

一种基于子载波侦听的宽带无线网络接入控制策略

尹杰晨,毛玉明,冷 ■ 鹏

(电子科技大学通信与信息工程学院光纤传感与通信教育部重点实验室,四川成都 611731)

摘 要: 在基于正交频分多址技术的宽带网络中,通过把竞争分散到多个子信道能有效改善随机接入的性能.然而多信道特性也会使传统基于 Request-To-Send(RTS)控制帧的随机接入协议面临子信道空闲、RTS 传输时间延长、上行复杂的问题.针对这些问题,在本文所提出的接入方法中,用户在没有被分配到资源时通过在随机子载波上发送信号来请求传输机会,与此同时,接入点对这些信号侦听,并根据子载波忙闲状态确定哪些用户可以接入.理论分析及仿真结果表明,相比传统依靠 RTS 的接入方法,采用子载波侦听,系统将获得更高的吞吐量.

关键词: 随机接入; 多信道; 子载波侦听; 正交频分多址

中图分类号: TP 393. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)06-1230-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.06.030

A Subcarrier-Sensing-Based Medium Access Control Scheme in Wireless Broadband Networks

YIN Jie-chen, MAO Yu-ming, LENG Su-peng

(Key Lab of Optical Fiber Sensing and Communications, School of Communication & Information Engineering
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: In the orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) wireless broadband networks, the efficiency of random access can be improved by distributing contention onto multiple channels. However, due to the multichannel property, the traditional systems based on request-to-send (RTS) control frame have to encounter the idleness of subchannel, the extension of RTS transmission time and the complex synchronization of uplink communication. To solve these problems, in our scheme, the users send signals on random subcarrier to request transmission opportunity. The access point senses these request signals, and determines which user is permitted to access channel according to the busy state of the subcarriers. The theoretical analysis and simulation results both show that our scheme outperforms the traditional RTS-based schemes in term of the throughput.

Key words: random access; multi-channel; subcarrier sensing; orthogonal frequency division multiple access (OFDMA)

1 引言

近年来,不少研究试图利用正交频分多址 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 技术的多信道特点来改善传统随机接入的性能,例如 Yong-June Choi 等^[1]提出的 OFDMA Aloha 以及 Hojoong Kwon 等^[2-5]提出的 OFDMA 载波侦听多路访问 (Carrier Sensing Multiple Access, CSMA). 尽管这些方法均在不同程度上提升了传统随机接入协议的性能,但都存在如下问题:当划分的子信道数大于当前竞争 UE 数时,必然有子信道空闲,频谱资源被浪费.另外,在分布式系统中,过多的子信道划分也会导致收发双方工作在同一频道的概率变小^[6].

针对子信道划分问题,在本文提出的接入策略中,传输机会的请求以子载波侦听方式实现,称之为基于子

载波侦听的信道接入 (Sub-Carrier-Sensing-based channel Access, SCSA). 具体而言,用户设备 (User Equipment, UE) 对信道的请求并非是传统的 Request-To-Send (RTS) 控制帧,而是一个随机的子载波信号,接入点 (Access Point, AP) 通过侦听这些子载波信号的忙闲状况来确定如何分配传输资源. 该设计把信道以子载波的粒度划分,以更高效地解决用户接入请求的冲突,同时也避免了传输 RTS 引起的时间开销,以及 OFDMA 上行链路需要解决的复杂同步问题.

2 系统模型

如图 1 所示,SCSA 系统在信道空闲一个长帧间间隔 (Long Inter Frame Space, LIFS) 后开始新的接入周期. 该周期被短帧间间隔 (Short Inter Frame Space, SIFS) 划分为以下几个阶段.

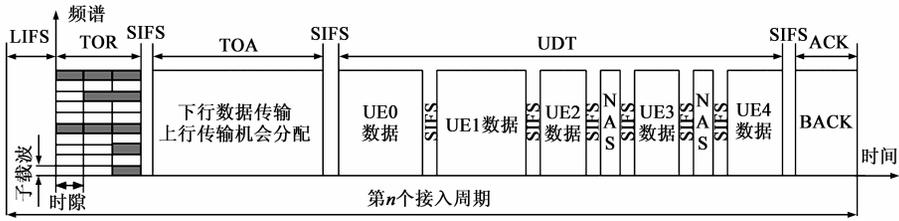


图1 基于子载波侦听的接入算法(SCSA)

2.1 传输机会请求

假设网络有 N 个 UE 需要新的传输机会,表示为集合 $U = \{u_0, u_1, \dots, u_{N-1}\}$. 当传输机会请求 (Transmission Opportunity Request, TOR) 阶段开始时, u_i 从大小为 $[0, N_T - 1]$ 的竞争窗口 (Contention Window, CW) 随机选择 x_i 个时隙进行退避, 同时在 $[0, N_F - 1]$ 随机选择第 y_i 个子载波用于发送请求信号, 用 $r_i = (x_i, y_i)$ 表示. 在退避过程中, u_i 对接收到的信号进行傅里叶变换, 并侦听所选子载波 y_i 的状态信息. 当 u_i 发现子载波变忙, u_i 在本次接入周期中放弃请求传输机会. 若 u_i 顺利完成退避, 则使用所选子载波发送请求信号并持续到 TOR 结束 (N_T 个时隙). 在整个 TOR 阶段, AP 对所有子载波进行侦听, 记录状态为忙的子载波编号, 以及这些子载波变忙的起始时隙号, 用集合 B 表示, 显然, B 为 $\{r_0, r_1, \dots, r_{N-1}\}$ 的子集.

2.2 传输机会分配

传输机会分配 (Transmission Opportunity Allocation, TOA) 属于下行链路, 此时 AP 向 UE 传输下行数据并通过广播集合 B 来通知允许传输的 UE. u_i 在收到集合 B 后, 判断 r_i 是否在 B 中. 若 $r_i \in B$, u_i 的请求被接受. 集合 B 中的元素可按子载波和时隙编号排序, 排序后 r_i 的位置决定了 u_i 何时发送. 被分配了传输机会的 UE 可以用集合 $V = \{v_0, v_1, \dots, v_{L-1}\}$ 表示, 显然 V 是 U 的子集. 集合 V 中获得第 j 个传输机会的 UE 用子集 $V(j)$ 表示. 对于任意的第 j 个传输机会, 当 $|V(j)| > 1$ 时, 传输将发生碰撞.

2.3 上行数据传输

下行传输结束后, 系统进入上行数据传输 (Uplink Data Transmission, UDT) 阶段. 那些在上一个接入周期成功预约的 UE 首先发送数据, 随后 $V(0)$ 开始接入信道. 为了支持变长分组, UE 需要对整个信道进行载波侦听以判断前一个 UE 是否传输完毕. 为了解决隐藏终端问题, 在 $V(i)$ 传输完毕后, 信道将空闲一个 SIFS 时间, 然后 AP 发送 Next Access Signaling (NAS) 来指示 $V(i+1)$ 接入. NAS 的次序决定了哪些 UE 可以发送, 当 AP 发出第 j 个 NAS 信号时, $V(j)$ 被允许接入信道. 当 $V(K-1)$ 发送完毕后 (共分配了 K 个传输机会), 整个上行传输结束. 在信道空闲一个 SIFS 后, AP 广播 ACK 对上行传输

进行确认.

3 性能分析

本文把研究聚焦在 SCSA 的上行链路, 并假设网络节点总是有分组需要发送. 在该饱和业务模型下, 我们把系统吞吐量 S (如式 (1) 所示) 作为主要的性能指标, 并与传统基于 RTS 控制帧的接入方法 (RTS-based channel Access, RTSA) 相比较. 特别地, 我们所对比的 RTSA 基于 Fallah 提出的方法^[5]. 该方法把 UE 平均分配到 M ($M < N_F$) 个子信道, 分配的 UE 使用 CSMA 发送 RTS 控制帧以请求传输机会. 除了数据传输不需要 NAS 的支持, 所对比的 RTSA 其他后续过程与 SCSA 相同. 相关参数的数学符号由表 1 统一给出.

表 1 吞吐量和接入延迟计算所需相关参数

| 参数 | 含义 |
|------------|----------------|
| T_{LIFS} | LIFS 持续时间 |
| T_{SIFS} | SIFS 持续时间 |
| T_{DATA} | 协议数据单元所需的传输时间 |
| T_{RTS} | RTS 控制帧传输时间 |
| T_{TOA} | TOA 阶段持续时间 |
| T_{NAS} | NAS 信号持续时间 |
| T_{ACK} | ACK 阶段持续时间 |
| T_{PHY} | 物理层头部开销所需的传输时间 |
| δ | 时隙大小 |
| L_{DATA} | 协议数据单元的长度 |
| R_C | 控制帧传输速率 |
| R_D | 数据传输速率 |

$$S = \frac{\bar{L}_{DATA}}{T} \quad (1)$$

3.1 SCSA 的吞吐量

$$p_{xy} = \sum_{k=1}^N \binom{N}{k} \left(\frac{1}{N_T N_F} \right)^k \left(\frac{(N_T - x) N_F - 1}{N_T N_F} \right)^{N-k} \quad (2)$$

$$q_{xy} = N \left(\frac{1}{N_T N_F} \right) \left(\frac{N_T N_F - x - 1}{N_T N_F} \right)^{N-1} \quad (3)$$

对于 u_i 的随机选择 r_i , 当 y_i 号子载波在 $[0, x_i - 1]$ 时隙都空闲时, u_i 在第 x_i 个时隙才会发送请求信号. 因此, UE 在第 x 个时隙能够在子载波 y 上发送请求的概率 p_{xy} 表示为式 (2). 类似地, 在第 x 个时隙, 子载波 y 上仅有一个 UE 发送请求信号的概率 q_{xy} 表示为式 (3). 利用式 (2) 和式 (3), 可以得到第 y 号子载波上有请求信

号的概率 p_y , 以及第 y 号子载波上有无冲突请求信号的概率 q_y , 二者分别由式(4)和式(5)给出.

$$p_y = \sum_{x=0}^{N_F-1} p_{xy} = 1 - \left(1 - \frac{1}{N_F}\right)^N \quad (4)$$

$$q_y = \sum_{x=0}^{N_F-1} q_{xy} = \frac{N}{N_F N_F} \sum_{x=0}^{N_F-1} \left(1 - \frac{x+1}{N_F}\right)^{N-1} \quad (5)$$

由于 p_y, q_y 的表达式与 y 无关, 一个接入周期中“忙”状态子载波数与无冲突子载波数的均值 N_B 和 N_S 就可以分别表示为式(6)和(7).

$$N_B = N_F \times p_y \quad (6)$$

$$N_S = N_F \times q_y \quad (7)$$

容易知道, N_B 等于平均传输机会数, 而 N_S 等于平均一个接入周期有多少个传输机会仅被一个 UE 获得. 根据式(1), 就能得到如下 SCSA 的吞吐量.

$$S = \frac{N_S L_{\text{DATA}}}{\left[\begin{array}{l} T_{\text{LIFS}} + N_T \delta + T_{\text{SIFS}} + T_{\text{TOA}} \\ + N_B (T_{\text{DATA}} + T_{\text{PHY}} + 2T_{\text{SIFS}} + T_{\text{NAS}}) \\ - T_{\text{NAS}} + T_{\text{ACK}} \end{array} \right]} \quad (8)$$

3.2 RTSA 的吞吐量

在 Fallah^[5]的分析中, 作者认为退避时隙数为初始竞争窗口 CW_{\min} 的一半, 然而事实上 RTSA 的 TOA 阶段必须等到所有信道的 RTS 都要发送完才能开始, 因此 RTSA 整个退避阶段的空闲时隙数应与所有子信道中最大空闲时隙数相等. 假设工作子信道数为 M_w ($M_w = \min(M, N)$), 则一个时隙空闲的概率为

$$p_{\text{IDLE}} = (1 - \tau) \frac{N}{M_w} \quad (9)$$

其中 τ 可由 Bianchi 提出的模型^[7]得到. 容易知道, 第 i 个子信道上空闲时隙数 Z_i 服从几何分布, 其分布函数如下.

$$F_{Z_i}(z) = \sum_{k=0}^z p_{\text{IDLE}}^k (1 - p_{\text{IDLE}}) \quad (10)$$

而最大空闲时隙的分布函数就应表示为

$$F_{Z_{\text{MAX}}}(z) = [F_{Z_i}(z)]^{M_w} \quad (11)$$

根据式(11), 平均最大空闲时隙数 N_{IDLE} 为

$$N_{\text{IDLE}} = \sum_{z=1}^{\infty} z [F_{Z_{\text{MAX}}}(z) - F_{Z_{\text{MAX}}}(z-1)] \quad (12)$$

而一个子信道中 RTS 成功接入的概率 p_S 为

$$p_S = 1 - p_C = \frac{N}{M_w} (1 - \tau) \frac{N}{M_w}^{-1} \quad (13)$$

因此, 根据式(1), RTSA 的饱和吞吐量 S 等于

$$S = M_w p_S L_{\text{DATA}} \left\{ \left[\begin{array}{l} T_{\text{LIFS}} + N_{\text{IDLE}} \delta + M T_{\text{RTS}} + T_{\text{SIFS}} + T_{\text{TOA}} \\ [1 - (1 - p_S)^{M_w}] (T_{\text{SIFS}} + T_{\text{ACK}}) \\ + M_w p_S (T_{\text{DATA}} + T_{\text{PHY}} + T_{\text{SIFS}}) \end{array} \right] \right\} \quad (14)$$

4 系统性能评价

为了验证本文提出的 RTSA、SCSA 数学模型, 我们比较了吞吐量的理论值和仿真值. 计算和仿真使用的参数基于 IEEE802.11n 标准^[8], 由表 2 给出. 图 2 显示根据所提出的数学模型得到的结果与仿真相吻合.

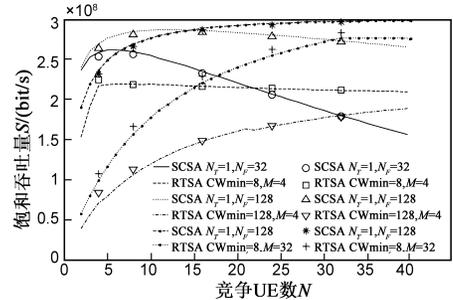


图2 RTSA、SCSA饱和吞吐量理论值(曲线)与仿真结果(符号)的比较

表 2 SCSA 与 RTSA 系统参数值

| 参数 | 值 | 参数 | 值 |
|-------------------|-------------------------------------|-------------------|------------------|
| T_{LIFS} | $50 \mu\text{s}$ | T_{SIFS} | $10 \mu\text{s}$ |
| T_{PHY} | $40 \mu\text{s}$ | T_{RTS} | $44 \mu\text{s}$ |
| T_{DATA} | $120 \mu\text{s}$ | T_{NAS} | $20 \mu\text{s}$ |
| T_{ACK} | $T_{\text{PHY}} + (48N_S + 48)/R_C$ | δ | $20 \mu\text{s}$ |
| T_{TOA} | $T_{\text{PHY}} + (32N_B + 48)/R_C$ | N_F | 108 |
| R_D | 540Mb/s | R_C | 54Mb/s |
| L_{DATA} | 63480bit | | |

利用提出数学模型得到的 SCSA 和 RTSA 系统饱和吞吐量由图 3 给出. 其中, 图 3(a)、3(b)、3(c) 分别反映了 $M=4, 8, 16$ 时, CW_{\min} 和 N 对 RTSA 系统吞吐量的影响. 观察图 3(a)、3(b)、3(c) 中的任意一个可以发现当系统设置某个 CW_{\min} 时, 随着 UE 数增多, 吞吐量首先上升随后略微下降. 出现这种变化的主要原因为: 在 UE 较少时, 过大的 CW_{\min} 导致空闲时隙较多, 因此 UE 的增多使系统吞吐量上升. 当吞吐量达到最大值后若继续增加 UE, 不断加剧的 RTS 冲突又会导致吞吐量下降. 同理, 如图 3(a)、3(b)、3(c) 所示, 当竞争 UE 数确定时, 过小或过大的 CW_{\min} 都会引起系统性能的损失. 比较而言, 在图 3(d) 反映的 SCSA 系统中, 只有 $N_T=1$ 时吞吐量才会随 UE 的增多而下降. 当 $N_T > 1$, SCSA 系统的数据冲突可通过时、频两域的随机化有效解决. 在这种情况下, 即使竞争 UE 数增多, 系统性能也不会明显下降. 相反, 由于更多的用户数据能够在一个接入周期内聚合传输, SCSA 的系统吞吐量逐渐上升.

图 3(a)、3(b)、3(c) 还显示出子信道数 M 对 RTSA 吞吐量有较大影响. 为了便于观察, 我们调整 CW_{\min} 以获得子信道数 $M=4, 8, 16$, 竞争 UE 数为 N 时 RTSA 的最大饱和吞吐量, 并与 $N_T=2, 4, 8$ 的 SCSA 比较. 如图 4

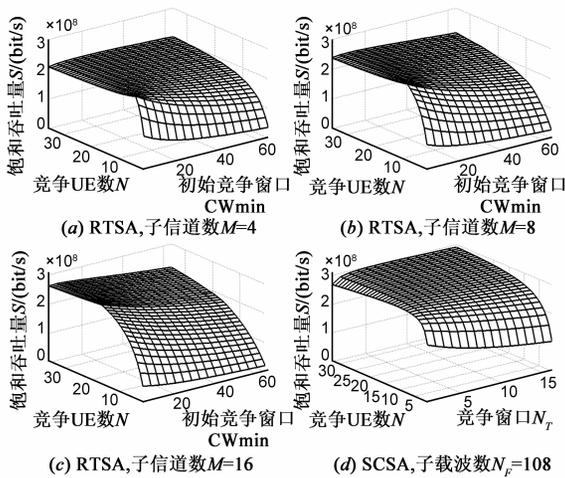


图3 RTSA饱和吞吐量与SCSA饱和吞吐量

所示,一方面,RTSA 在 N 较小时子信道过多的划分导致频谱资源被浪费,RTS 传输时间延长,吞吐量下降;另一方面,随着 N 的增大,较多的子信道又会使冲突概率下降,吞吐量上升.类似地,SCSA 中不恰当的 N_T 设置也会导致吞吐量的下降.但相比子信道数对 RTSA 的影响, N_T 对 SCSA 的影响要小很多.图 4 直观地表明 SCSA 的吞吐性能优于 RTSA.

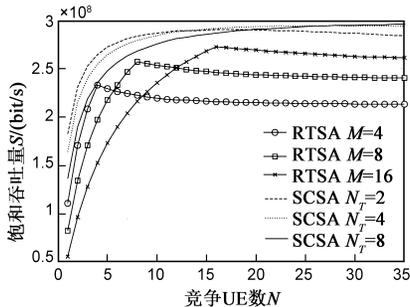


图4 RTSA与SCSA饱和吞吐量比较(CWmin已调整至使吞吐量最大)

5 结论

采用 RTSA,子信道划分和竞争窗口大小对系统吞吐量的影响较大.而本文提出的 SCSA,子载波数越多系统效率越高.SCSA 用子载波侦听来代替 RTS 控制帧从频域上有效地解决了数据冲突问题,从而获得了更高的系统吞吐量.然而,SCSA 也暴露出一些问题,例如信道衰落可能引起子载波侦听结果错误,这些问题的解决将作为我们今后研究的内容.

参考文献

[1] Yong-June Choi, et al. Multichannel random access in OFDMA wireless network[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 603 – 613.
 [2] Hojoong Kwon, et al. Generalized CSMA/CA for OFDMA

systems protocol design, throughput analysis and implement issue [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(8): 4176 – 4187.
 [3] Xudong Wang, et al. A novel random access mechanism for OFDMA wireless network[A]. Proceedings of the 2010 IEEE Global Telecommunications Conference [C]. Piscataway, New Jersey: IEEE, 2010. 1 – 5.
 [4] Green Das, et al. Improved random channel access for OFDMA wireless networks[A]. Proceedings of the 2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference [C]. Piscataway, New Jersey: IEEE, 2011. 315 – 320.
 [5] Fallah Y P, et al. Hybrid OFDMA/CSMA based medium access control for next-generation wireless LANs[A]. Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Communications [C]. Piscataway, New Jersey: IEEE, 2008. 2762 – 2768.
 [6] Alfred Asterjadhi, et al. Analysis of random access protocols for multi channel wireless networks[A]. Proceedings of the 2011 IEEE Global Telecommunications Conference [C]. Piscataway, New Jersey: IEEE, 2011. 1 – 6.
 [7] Giuseppe Bianchi. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3): 535 – 547.
 [8] IEEE 802.11n, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput[S].

作者简介



尹杰晨 男, 1987 年生, 博士研究生, 研究方向主要为无线通信接入协议.
 E-mail: jiechenyin@aliyun.com



毛玉明 男, 1956 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为网络体系结构与协议, 宽带通信网, 无线通信网.
 E-mail: ymmao@uestc.edu.cn



冷鹏(通信作者) 男, 1974 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线自组织网络, 无线传感器网络, 宽带无线接入网络与下一代移动网络.
 E-mail: spleng@uestc.edu.cn