

文章编号: 1004-4353(2014)02-0154-04

非时隙结构认知无线网络中 非授权用户传输时延分析

方泓茜, 刘娇, 朱东弼*

(延边大学工学院 电子信息工程系, 吉林 延吉 133002)

摘要: 在非时隙结构认知无线网络中,以随机侦听多址方案为基础构建了系统的数学模型,利用柯尔莫哥洛夫-费勒前向方程得出系统的稳态概率,并采用拉普拉斯-斯帝尔阶斯变换推导出非授权用户数据包的平均传输时延.数值分析表明,信道忙的概率和平均退避时间与传输时延呈正比关系,不同的载波侦听多址方案对传输时延影响很大,其中全侦听多址方案的传输时延最小.

关键词: 认知无线网络; 随机侦听多址方案; 传输时延; 拉普拉斯-斯帝尔阶斯变换

中图分类号: TN915

文献标识码: A

Packet transmission delay of secondary users in unslored cognitive radio network

FANG Hongqian, LIU Jiao, ZHU Dongbi*

(*Department of Electronic Information and Engineering, College of Engineering,
Yanbian University, Yanji 133002, China*)

Abstract: We construct the mathematical model of CSMA scheme with random-sensing in unslored cognitive radio network, then by the Kolmogorov forward equation we obtained the stationary probability of the system. At last, we estimated the packet transmission delay of secondary users by Laplace-Stieltjes transform. The numerical result shows that packet transmission delay increases as the channel busy probability or back-off time increases. Different CSMA schemes also have influence on packet transmission delay, and it will be shortest when we use CSMA scheme with all-sensing.

Key words: cognitive radio network; random sensing; packet transmission delay of secondary users; Laplace-Stieltjes transform

随着移动通信产业的飞速发展,用户对无线频谱的需求量显著增长,频谱短缺已成为制约无线通信发展的瓶颈之一^[1]. 由于传统的无线网络采用固定频谱分配方式,导致绝大部分已分配频段在时间和空间上的实际利用率很低,因此提高固定频谱的使用率具有重要意义. 研究^[2-3]表明,认知无线网络可允许非授权用户在不影响授权用户正常使用信道的前提下,使用授权用户不使用的频谱,实现频谱共享. 近年来,国内外对认知无线网络中机会频谱接入方案进行了较多的研究,其中大部分采用分布式的媒体接入控制协议,即非授权用户分别独立地执行频谱检测和频谱接入^[4-8]. 这些文献在分析各种载波侦听多址方案的性能时,主要是以非授权用户的吞吐量作为系统的主要性能指标进行了研究,鉴于此,本文以

收稿日期: 2014 - 03 - 27

* 通信作者: 朱东弼(1967—),男,副教授,研究方向为通信网性能分析.

非时隙结构认知无线网络中随机侦听多址方案为基础,把非授权用户的传输时延作为主要研究对象,探讨了系统信道忙的概率和退避时间等系统参数以及不同的载波侦听多址方案对非授权用户的平均传输时延的影响。

1 系统模型

设网络中共有 M 个信道和 N 个非授权用户 ($N > M$). 信道的使用状态为 On/Off 相互交替的模式,即当信道被授权用户占用时称为 On 状态,未被授权用户占用时称为 Off 状态,且假定 On 状态和 Off 状态区间长度分别服从均值为 α^{-1} 和 β^{-1} 的指数分布。

假设非授权用户可以精确地侦听信道,并忽略非授权用户侦听信道所需的时间. 授权用户的优先级高于非授权用户,当非授权用户正在占用信道并且还没发完数据包时若信道进入 On 状态,则非授权用户立即中断传输,以免影响授权用户的数据传输. 假设非授权用户处于饱和状态,即每个非授权用户始终都有数据包发送。

非时隙结构多信道认知无线网络中,随机侦听多址方案的工作方式如下:每一个非授权用户在每次发送数据包之前都要随机选取系统中的一个信道来侦听,当侦听到的信道已经被占用则进入退避状态,该退避时间长度服从均值为 ν^{-1} 的指数分布,退避结束后再重新侦听信道;当侦听到的信道为空闲时,则发送数据包,发送数据包的时间长度服从均值为 μ^{-1} 的指数分布,发送完一个数据包后也进入退避状态,以防止某个非授权用户一直占用信道. 非授权用户正在占用信道时,如果当前信道进入 On 状态,则非授权用户将立即让出信道,然后随机侦听一个信道,若有空闲信道就接着发送当前的数据包;若随机侦听到的信道正处于忙的状态,则丢弃当前数据包,进入退避状态,退避结束后再重新按随机侦听多址方案接入信道。

2 性能分析

令 $N_p(t)$ 为在 t 时刻授权用户所占用的信道数, $N_s(t)$ 为在 t 时刻非授权用户所占用的信道数,则 $\{(N_p(t), N_s(t)) \mid t \geq 0\}$ 构成二维连续时间马尔科夫过程,其状态空间为 $S = \{(i, j) \mid 0 \leq i \leq M, 0 \leq j \leq M-i\}$. 由于该马尔科夫过程是有限状态的不可约马尔科夫过程,具有遍历性,因此存在系统的稳态概率 $\pi_{i,j}$ ($0 \leq i \leq M, 0 \leq j \leq M-i$). 根据连续时间马尔科夫过程的柯尔莫哥洛夫-费勒前向方程,可得如下状态平衡方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi_{0,0} (N\nu + M\beta) = \pi_{0,1}\mu + \pi_{1,0}\alpha, \quad i=0, j=0; \\ \pi_{0,1} \left((N-1)\nu \left(1 - \frac{1}{M}\right) + M\beta + \mu \right) = \pi_{0,2}2\mu + \pi_{1,1}\alpha + \pi_{0,0}N\nu, \quad i=0, j=1; \\ \pi_{i,j} [i\alpha + (M-i)\mu + (M-i)\beta] = \pi_{i-1,j} \left[(M-i+1)\beta - j\beta \frac{i+j-1}{M} \right] + \\ \quad \pi_{i-1,j+1} (M-i+1)\beta + \pi_{i,j-1} (N-j+1)\nu \left(1 - \frac{i+j-1}{M}\right), \quad i > 0, j > 0, i+j=M; \quad (1) \\ \pi_{i,j} \left[(M-i)\beta - j\beta \frac{i+j}{M} + (N-j)\nu \left(1 - \frac{i+j}{M}\right) + i\alpha + j\beta \frac{i+j}{M} + j\mu \right] = \\ \quad \pi_{i+1,j} (i+1)\alpha + \pi_{i,j+1} (j+1)\mu + \pi_{i-1,j} \left[(M-i+1)\beta - j\beta \frac{i+j-1}{M} \right] + \\ \quad \pi_{i,j-1} (N-j+1)\nu \left(1 - \frac{i+j-1}{M}\right), \quad i > 0, j > 0, i+j < M. \end{array} \right.$$

由概率的基本性质可知 $\sum_{i,j} \pi_{i,j} = 1$, 通过解线性方程组(1) 即可求出稳态概率 $\pi_{i,j}$.

为了求出非授权用户的传输时延,首先要求出非授权用户的受迫中断概率.非授权用户受迫中断概率是指一个非授权用户正在发送数据包时,所在信道进入 On 状态,使得非授权用户的传输被中断,且重新选取一个信道进行侦听,但该信道还处于忙的状态,从而使非授权用户的数据包被丢弃的概率.设

λ_e 为非授权用户数据包的平均到达率,则有 $\lambda_e = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^{M-i} (N-j) \nu \pi_{i,j}$. 令 $\tilde{\pi}_{i,j}$ 表示非授权用户在退避回来后随机侦听信道时发现信道处于状态 (i,j) 的概率,即非授权用户退避回来后侦听信道时发现系统中有 i 个授权用户和 j 个非授权用户正在传输分组的概率,则有 $\tilde{\pi}_{i,j} = \frac{(N-j) \nu \pi_{i,j}}{\lambda_e}$. 令 P_b 表示非授权用户退避回来后随机侦听的信道不是空闲的概率, P_f 表示正在接受服务的非授权用户让出信道后随机侦听到系统中信道忙的概率,则有 $P_b = \sum_{\{(i,j) \mid m \leq i+j \leq M\}} \frac{i+j}{M} \tilde{\pi}_{i,j}$, $P_f = \sum_{\{(i,j) \mid i \geq 1, i+j=M\}} \frac{i+j}{M} \tilde{\pi}_{i,j} / \sum_{\{(i,j) \mid i \geq 1, i+j \leq M\}} \tilde{\pi}_{i,j}$.

令 P_F 表示非授权用户受迫中断概率,则有 $P_F = \frac{\beta P_f}{\mu + \beta P_f}$.

假设非授权用户在第 n 次侦听信道时发现有空闲信道,且成功地发送了数据包,则此时非授权用户的传输时延 $D = V_0 + V_1 + V_2 + \cdots + V_{n-1} + T$, 其中 V_i 表示非授权用户的退避时间, T 表示非授权用户传送数据包所需的时间,且随机变量 T 的拉普拉斯变换为 $F_T^*(s) = \int_0^\infty e^{-st} dF_T(t)$. 假设 Z_n 为非授权用户第 n 次侦听后成功发送数据的事件,即前 $n-1$ 次被系统所阻挡,第 n 次没有被阻挡也没有被授权用户强制中断的事件,则该事件发生的概率 $P\{Z_n\}$ 为

$$P\{Z_n\} = P_b^{n-1} (1 - P_b) (1 - P_F). \quad (2)$$

$D^*(s)$ 是传输时延 D 的拉普拉斯-斯帝尔阶斯变换,则有 $D^*(s) = E[e^{-sD}] = \sum_{n=1}^\infty E[e^{-sD} | Z_n] P(Z_n) = \frac{(1 - P_b) (1 - P_F) \nu}{s + (1 - P_b) \nu} \frac{\mu}{s + \mu}$. 非授权用户的平均传输时延 $E[D]$ 为

$$E[D] = -[D^*(s)]' \big|_{s=0} = \frac{[(1 - P_b) \nu + \mu] (1 - P_F)}{(1 - P_b) \nu \mu}. \quad (3)$$

3 性能比较

为考察系统参数(信道忙的概率和平均退避时间)和不同的载波侦听多址方案对非授权用户传输时延的影响,假设系统中有 12 个信道,即 $M=12$,且非授权用户数据包传送时间服从均值为 μ^{-1} 的指数分布,平均服务时间为 $\mu^{-1} = 0.005$ s.

图 1 显示了信道忙的概率逐渐增大时传输时延的变化过程,其中非授权用户数取了 3 种不同的值 ($N=20, 30, 40$), $\beta^{-1} = 0.65$ s. 由图 1 可知:① 当信道忙的概率逐渐增大时,非授权用户的传输时延也增大. 这是因为授权用户占用信道的时间越多,非授权用户能接入信道的机会就减少,相应地非授权用户传输时延也增加. ② 当非授权用户数增加时,非授权用户的传输时延也增大. 这是因为非授权用户数越多,成功接入信道的机会就减少,传输时延也会随之增加,即传输时延与非授权用户的数量呈正比.

图 2 显示了当非授权用户的平均退避时间减少时传输时延的变化过程,其中非授权用户数取了 3 个不同的值 ($N=20, 30, 40$). 信道的 On 状态和 Off 状态的平均长度各设为 $\alpha^{-1} = 0.35$ s, $\beta^{-1} = 0.65$ s. 由图 2 可知,当非授权用户的退避比率增大时,也就是当平均退避时间变短时,非授权用户成功发送数据包的传输时延变短. 这是因为非授权用户的退避时间变短使成功接入信道的机会增加,所以传输时延会随之变短. 图中还可以看出,在退避时间比率固定时,非授权用户数量的增加使接入信道的竞争率变大,导致能成功接入信道的概率减小,传输时延变长. 传输时延与退避时间比率 ν 呈反比.

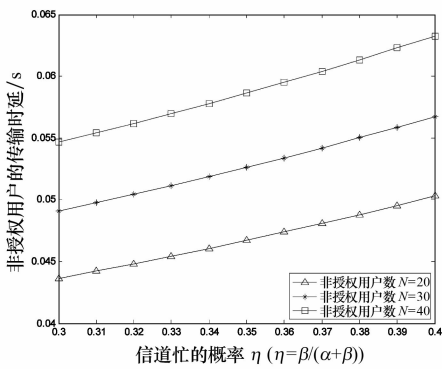


图 1 信道忙的概率与传输时延的关系

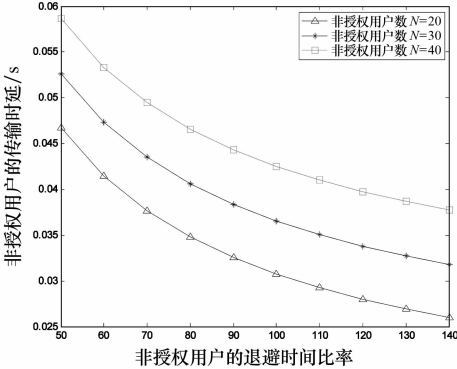


图 2 退避时间比率与传输时延的关系

图 3 显示了采用随机侦听、随机 m -侦听和全侦听 3 种方案时非授权用户传输时延的变化过程。从图 3 可以看出：非授权用户的数量越多，传输数据包时产生的传输时延就越大。这是因为系统中非授权用户的数量越多，对空闲信道的争夺越激烈，则非授权用户接入信道的可能性就越少，所以产生的传输时延会越大。当非授权用户数固定时，全侦听多址方案的传输时延最小，随机侦听多址方案的传输时延最大。这是因为采用全侦听方案时，非授权用户找出空闲信道的概率最大，而采用随机侦听多址方案时，找到空闲信道的概率最小，所以相应地全侦听多址方案的传输时延最小。

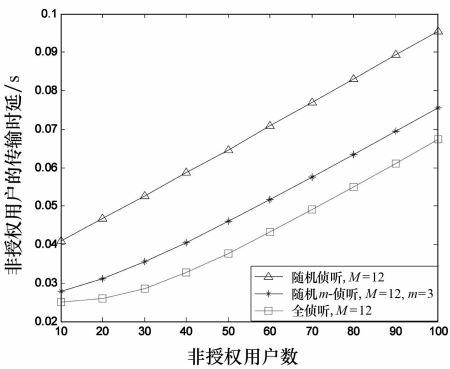


图 3 非授权用户数与传输时延的关系

4 结束语

在非时隙结构认知无线网络中，本文以随机侦听多址方案为基础构建了系统的数学模型，通过柯尔莫哥洛夫-费勒前向方程得出系统的稳态概率，并采用拉普拉斯-斯帝尔阶变换推导出非授权用户的传输时延的表达式。在非授权用户处于饱和状态条件下，本文通过系统的稳态概率，得出了非授权用户数据包的平均传输时延，这对提高认知无线网络的性能具有重要意义。各种载波侦听多址方案在非授权用户处于非饱和状态条件下的性能今后需进一步研究。

参考文献：

[1] 罗丽平,秦家银. 认知无线电研究进展及应用前景[J]. 科技导报, 2012, 30(3): 74-78.

[2] 王金龙,吴启辉,龚玉晖,等. 认知无线网络[M]. 北京:机械工业出版社, 2010: 22-25.

[3] 刘红杰,李书芳. 认知无线网络中频谱池接入策略性能分析[J]. 北京邮电大学学报, 2009, 32(1): 1-4.

[4] Huang S, Liu X, Zhi D. Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks[C]//INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE, 2008, 4: 1427-1435.

[5] 朱东弼,朱丹丹. 频谱感知时间对认知无线网络性能之影响[J]. 通信学报, 2011, 32(11A): 169-173.

[6] Zhu D B, Park J S, Choi B D. Performance Analysis of an Unslotted CSMA in the Multi-Channel Cognitive Radio Networks[A]//5th International Conferences on Queuing Theory and its Applications, QTNA 2010. Beijing: Beijing Jiaotong University Publications, 2010: 30.

[7] Zhu Dongbi, Wang Huimin. Performance Analysis of Unslotted CSMA with Hybrid Sensing in Multi-Channel Cognitive Radio Network[A]. Lu Q. Advances in Mechatronics, Automation and Applied Information Technologies [C]. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2013: 624-628.

[8] Zhu Dongbi, Choi BongDae. Performance analysis of CSMA in an unslotted cognitive radio network with licensed channels and unlicensed channels[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, 12: 12-14.