 WIFI 站点和 LTE-U/WIFI 共存 2 种状态下有着相同的碰撞概率, 那么可以得出 WIFI 系统在信道 k 上的时间占用比为 $1 - \Phi_k$.

为使得 WIFI 与 LTE-U 在非授权频段和谐共存, LTE-U 对 WIFI 的影响要尽可能的小. 设 WIFI 系统有 n_k 个站点, LTE-U 系统的加入将占用 Φ_k 的频带资源, 导致 WIFI 站点的平均吞吐量下降. 同样在 WIFI 系统中增加一个站点也会导致初始的 n_k 个站点的吞吐量下降. 则可将 LTE-U 的信道占用约束条件设为: 因 LTE-U 的加入使得单个 WIFI 站点的吞吐量下降量, 不多于 WIFI 系统自身增加一个站点时 WIFI 站点的吞吐量下降量. 这一约束条件可表示为

$$\Phi_k \frac{S_k^{(n_k)}}{n_k} \leq \frac{S_k^{(n_k)}}{n_k} - \frac{S_k^{(n_k+1)}}{n_k+1} \quad (24)$$

其中: $S_k^{(n_k)}$ 表示 n_k 个站点下 WIFI 系统的归一化吞吐量, $S_k^{(n_k+1)}$ 表示 n_k+1 个站点下 WIFI 系统的归一化吞吐量. 通过简化方程可以得到 LTE-U 在非授权信道 k 上的最大时间占用比为

$$\Phi_k = \frac{(n_k+1)S_k^{(n_k)} - n_k S_k^{(n_k+1)}}{(n_k+1)S_k^{(n_k)}} \quad (25)$$

结合式(23)和式(25)可以得到最优信道占用时长为

$$T_o^* = \frac{[(n_k+1)S_k^{(n_k)} - n_k S_k^{(n_k+1)}]T_{\text{LBT}}}{P_{\text{suc},k}(n_k+1)S_k^{(n_k)}} \quad (26)$$

进而得到相应的最优静默时长:

$$T_{\text{idle}}^* = T_{\text{LBT}} - T_{\text{CCA}} - T_o^* \quad (27)$$

对于 LTE-U 来说, 成功接入信道 k 的概率 $P_{\text{suc},k}$ 是未知的, 因此提出了一种可根据 LTE-U 的接入结果估算 $P_{\text{suc},k}$ 的方法. LTE-U 在每次执行多信道 CCA 后可得到一个 CCA 结果向量, 记为 $\alpha_k = [d_1, \dots, d_k, \dots, d_K]^T$, d_k 为第 k 个信道的测量结果. 当 CCA 确认信道 k 可接入时将 d_k 计为 1, 反之记为 0. 在执行 N_{attempt} 次 CCA 之后, 可得到一个 K 行 N_{attempt} 列的接入信息矩阵 \mathbf{A} , 那么成功接入的次数为第 k 行元素之和 $N_{s,k}$, 因此当选择接入信道 k 时, 对应的

$P_{\text{suc},k}$ 估计值为 $\hat{P}_{\text{suc}} = N_{s,k}/N_{\text{attempt}}$. 此外, 根据 Peng 等^[7]提出的功率感知均值检测方法, 可估算得到信道上 WIFI 系统的碰撞概率 $P_{c,k}$ 和信道空闲概率 $P_{i,k}$, 由此可得到接入信道 k 时的最优静默时长.

5 仿真分析

对所提方案进行性能仿真验证, 设 WIFI 系统在每个信道上的活动站点数及发送功率均相同, 且采用一致的物理层和 MAC 层协议. LBT 帧长设为 10 ms, T_{CCA} 为 20 μs , 且 LTE-U 终端对各信道进行 CCA 时的期望 P_d 和期望 P_{d} 分别设为 0.9 和 0.05, $\Gamma_{\text{w},k}$ 和 $\Gamma_{\text{L},k}$ 分别设为 10 dB 和 15 dB. WIFI 系统的部分参数及值见表 1.

表 1 WIFI 物理层和 MAC 层参数及值

参数	值
数据包有效载荷/bit	8 184
MAC 及物理层首部/bit	400
ACK/ μs	32
RTS/ μs	48
CTS/ μs	32
信道比特率/(Mbit \cdot s ⁻¹)	65
传输时延/ μs	1
时隙长度/ μs	9
DIFS/ μs	34
SIFS/ μs	16
最小竞争窗长度	15
最大回退状态	6

5.1 信道接入阻塞率

考察 LTE-U 在单信道感知接入和多信道感知接入 2 种方式下发生接入阻塞的情况.

从图 3 可以看出, 就单个信道接入而言, LTE-U 信道接入阻塞率会随着该信道上 WIFI 站点数量的增加而增加. 这是因为当 WIFI 站点数增多时, 采用频谱认知接入方式的 LTE-U 会更多地将信道判决为繁忙而无法接入. 但当信道数增加时, 由于 LTE-U 可在多条信道中选择可用信道进行接入, 增加了信道接入机会, 进而降低了接入阻塞率.

5.2 传输时长与静默时长

考察 LTE-U 接入到非授权频段某一信道时, LBT 帧中的传输时长 T_o 和静默时长 T_{idle} 随 WIFI 站点数变化的情况.

从图 4 可以看出, 在设定的 LTE-U 占用时长约

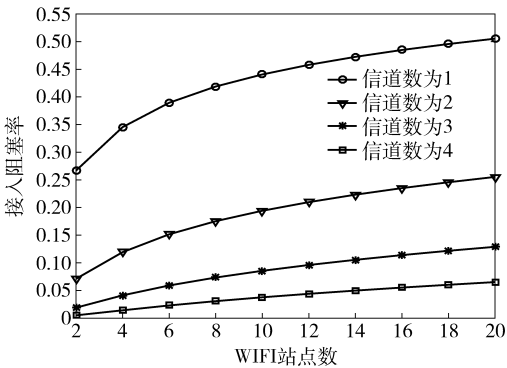


图 3 LTE-U 信道接入阻塞率

束条件下,LTE-U 的最优 T_{idle} 时长会随着 WiFi 站点密度的增加而增加,当 WiFi 站点非常多时,LTE-U 占用信道的时长 T_o 会变得非常少。此时,LTE-U 需要尽可能多地为 WiFi 系统留出信道使用时间,以减小对 WiFi 系统性能的影响。

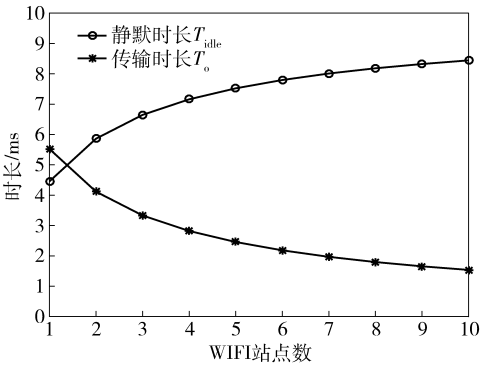


图 4 变化趋势

5.3 LTE-U 系统吞吐量

考察 LTE-U 分别采用占空比为 50% 的 Duty Cycle、FBE-LBT(空闲时长 $T_{idle} = T_o \times 10\%$)、基于负载(LBE,load based equipment)的 LBT^[5]、载波侦听多路访问/冲突避免(CSMA/CA,carrier sense multiple access with collision avoidance)机制^[6]、遵循最优 T_{idle} 的单信道 LBT(SCAM-LBT,LBT with single channel access and adaptive muting)以及 MSAM-LBT(信道数为 2)方案与 WiFi 系统共存时,可达到的系统吞吐量。

从图 5 可以看出,当采用 FBE-LBT 和 LBE-LBT 方案时,LTE-U 可获得较高的吞吐。因为这 2 种方案中 T_{idle} 所占比重较小,从而可以传输更多的数据。SCMA-LBT 因 T_{idle} 会随 WiFi 站点数的增加而变大,因此吞吐量在 WiFi 站点数变多时不够理想。而采用 MSAM-LBT 方案的 LTE-U 在有多个信道可用时,

因可获得更多的信道接入机会,而使其可获得较高的信道感知接入吞吐量。此外,MSAM-LBT 方案还能以一定概率获得信道切换吞吐增益,因此其吞吐量性能较好。当 LTE-U 采用 Duty Cycle 共存方案时难以提升信道的利用率,但这种方案使得 LTE-U 的性能受 WiFi 站点数的影响较小。当信道上 WiFi 站点数增加后,LTE-U 接入信道的概率降低且干扰有所增加,故所有方案的性能呈下降趋势。

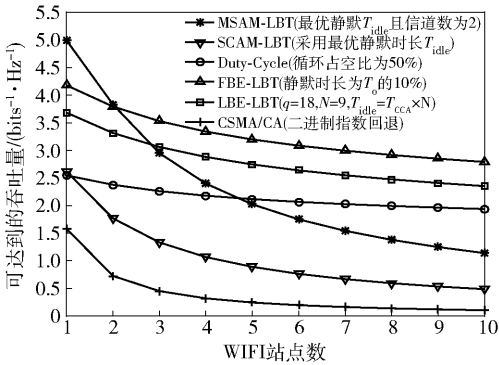


图 5 各共存方案下 LTE-U 的吞吐量

5.4 WIFI 系统吞吐量

考察 LTE-U 采用各共存方案接入到非授权频段时,对信道上 WiFi 系统性能的影响情况。

从图 6 不难观察到,当采用 FBE-LBT、LBE-LBT 和 Duty Cycle 方案时,LTE-U 对 WiFi 系统的性能造成了巨大影响。SCAM-LBT 可根据 WiFi 系统的站点数调整,从而对 WiFi 系统的影响较小。而 MSAM-LBT 的多信道切换及最优 T_{idle} 策略,进一步减小了 LTE-U 对 WiFi 系统的干扰。

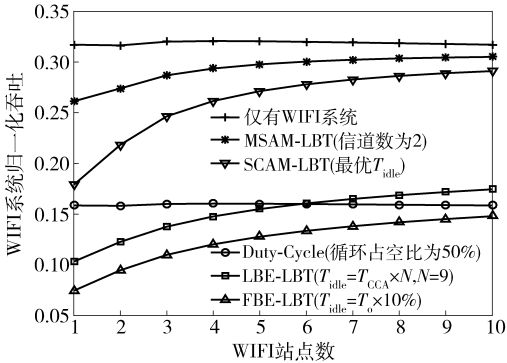


图 6 各共存方案下 WIFI 系统性能的对比

6 结束语

提出了一种基于多信道切换及自适应静默策略的 LBT 信道接入共存方案,该方案基于 ETSI-LBT

机制的时域框架,在此基础上加入了多信道认知跳转机制.此外,为保证 LTE-U 接入信道时,尽量减小对 WIFI 系统的干扰,对 LBT 帧中的空闲时长进行了优化.实验结果表明,所提方案在保证了信道接入公平性的基础上,提升了 LTE-U 系统自身的吞吐量,并减小了对 WIFI 系统性能的影响.

参考文献:

- [1] 3GPP. TR36.889v0.1.1—2014, Study on licensed assisted access to unlicensed spectrum (Release 13) [S]. Sophia Antipolis, France; 3GPP, 2014: 5-6.
- [2] 赵思聪, 黄磊, 申滨, 等. LTE-U: 未来移动通信系统发展的助推剂[J]. 电信科学, 2016, 32(4): 114-125.
Zhao Sicong, Huang Lei, Shen Bin, et al. LTE-U: The propellant for development of future mobile communication system[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(4): 114-125.
- [3] 3GPP. 3GPP RAN1 standard contribution-RWS-140004; CableLabs perspective on LTE-U Coexistence with Wi-Fi and Operational Modes for LTE-U[EB/OL]. Sophia Antipolis: 3GPP, 2014(2014-06-13)[2017-01-20]. http://www.3gpp.org/ftp/work-shop/2014-06-13_LTE-U/Docs/RWS-140004.zip.
- [4] 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.
- [5] ETSI EN. 301 893 v1.7.1—2012, Harmonized european standard, broadband radio access networks (BRAN), 5 GHz high performance RLAN[S]. Sophia Antipolis, France; European Telecommunications Standards Institute, 2012: 23-24.
- [6] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3): 535-547.
- [7] Shao P, Baba Y, Matsumoto A, et al. A system for frame collision detection based on power sensing and time-domain signal processing in wireless LAN[C]// 2015 2nd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks. Noida: IEEE, 2015: 994-999.