

Performance Analysis of Cognitive Radio System Based on Proportional Fair Scheduling Algorithm

Pan Cui¹, Suoping Li²

¹School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu

²School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu

Email: 1451524100@qq.com, lsuop@163.com

Received: Apr. 1st, 2018; accepted: Apr. 16th, 2018; published: Apr. 23rd, 2018

Abstract

In order to further improve the utilization of spectrum resources and solve the problem of unscheduled users under the proportional fairness algorithm in the downlink transmission process of LTE systems, this paper proposes to integrate cognitive technologies into the proportional fair scheduling algorithm. Therefore, these unscheduled users have the ability to discover "spectral voids" and make reasonable use of them, thereby effectively utilizing spectrum resources and improving system throughput. Second, because the secondary user (SU) must not only have the cognitive ability but also the reconstruction character, that is how the secondary user should respond when the primary user (PU) occupies the spectrum, continuing to wait or finding a new carrier. In response to this problem, this paper discusses the delay in two cases and gives the decision basis.

Keywords

Cognitive Radio, Proportional Fairness Algorithm, Delay, Throughput

基于比例公平调度算法的认知无线电系统性能分析

崔盼¹, 黎锁平²

¹兰州理工大学计算机与通信学院, 甘肃 兰州

²兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州

Email: 1451524100@qq.com, lsuop@163.com

收稿日期: 2018年4月1日; 录用日期: 2018年4月16日; 发布日期: 2018年4月23日

摘要

本文为进一步提高频谱资源的利用率, 解决LTE系统中下行传输过程中比例公平算法下未被调度的用户问题, 提出将认知技术融入比例公平调度算法中, 因此, 这些未被调度的用户就具有发现“频谱空洞”并合理利用的能力, 从而有效的利用频谱资源, 同时提高系统的吞吐量。其次, 由于认知用户(secondary user, SU)不仅要具有认知能力还要具有可重构性这一特性, 即当主用户(primary user, PU)占用频谱时认知用户该做出怎样的反应, 继续等待还是寻找新的子载波, 针对这一问题, 本文讨论了两种情况下的时延并给出判决依据。

关键词

认知无线电, 比例公平算法, 时延, 吞吐量

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前通信业务的需求快速增长, 频谱资源匮乏, 然而, 有些频带大部分时间是没有用户使用的, 一些频带也只是偶尔会被使用, 而剩余频带的使用则存在激烈的竞争。因此, 如何能够在不同时空充分的利用空闲频带, 提高利用率, 成为人们非常关注的问题。认知无线电的提出为提高频谱利用率提供了新的方法。它的核心思想就是感知“频谱空洞”(已经分配给某用户而其在某一时间段却未使用的频谱资源)并且合理的利用。过去对认知无线电的研究主要局限在认知无线电本身。研究它的传输协议[1], 研究该系统下主用户和认知用户的吞吐量问题[2] [3]。目前的研究主要集中在如何使认知用户和主用户采用协作的方式进行数据传输。比如文献[4]提出将认知无线网络中的主用户和认知用户采取合作的方式, 也就是说认知用户作为主用户的中继进行数据传输, 来达到网络效率的最大化。随着对认知无线越来越深入的研究, 近几年人们逐渐开始将认知技术应用到其它网络中, 文献[5]就将认知技术应用到传感器网络中, 研究系统的拥塞问题, 从而达到提高服务质量和实时性的可靠应用的目的。此外, 有效的资源分配方法也是解决频谱资源匮乏的一种有效途径。文献[6]研究了比例公平调度算法, 它是兼顾系统性能和用户公平性的一种有效的资源分配方法。这种算法虽然是一种有效的折中算法, 但也存在一定的不足, 即未考虑未被调度的用户。另外, 当一级用户到来时认知用户必须撤出, 撤出以后认知用户该如何选择即如何重构问题也是必须考虑的一个问题。文献[7]仅给出了信道可用时间大于认知用户的传输时间时信道的分配方法, 却未考虑信道可用时间小于认知用户的传输时间时的信道分配问题, 这样就造成了一定的资源浪费。

本文在解决未被调度用户的问题上, 提出将认知技术融入比例公平调度算法。这样未被调度的用户即可感知“频谱空洞”, 利用主用户未使用的空闲频谱进行数据传输。来实现最大的资源利用效率。此外, 本文还考虑了信道可用时间小于认知用户传输时间的问题, 提出一种新的判决方法, 解决认知用户该如何重构的问题。这种判决方法能有效减小系统时延, 提高系统的效率。

2. 比例公平调度算法

比例公平调度算法是提供公平和整个系统吞吐量之间的一种折中算法, 当用户需要传输信息时, 就

会向基站发送一个请求数据速率,然后基站就跟踪用户在窗口大小长度为 t_c 的每一个资源块 n 的移动平均吞吐量,在时隙 t ,比例公平调度就会给在第 t 个时隙和第 n 个资源块中满足下面式子的用户一个最大优先权[6]:

$$M^* = \arg \max_{n=1,2,\dots,N} \frac{R_{m,n}(t)}{T_{m,n}(t)} \quad (1)$$

其中 $R_{m,n}(t), n=1,2,\dots,N$,是在第 t 个传输时间间隔第 m 个用户在第 n 个资源块的瞬时速率。 $T_{m,n}(t)$ 是用户 m 在每个资源块 n 在 t 时隙的窗口长度为 t_c 的移动平均吞吐量。

第 m 个用户在第 n 个子载波的瞬时速率可以通过以下式子得到:

$$R_{m,n}(t) = B/N \log_2(1 + SNR) \quad (2)$$

这里 $R_{m,n}(t)$ 是第 m 个用户在第 t 个时隙的传输速率, B 是总带宽 N 是子载波的个数。 SNR 为信噪比其表达式如下:

$$SNR_{m,n}(t) = \frac{S_{m,n}(t)H_{m,n}(t)}{N_0B/N} \quad (3)$$

这里 $S_{m,n}(t), H_{m,n}(t)$ 分别是第 t 个传输时间间隔的传输功率和信道增益, N_0 是加性高斯白噪声的功率谱密度, B 是总带宽, N 是子载波的个数。

平均吞吐量可以用指数加权的低通滤波器更新:

$$T_{m,n}(t+1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)T_{m,n}(t) + \frac{1}{t_c}R_{m,n}(t) & \text{用户在 } t \text{ 时刻被调度} \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)T_{m,n}(t) & \text{用户在 } t \text{ 时刻未被调度} \end{cases} \quad (4)$$

这里 t_c 是窗口大小长度。

3. 加入认知无线电技术的新比例公平调度算法

与以往的比例公平算法所不同的是,此算法主要针对比例公平调度算法中未被调度的用户。新算法的步骤如下:

- 1) 根据请求的数据速率 $R_{m,n}(t)$ 得到信道质量信息
- 2) 在每个资源块中找到 $R_{m,n}(t)/T_{m,n}(t)$ 的最大值和它的相应用户
- 3) 调度这个用户
- 4) 直到下一个用户在此资源块中满足 2)此用户将没有权限被调度
- 5) 在这些资源块中调度那些用户
- 6) 认知用户感知频谱空洞
- 7) 将感知到的自由子载波分配给认知用户
- 8) 重复这个循环

本文假设认知用户感知到的自由子载波都是正确的,即不存在漏检错检的情况。则 t 时刻认知用户 r 在

子载波 k 的吞吐量为:

$$C_{r,k}(t) = \Delta f \log_2(1 + SNR_{r,k}(t)) \quad (5)$$

其中 Δf 为认知用户接入的自由子载波的带宽, $SNR_{r,k}(t)$ 为 t 时刻认知用户 r 在子载波 k 上的信噪比。结合公式(5)最终认知用户在 t 时刻的总的吞吐量可以表示为:

$$T_r(t) = \sum_r \sum_k \theta_{r,k} C_{r,k}(t) \tag{6}$$

用 $\theta_{r,k} = 1$ 表示子载波 k 被认知用户 r 占用, $\theta_{r,k} = 0$ 表示子载波 k 未被认知用户 r 占用, 同理, 用 $\theta_{m,n} = 1$ 表示第 n 个资源块被用户 m 占用, $\theta_{m,n} = 0$ 表示第 n 个资源块未被用户 m 占用。结合公式(1)~(5)加入认知技术后 $t+1$ 时刻系统的吞吐量表示为:

$$T(t+1) = \sum_m \sum_n \theta_{m,n} \left[\left(1 - \frac{1}{t_c} \right) T_{m,n}(t) + \frac{1}{t_c} R_{m,n}(t) \right] + \sum_r \sum_k \theta_{r,k} C_{r,k}(t+1) \tag{7}$$

根据文献[6], 未加入认知技术则 $t+1$ 时刻系统的吞吐量表示为:

$$T(t+1) = \sum_m \sum_n \theta_{m,n} \left[\left(1 - \frac{1}{t_c} \right) T_{m,n}(t) + \frac{1}{t_c} R_{m,n}(t) \right] \tag{8}$$

这里 $\theta_{r,k}, \theta_{m,n}$ 取值为 0 或 1, 由公式(7)和(8)的对比可以看出只要有认知用户成功接入自由子载波, 该算法下的系统吞吐量就会有所提高。

4. 对认知用户的管理

在新算法的基础上实现对认知用户的管理, 所说的对认知用户的管理也就是当认知用户从一级用户的子载波上撤出之后是快速寻找新的可用频谱还是继续等待, 等待着该频谱再一次变成空闲状态继续进行数据传输。具体过程如下图所示。

图 1(a)中表达的意思为, 当 SU 传输过程中 PU 到达, SU 用户立即撤出, 等待 PU 传输完数据之后, 继续在原子载波上传输剩余的数据。图 1(b)中表达的意思为, 当 PU 占用该子载波时, SU 立即撤出, 寻找新的子载波, 然后在新的子载波上重新传输所有的数据。假设 PU 和 SU 用户的一个数据包大小分别为 L_{PU} 、 L_{SU} , 传输速率分别为 C_{PU} 、 C_{SU} 。则在图 1(a)的情况下, SU 用户成功传输一个数据包所需的时间(忽略切换时间)为 $T_s = k_p L_{PU} / C_{PU} + L_{SU} / C_{SU}$, 这里 k_p 表示主用户到达的次数。假设 SU 在 $(0, L_{SU} / C_{SU})$ 传输过

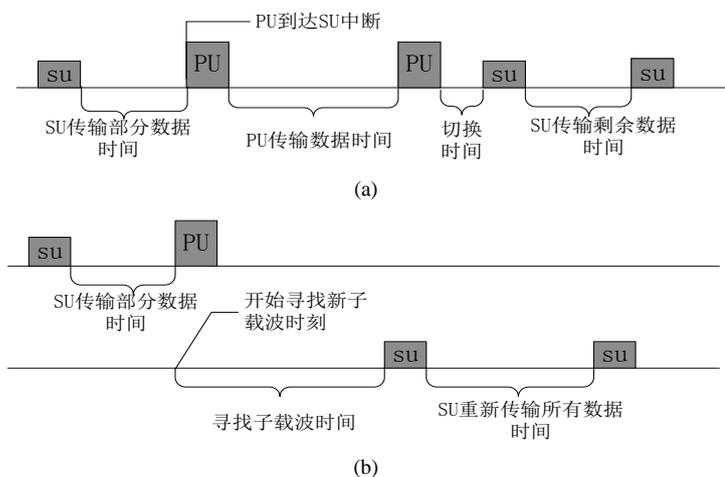


Figure 1. Data transmission diagram
图 1. SU 数据传输示意图

程中, PU 在 $(0, L_{SU}/C_{SU})$ 时间段上任意时刻到达服从均匀分布, 则在图 3(b) 情况下, 在 CSMA/CA 机制中, 当一个认知节点有数据包要发送时, 它会在 $[0, BT_{\min}]$ 范围选择一个随机双退避时间 BT , 这里 BT_{\min} 为最小退避时间, 当退避尝试第 i 次时, 会从具有连续均匀分布的 $[0, 2^i BT_{\min}]$ 范围选择一个随机退避时间, 退避时间表示为 $D_{OP} = \sum_{i=0}^{k-1} P_b^i BT_i$, 这里 BT_i 是一个随机变量, 并且 $BT_i \sim U(0, 2^i BT_{\min})$, P_b 是在载波感知中感知信道忙的概率即退避概率, K 为最大退避次数。则 SU 用户成功传输一个数据包所需的时间表示为 $T_C = L_{SU}/2C_{SU} + D_{OP} + L_{SU}/C_{SU}$ 。

5. 数值分析

在这一部分将分别展示, 加入认知技术前后系统吞吐量的变化和不同 k_p 下 T_S 的值, 不同退避概率下 SU 用户传输一个数据包所用时间 T_C 与退避次数 k 之间的关系, 比较 T_S 与 T_C 的大小关系, 从而给出当认知用户面临重构问题时的判决依据。在以下分析中取 $L_{PU} = 60$ bytes, $C_{PU} = 60$ kbps, $L_{SU} = 30$ bytes, $C_{SU} = 30$ kbps, $B = 5$ MHz, $N = 300$, $\Delta f = 2.5 \times 10^3$ Hz。

图 2 描述了未加入认知技术不同一级用户数 m 下吞吐量 T 与 $SNR_{m,n}$ 的关系, 从图中可以看出随着用户数的增加系统吞吐量增大, 当用户数一定时, 信噪比 $SNR_{m,n}$ 越大系统的吞吐量也越大, 说明信道质量越好系统的性能就越好。

图 3 描述了在加入认知技术之后系统吞吐量的变化, 从图中可以看出在一级用户 m 一定的情况下, 加入认知技术使未被调度的用户成为认知用户, 感知“频谱空洞”利用其进行数据传输, 显然, 随着认知用户数目的增加系统的吞吐量也有所增加。

从图 2 中可以看出未加入认知技术的情况下, 在主用户数为 5 个的时候系统的吞吐量为 0.3 左右, 在图 3 中加入认知技术后同样在主用户为 5 个的时候, 当有一个认知用户成功接入自由子载波时, 系统的吞吐量为 0.4 左右。从图 2 与图 3 的对比中也可以看出在主用户数一定的情况下, 当认知用户成功接入子载波的数目越多系统的吞吐量就越大, 因此, 说明只要有认知用户成功的接入子载波在加入认知技术之后的新算法下系统吞吐量就会有所提高。

图 4 中展示了不同 P_b 下退避次数 k 与 T_C 的关系, 同时也展示了当 k_p 分别为 1 和 2 时 T_S 的大小, 从

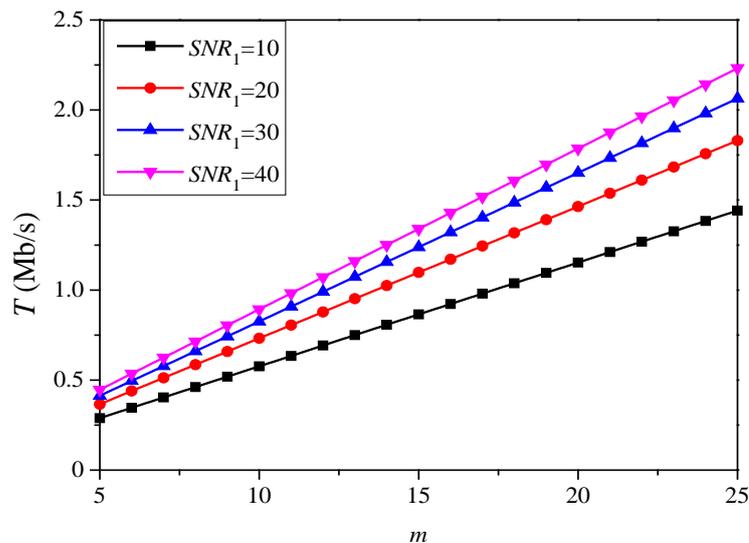


Figure 2. Relationship between throughput T and number of users m under different $SNR_{m,n}$

图 2. 不同 $SNR_{m,n}$ 下吞吐量 T 与用户数 m 的关系曲线

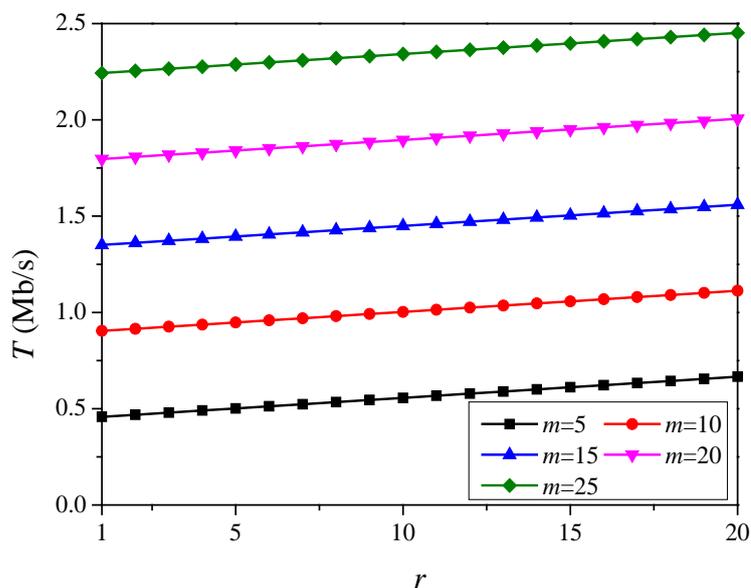


Figure 3. The relationship between system throughput T and r under different m

图 3. 不同 m 下系统吞吐量 T 与 r 的关系曲线 ($SNR_{m,n} = 40, SNR_{r,k} = 20$)

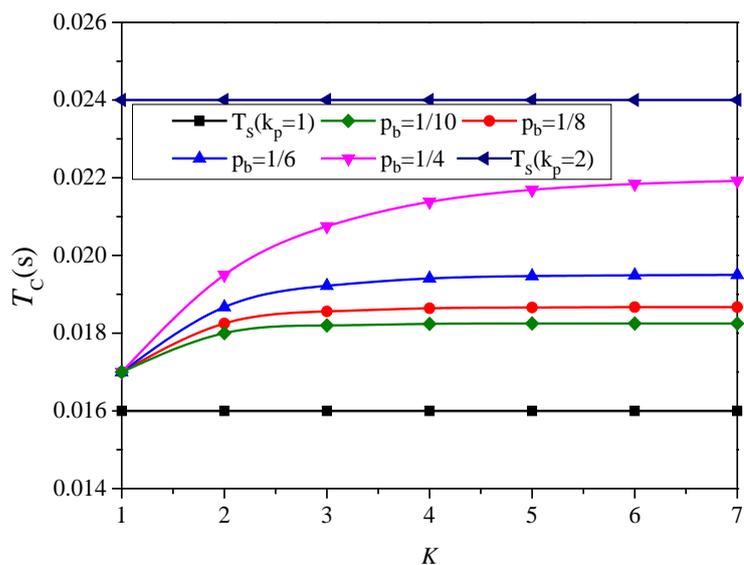


Figure 4. The relationship between back-off times k and T_C under different P_b

图 4. 不同 P_b 下退避次数 k 与 T_C 的关系曲线

图中可以看出 T_C 随退避次数 k 的增加而增加,说明退避次数越多等待的时间越长。当退避次数 k 一定时,退避概率越大 T_C 就越大。还可看出,当 $k_p = 1$ 时, T_s 的值始终在 T_C 之下,说明当认知用户在进行数据传输时,在主用户到达一次的情况下,认知用户只需等待该子载波变为空闲进行数据传输就可以获得较小的时延,无需重新寻找新的子载波。当 $k_p = 2$ 时,可以看出 T_s 的值始终在 T_C 之上,说明当认知用户进行数据传输时如果主用户两次到达则认知用户需重新寻找新的子载波进行数据传输,以减小系统时延。在实际中可以监测主用户到达的频率,为认知用户的两种重构方案提供一定的参考。

6. 结束语

本文为了进一步提高系统的吞吐量, 提出将认知无线电技术融入比例公平调度算法中, 得出新算法下系统吞吐量的表达式, 这样既保证了用户的公平性, 又使系统的吞吐量得以提高, 这一点在数值分析中也得以验证。同时, 又考虑了对认知用户的管理问题即认知用户如何重构的问题, 在文章中给出了两种重构方案, 并计算两种方案下的时延。最后, 通过数值分析得出结论, 在认知用户进行数据传输时, 如果主用户只到达一次, 那么, 为减小系统时延, 认知用户只需等待主用户传输完数据, 即等待该子载波再次空闲时进行数据传输即可, 否则, 则需重新寻找新的子载波进行数据传输。

资助信息

国家自然科学基金项目资助(61663024)。

参考文献

- [1] Issariyakul, T., Pillutla, L.S. and Krishnamurthy, V. (2009) Tuning Radio Resource in an Overlay Cognitive Radio Network for TCP: Greed Isn't Good. *IEEE Communications Magazine*, **47**, 57-63. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.5183473>
- [2] Srinivasa, S. and Jafar, S.A. (2006) The Throughput Potential of Cognitive Radio: A Theoretical Perspective. *IEEE Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, 29 October-1 November 2006, 221-225.
- [3] Shalaby, M., Shokair, M. and Abdo, Y.S.E. (2014) Enhancement of Geometry and Throughput in LTE Femtocells Cognitive Radio Networks. *Wireless Personal Communications*, **77**, 649-659. <https://doi.org/10.1007/s11277-013-1527-8>
- [4] Costa, M. and Ephremides, A. (2016) Energy Efficiency versus Performance in Cognitive Wireless Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **34**, 1336-1347. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2520219>
- [5] Esmaelzadeh, V., Hosseini, E.S., Berangi, R., et al. (2016) Modeling of Rate-Based Congestion Control Schemes in Cognitive Radio Sensor Networks. *Ad Hoc Networks*, **36**, 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2015.06.009>
- [6] Nsiri, B., Mallouki, N., Mhatli, S., et al. (2015) Modeling and Performance Evaluation of Novel Scheduling Algorithm for Downlink LTE Cellular Network. *Wireless Personal Communications*, **83**, 2303-2316. <https://doi.org/10.1007/s11277-015-2522-z>
- [7] Zhong, X., Qin, Y. and Li, L. (2014) Capacity Analysis in Multi-Radio Multi-Channel Cognitive Radio Networks: A Small World Perspective. *Wireless Personal Communications*, **79**, 2209-2225. <https://doi.org/10.1007/s11277-014-1981-y>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8801, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: csa@hanspub.org