

认知无线电中基于频谱聚合的全局比例公平调度算法*

殷聪[†] 谭学治 马琳 于洋

(哈尔滨工业大学, 通信技术研究所, 哈尔滨 150080)

(2013年10月31日收到; 2014年2月26日收到修改稿)

针对认知无线电系统中认知用户在利用频谱聚合技术时出现的调度不公平问题, 提出了一种基于频谱聚合的全局比例公平调度算法. 在比例公平调度的基础上, 结合频谱聚合技术的特点, 引入了频谱聚合的跨度与认知用户剩余数据队列长度这两个参量, 使认知用户在聚合可用频谱的范围内, 最大限度的保证吞吐量公平性. 仿真结果表明, 相比于局部比例公平调度算法和最大载干比调度算法, 该算法在公平性指数和系统服务时间上更占优势, 同时具有较低的吞吐量抖动, 从而有效地提高系统容量和系统效率, 确保认知用户之间对系统资源的公平利用.

关键词: 认知无线电, 频谱聚合, 比例公平调度算法, 吞吐量公平

PACS: 84.40.Ua

DOI: 10.7498/aps.63.118402

1 引言

当今的无线通信技术发展越来越趋于多元化、智能化、高速化. WLAN网络, 3G网络以及即将商用的4G网络都充分考虑了用户的各种需求. 用于娱乐功能的网络流媒体或用于商业活动的视频会议, 这样的大带宽业务逐渐走入人们的日常工作和生活中^[1,2]. 然而根据美国联邦通信委员会提供的数据显示, 连续可用的大带宽频谱资源即将分配殆尽^[3-5]. 在认知无线电技术提出之后, 于2006年由英国的QinetiQ公司提出了频谱聚合技术用以解决不连续频谱如何有效利用的问题^[6-8]. 这项技术目前已经应用在LTE-A中, 目的是为了支持用户对大带宽业务或高数据速率业务类型的需求. 在认知无线电系统中, 认知用户在不干扰主用户的前提下如何有效并充分聚合可用的空闲资源是至关重要的^[9-14]. 进而在认知用户之间如何公平的调度这些可聚合的空闲资源是一个关键问题^[15-17].

经典的公平性调度算法主要包括: 最大载

干比调度算法(max C/I)、轮循调度算法(round robin, RR)、比例公平调度算法(proportional fairness, PF). 其中比例公平算法已经被证明在保证用户之间公平性的同时可以提供高效的频谱资源利用率. 在现有的文献中, 基于比例公平算法的研究比较深入. 其中文献^[18]提出了一种认知无线网络中基于时间机理的比例公平调度算法, 该算法允许认知用户利用一种时间体制接入授权使用用户的资源, 从而达到合理利用资源的目的. 但文献中没有给出这种模型下认知用户有关于吞吐量的参数, 不利于了解该框架下认知用户的数据速率. 文献^[19]提供了一种多基站下的全网比例公平算法, 该算法使多用户在全网范围内合理公平利用资源, 以达到吞吐量最大的目的. 然而算法没有给出用户接受服务的系统时间. 文献^[20]将比例公平算法与OFDM资源块相结合, 给出了OFDM场景下合理调度资源块的新方法. 有在OFDM前提下考虑了系统服务质量的公平比例算法, 其算法更具优势^[21]. 还有将分层调制和编码调制引入比例公平

* 国家自然科学基金(批准号: 61071104)和国家科技重大专项(批准号: 2011ZX03004-004)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: 11B305006@hit.edu.cn

算法中,用以提高系统吞吐量^[22].文献[23]利用单载波分组的方式提升LTE系统的数据速率.文献[24]提出了认知无线电系统中基于下垫式的比例公平算法,从而使认知用户能够在有限的频谱资源中获得较高的吞吐量.文献[25]通过控制延时来实现对数据队列的调整,得到所期望的数据队列长度,从而达到对下一时刻该用户数据速率增大或减小的反馈调整的目的.然而这种场景下用户所能达到的吞吐量难以支持高数据速率的业务.但文献[18—24]只注重了利用各种方式提高吞吐量这个参数,却忽略了服务时间的问题.因此进一步研究在有限系统资源的情况下,如何提高用户的吞吐量并缩短系统服务时间是很有必要的.

本文基于频谱聚合技术,建立一种全局的比例公平算法(global proportional fairness based on spectrum aggregation, SAGPF),使认知用户在有限系统资源的条件下,既能够拥有支持较大带宽或高速率传输的能力,又能缩短占用系统服务时间,从而提高系统效率.首先,介绍了频谱聚合技术的特点,建立了频谱聚合资源调度系统模型;其次,提出了认知无线电系统下的全局比例公平调度算法,给出了算法的步骤;然后,分析了模型中被调度资源的特点,给出了被调度资源的相关概率分布,明确阐述了系统服务时间的组成,以及频谱聚合技术对系统服务时间的影响;最后,通过吞吐量抖动特性和吞吐量公平性指数来衡量系统性能.通过分析仿真结果,表明基于频谱聚合的全局比例公平调度算法,使认知用户具有较高的吞吐量及良好的公平性的同时,尽可能的缩短系统服务时间,提高系统效率.

2 基于频谱聚合的全局比例公平调度研究

2.1 基于频谱聚合的资源调度系统模型

频谱聚合技术的优势在于可以将多个不连续的频段或资源块聚合在一起为一个用户提供业务支持.在认知无线电系统中,认知用户需要在不干扰主用户的前提下进行数据传输,即主用户在占用系统中某些资源时,认知用户则需避让,使用其他空闲资源.认知用户的这种特点与频谱聚合技术的特点不谋而合,所以本文将两者相结合,在频谱聚合技术的基础上建立了一种资源调度系统模型,

如图1所示,这里系统模型物理层采用了OFDM技术.

在频谱方向上,一个跨度内没有被主用户占用的资源块都可以分配给一个认知用户.跨度是指认知用户要受到硬件设备的条件限制,不可能将所有空闲频段都聚合使用,只有在跨度的范围内,认知用户才能聚合空闲频段并使用.在时间方向上存在一个时间窗口 T ,用来统计 T 时间段内认知用户的平均吞吐量.在所建立的系统模型中,每个认知用户在位置固定的跨度内按时隙搜索空闲资源块,并将跨度内的空闲资源块聚合使用,以满足提高自身吞吐量的目的.

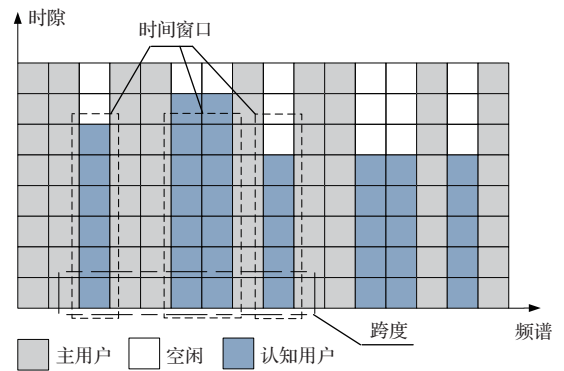


图1 基于频谱聚合的资源调度系统模型

2.2 全局比例公平调度算法及步骤

比例公平调度(PF)能够达到系统吞吐量和用户公平性的折中,在近年来引起了学术界的广泛关注^[19—24].本文提出的全局比例公平调度算法融合了频谱聚合技术,在认知无线电环境下保证认知用户之间的公平性,同时实现认知用户拥有较高的吞吐量.基于频谱聚合的全局比例公平调度算法(SAGPF)如下所示:

$$\hat{i} = \arg \max_i \frac{r_i(t, u)}{R_i(t, u)} \cdot L_i(t),$$

$$L_i(t) \leq l_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

\hat{i} 为 t 时刻系统所要调度的认知用户; $r_i(t, u)$ 为认知用户 i 在 t 时刻跨度 u 内聚合信道后的瞬时速率; $R_i(t, u)$ 为认知用户 i 在 t 时刻以前的平均传输速率; $L_i(t)$ 为认知用户 i 的等待队列长度,每个认知用户的总队列长度为 l_i .

$$r_i(t, u) = \sum_{m=1}^M x_{m,i}^u(t) \cdot r_{m,i}^u(t),$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } \sum_{m=1}^M x_{m,i}^u(t) &= k_u(t), \\ x_{m,i}^u(t) &= \begin{cases} 0, & \text{PU,} \\ 1, & \text{SU,} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $k_u(t)$ 是 t 时刻跨度 u 内空闲信道个数. $r_{m,i}^u(t)$ 为用户 i 在跨度 u 内第 m 个资源块上的速率. 如果第 m 个资源块有主用户占用, 则 $x_{m,i}^u(t)$ 为 0, 表示认知用户不能占用此资源; 若 $x_{m,i}^u(t)$ 为 1, 则代表此资源块是空闲的, 可以被认知用户占用.

$$R_i(t, u) = \frac{1}{T} \sum_{\tau=t-T}^{\tau=t-1} r_i(\tau, u), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} R_i(t+1, u) &= \left(1 - \frac{1}{T}\right) R_i(t, u) \\ &\quad + \frac{1}{T} r_i(t, u), \end{aligned} \quad (4)$$

$$L_i(t) = l_i - \sum_{\alpha=1}^t \lambda_i v \cdot k_u(\alpha). \quad (5)$$

认知用户 i 的平均传输速率 $R_i(t, u)$ 可以表示成 t 时刻以前时间窗口 T 内的瞬时速率平均值, 也可以用平均传输速率的更新函数^[19] $R_i(t+1, u)$ 表示. 认知用户 i 数据队列总长度为 l_i , 其中 $\lambda_i v$ 为认知用户 i 的数据在一个时隙内到达概率期望值. 其中, v 为一个时隙的大小, λ_i 为认知用户 i 单位时间的数据到达率.

这里的瞬时速率值 $r_i(t, u)$ 不仅仅取决于时隙, 还与跨度有关, 其值由 t 和 u 共同决定. 相同跨度内不同时刻可聚合的资源块数可能不同, 不同跨度相同时刻可聚合的资源块数也可能不同, 可以看出跨度的因素在确定瞬时速率值时是至关重要的, 需要进一步研究.

当网络中所有的认知用户平均分配到 U 个跨度里. 每个跨度内的认知用户个数一旦确定下来就不再变化, 这些认知用户即在本跨度内进行资源调度, 执行比例公平调度算法, 这种情况下的调度算法可以称为局部比例公平调度算法 (partial proportional fairness based on spectrum aggregation, SAPPF)^[26,27]. 当网络中的所有认知用户可以不拘泥于一个跨度的限制, 按照自身瞬时速率最大化的规则灵活的选取相应跨度进行资源调度, 执行比例公平调度算法, 这种情况下的调度算法即为全局比例公平调度算法 (SAGPF).

在 SAPPF 中, 认知用户 i 选择 U 个跨度中的一个跨度 u , 认知用户 i 只能占用该跨度 u 内的空闲

资源, 不能占用其他跨度内的资源. 这样一个认知用户所在跨度一旦确定下来就不再变化. 所以当系统中所有的认知用户被平均分配到 U 个跨度后, 每个跨度内的认知用户个数也就确定下来. 跨度 u 内的认知用户们只允许在本跨度内进行资源调度, 不能超出跨度 u 的范围, 所以每个认知用户对应的跨度是不变的, 每个认知用户的瞬时速率受到所选跨度的限制.

在 SAGPF 中, 调度的规则是认知用户按照自身瞬时速率最大化的原则在不同时刻选择不同的跨度. 具体的讲, 由于不同跨度内的空闲资源随时间变化而不同, 所以每个认知用户在一时刻都需要选取空闲资源最多的跨度进行资源调度. 认知用户 i 在 t 时刻选择的跨度 u 可以使其自身瞬时速率达到最大值. 在下一时刻认知用户 i 可以重新选择一个跨度, 使其在下一时刻自身瞬时速率达到最大值. 这样每个认知用户不同时刻选择的跨度不是固定的, 每个认知用户的瞬时速率不会受到跨度选择的制约.

本文提出的 SAGPF 与 SAPPF 的最大区别在于跨度的选择上是否受限制, 其实质是两种算法的调度规则不同. SAPPF 调度规则比较简单, 认知用户对跨度的选择单一. 本文提出的 SAGPF 调度规则比较灵活, 是按照认知用户在不同时刻自身瞬时速率最大化来选择相应跨度的, 因此对跨度的选择不受约束, 所调度的空闲资源可以提供给认知用户更高的数据传输速率.

下面是 SAGPF 具体的步骤:

步骤 1 统计给定频段内可供认知用户聚合使用的空闲频段总带宽, 按照固定跨度的大小计算跨度总个数 U , 并确定每个认知用户拥有的数据队列长度 l_i .

步骤 2 计算每个资源块能提供的最大数据速率, 经聚合空闲资源块得到每个认知用户的初始平均传输速率.

步骤 3 统计在 t 时刻每一个认知用户分别在 U 个跨度内频谱聚合后的瞬时速率, 每个认知用户都选取使自身速率最大的跨度 u , 确定 $r_i(t, u)$ 值.

步骤 4 通过调度函数 $\max_i r_i(t, u) / R_i(t, u) \cdot L_i(t)$ 得到每个认知用户在所选取的跨度内的调度等级. 若同一跨度内有两个或两个以上的认知用户, 则系统选择等级最大的认知用户进行调度, 并输出 U 个认知用户序号, 执行步骤 6; 若 U 个跨度中任意一个或多个跨度没有认知用户占用, 标记这

些跨度为 empty, 执行步骤 5; 若选取跨度 u 的所有认知用户的数据服务队列为 0, 表示这些认知用户已完成数据传输, 该跨度没有认知用户占用, 标记该跨度为 empty, 执行步骤 5.

步骤 5 允许未得到调度的认知用户在标记为 empty 的跨度内进行一次调度等级计算, 然后系统允许调度等级最大(非 0)的认知用户占用该跨度, 并输出该认知用户序号, 执行步骤 6; 若未得到调度的认知用户等级都为 0, 说明除了正在调度的认知用户其他认知用户均结束服务, 执行步骤 7.

步骤 6 将输出 U 个序号的认知用户按照更新函数 (4) 进行平均传输速率的更新, 并缩减相应数据队列长度, 得到剩余队列长度 $L_i(t)$, 更新时间 $t = t + 1$, 执行步骤 3.

步骤 7 将正在调度的认知用户按照更新函数 (4) 进行平均传输速率的更新, 并缩减相应数据队列长度, 得到剩余队列长度 $L_i(t)$, 更新时间 $t = t + 1$, 若 $\max L_i(t) \neq 0$, 则执行步骤 3, 若 $\max L_i(t) = 0$, 则执行步骤 8.

步骤 8 系统内所有认知用户都已经结束服务, 输出总时间 t 、平均数据速率 $R_i(t, u)$, 结束.

2.3 认知用户数据到达概率及系统服务时间

为了更好的描述系统资源调度行为, 接下来从认知用户数据到达概率和系统服务时间两个方面进行分析研究. 认知用户的数据到达服从泊松过程, λ_i 为认知用户 i 单位时间的数据到达率, v 为一个时隙的大小. 因此认知用户 i 在跨度 u 内第 m 个资源块上的数据到达概率 $P_{m,i}^u(t)$ 可以用表示成

$$P_{m,i}^u(t) = p \{x_{m,i}^u(t) = 1\} \cdot \frac{(\lambda_P v)^n}{n!} e^{-\lambda_P v}, \quad (6)$$

其中, $p \{x_{m,i}^u(t) = 1\}$ 代表该资源块是空闲的, 可以被认知用户占用. λ_P 为主用户数据到达率, M 表示一个跨度内所有资源块的总数.

$$\begin{aligned} p \{x_{m,i}^u(t) = 1\} &= 1 - p \{x_{m,i}^u(t) = 0\} \\ &= 1 - \frac{1}{U} \cdot \frac{1}{M} \cdot \frac{(\lambda_P v)^\theta}{\theta!} e^{\lambda_P v}. \end{aligned} \quad (7)$$

$P[k_u(t)]$ 为认知用户 i 在跨度 u 内 $k_u(t)$ 个空闲资源块上的数据到达概率为

$$\begin{aligned} P[k_u(t)] &= p \left\{ \sum_{m=1}^M x_{m,i}^u(t) = k_u(t) \right\} \\ &\times \frac{(\lambda_P v)^n}{n!} e^{-\lambda_i v}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $p \left\{ \sum_{m=1}^M x_{m,i}^u(t) = k_u(t) \right\}$ 为跨度 u 内同时存在 $k_u(t)$ 个空闲资源块的概率,

$$\begin{aligned} &p \left\{ \sum_{m=1}^M x_{m,i}^u(t) = k_u(t) \right\} \\ &= 1 - \frac{1}{U} \cdot \frac{M!}{k_u(t)! [M - k_u(t)]!} \cdot \frac{(\lambda_P v)^\theta}{\theta!} e^{\lambda_P v}. \end{aligned} \quad (9)$$

本文中系统服务时间是指系统内所有认知用户全部结束服务的时间, 即所有的认知用户结束数据传输的时间. 系统服务时间直接影响着系统效率, 如果系统服务时间越短, 则系统可以服务的用户数量就越多, 效率就越高. 本文提出的 SAGPF 在系统服务时间上占有优势, 一方面频谱聚合技术本身就可以提高数据传输速率, 降低服务时间; 另一方面本文提出的调度方法使每个跨度在每个时刻都能得到充分利用, 所以也减少了时间的浪费.

单一资源块的等待时间概率 W 为生灭过程中灭的概率分布, 即 $W \propto \Gamma(1, \mu)$. 当已有 $j - 1$ 个资源块正在数据队列等待, 新到达数据队列的资源块等待时间概率分布为

$$\sum_{q=1}^j W_q \propto \Gamma(j, \mu), \quad (j = 2, 3, 4 \dots), \quad (10)$$

其概率密度为

$$f(y) = \begin{cases} 0, & y \leq 0, \\ \frac{\mu^j y^{j-1}}{\Gamma(j)} e^{-\mu y}, & y > 0. \end{cases} \quad (11)$$

因此单一资源块的等待时间分布函数如下:

$$\begin{aligned} F_W(t) &= p[W < t] = p[0 < W < t] + p[W = 0] \\ &= \sum_{j=1}^{\infty} (1 - \rho) \rho^j \int_0^t f(y) dy \\ &\quad + (1 - \rho). \end{aligned} \quad (12)$$

可得到平均等待时间, 表示为

$$E[W] = \int_0^{\infty} t f_W(t) dt = \frac{\rho}{\mu(1 - \rho)}, \quad (13)$$

$f_W(t)$ 为 $F_W(t)$ 的概率密度函数, $\rho = \lambda_i/\mu$ 为业务强度.

调度器的服务速率服从均值为 μ 的负指数分布, 所以单一资源块的数据调度服务时间为 $1/\mu$. 根据排队论模型, 每个资源块的数据从到达队列到服务完成所需时延 X 的平均值为 $E(X)$, 表示为

$$E(X) = E[W] + \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu(1 - \rho)}. \quad (14)$$

如果系统采用频谱聚合技术时, 其调度器个数等于聚合的空闲信道个数 $k_u(t)$, 认知用户可以使用所有的调度器, 即其调度器的服务速率为 $\mu k_u(t)$, 认知用户 i 数据到达率也增加为 $\lambda_i k_u(t)$, 则每个资源块数据从到达队列至服务完成的时延 X 的均值为

$$E_{SA}(X) = \frac{1}{k_u(t) \cdot \mu(1-\rho)} = \frac{1}{k_u(t)} E(X). \quad (15)$$

通过 (15) 式可以看出, 在频谱聚合的模型下, 认知用户的数据服务时间缩减为单一调度器系统的 $1/k_u(t)$. 所以, 如果系统要求的数据服务时间相同, 那么使用频谱聚合技术将可以服务 $k_u(t)$ 倍的认知用户.

2.4 吞吐量公平性指数

在调度算法的研究分析中, 吞吐量公平性指数是一个很重要的指标, 需要用吞吐量公平性指数量化分析 SAGPF 在吞吐量方面对系统公平性的影响. 与此同时不同方案之间的公平性比较也需要用到吞吐量公平性指数. 一般采用 Jain 公平性指数作为衡量标准 [16], 在本文中, 该定义如下:

$$F = \frac{\left[\sum_{i=1}^N R_i(t+1, u) \right]^2}{N \sum_{i=1}^N [R_i(t+1, u)]^2}, \quad (16)$$

其中, N 表示认知用户总个数. $F = 1$ 表示完全公平, F 越小说明公平性越差, 相应的分配方法越不公平. 需要说明的是, 公平性指数大小本身没有具体意义, 只有当不同方案互相比时, 其值越大说明该方法越公平, 其值越小说明该方法越不公平. 本文将 SAGPF, SAPPF, 最大载干比调度算法 (SACI) 三者进行比较, 从公平性方面阐述 SAGPF 的优越性.

本文除了利用吞吐量公平性指数来衡量调度算法的好坏, 还利用了认知用户吞吐量抖动特性作为补充. 吞吐量抖动可以衡量系统为认知用户提供服务的质量, 从用户角度来看, 其抖动特性反应了用户数据传输速率是否稳定. 吞吐量抖动越小表明用户的数据传输速率越稳定, 服务质量越高. 认知用户 i 在 ϕ 个时隙内的吞吐量抖动指数 $f_i(\phi)$ 表示如下 [16]:

$$f_i(\phi) = \frac{1}{\phi} \sum_{t=1}^{\phi} \left(\frac{r_i(t, u) - R_i(t, u)}{R_i(t, u)} \right)^2. \quad (17)$$

3 仿真结果与分析

这部分给出了关于 SAGPF 的一系列仿真图, 包括: 吞吐量公平性指数、系统服务时间、吞吐量抖动特性、认知用户数据队列长度与吞吐量的关系, 并在以上几个方面分析比较了 SAGPF 和 SAPPF, SACI, 得出相应结论.

3.1 吞吐量公平性指数

本文的调度算法 SAGPF 可以使认知用户之间都能公平的获得较高的吞吐量, 在这方面比 SAPPF, SACI 更公平, 如图 2 所示. 其跨度大小为 1.8 MHz, 时隙大小为 0.5 ms, 时间窗口 T 为 5 个时隙, 认知用户 30 个, 认知用户的平均数据队列总长度为 40 kbit.

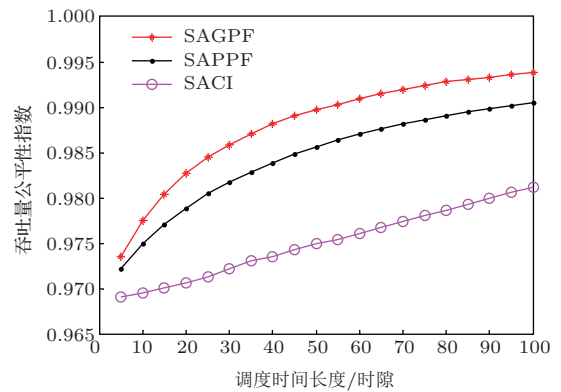


图 2 吞吐量公平性指数比较

从图 2 中可以看出, SAGPF, SAPPF, SACI 三种调度算法随时间的增加都有所增长, 但 SAGPF 始终都是最高的, 其次是 SAPPF, 最后是 SACI. 这是因为 SACI 每次都调度瞬时速率最大的认知用户, 这样如果其他认知用户所在信道条件比较差或聚合空闲资源比较少时, 始终不能被调度, 就会造成用户之间获得的吞吐量不均衡. 而 SAPPF 是将认知用户按跨度分组的, 当一些跨度中的认知用户全部结束服务时, 该跨度处于空闲状态, 其他认知用户却不能占用, 这样造成了局部吞吐量不公平的出现, 也造成了时间的浪费, 降低了系统效率.

从图 3 中可以看出, 在 SAGPF 模型下, 时间窗口 T 分别为 5, 10, 20 时, 吞吐量公平性指数逐步增大. 通过 (4) 式更新函数也可以得出相应结论, 时

间窗口越大, 瞬时速率的大小对认知用户平均吞吐量的影响越小, 相邻时刻的平均吞吐量相差越小, 认知用户之间的平均吞吐量波动差异就越小, 所以公平性指数就越高.

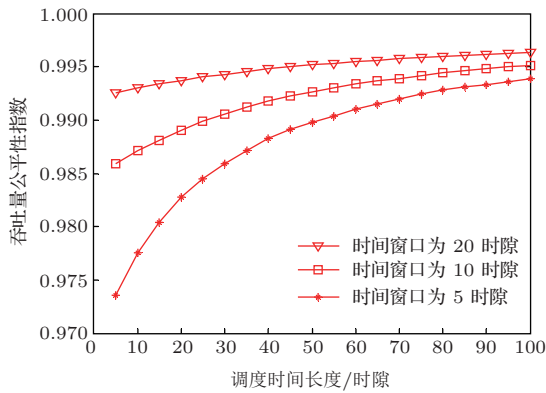


图3 时间窗口 T 对 SAGPF 吞吐量公平性指数的影响

3.2 吞吐量抖动指数

图4给出了三种调度算法下, 30个认知用户的吞吐量抖动指数, ϕ 值都选取100个时隙. 从图中明显可以看出, 本文提出的SAGPF吞吐量抖动最小, SAPPF, SACI吞吐量波动都很大. 这是由于SAPPF, SACI两种方案下认知用户被调度的平均时间间隔过大, 在即将结束服务的后期跨度利用不充分, 所以造成平均吞吐量下降过快, 瞬时速率与平均数据速率差值较大, 从而导致抖动性明显. SAGPF避免了上述问题, 因此吞吐量抖动不明显, 服务质量也最高.

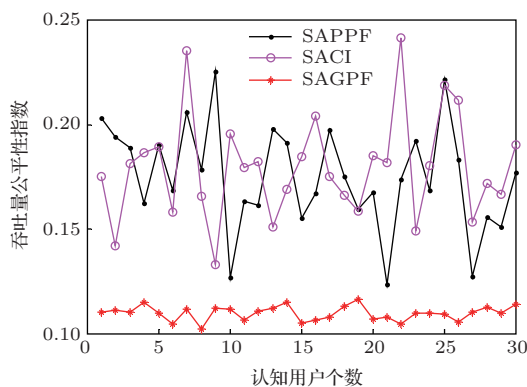


图4 吞吐量抖动指数

图5呈现了统计时间 ϕ 值分别为100, 50, 25时, 对SAGPF模型下吞吐量抖动的影响. 如(17)式中, ϕ 值越大, 对于认知用户来说统计的吞吐量抖动越准确, 抖动性越小; 反之, ϕ 值越小, 统计时

间不足以描述认知用户实际的吞吐量抖动指数. 本文选取 ϕ 值为100个时隙, 吞吐量抖动比选取25个时隙时降低一半.

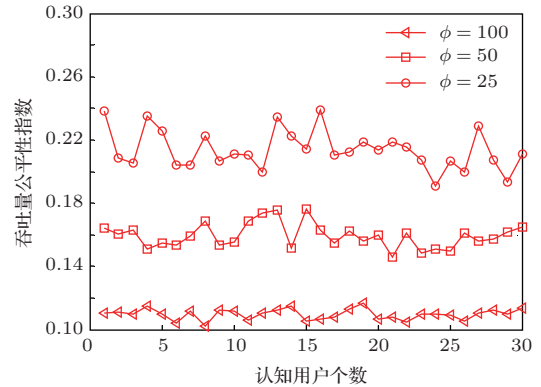


图5 统计时间 ϕ 对 SAGPF 吞吐量抖动指数的影响

3.3 系统服务时间

系统服务时间是衡量调度算法有效性的技术指标, 它直接影响着系统效率. 调度算法越合理, 其系统服务时间越短, 系统服务效率越高, 在同等的时间条件下, 合理的调度方案可以服务更多的用户.

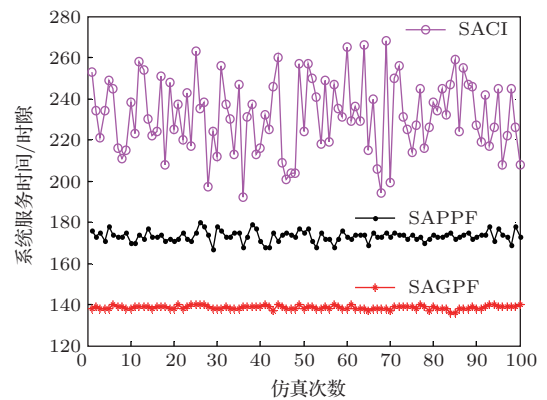


图6 系统服务时间

图6给出了认知用户平均数据总长度为40 kbit时, 三种调度算法仿真次数从1到100的系统服务时间, 即系统内30个认知用户全部结束服务的总时间长度. 从图中可以看出, 在SAGPF调度算法下, 系统服务时间稳定在140时隙上下, 是三种调度算法占用时间最小的, 这也说明该调度算法相对SAPPF, SACI更合理, 使得系统效率也最高. SAPPF, SACI调度算法由于后期对跨度的利用不充分导致系统服务时间拖延, 分别为180时隙和240时隙左右, 远大于SAGPF调度算法.

3.4 认知用户平均吞吐量与数据长度的关系

从图7中可以看出, 认知用户平均吞吐量与数据长度的关系. 当认知用户平均数据长度很小时, 系统服务时间就会很短, 认知用户经几轮调度就可以结束服务. 从更新函数可以看出, 认知用户平均吞吐量受到瞬时速率的短期影响而没有较大改变, 因此平均吞吐量较低; 当认知用户平均数据长度逐步增大时, 系统服务时间变长, 认知用户平均吞吐量受到瞬时速率的长期影响而有较大提升. 当数据长度增长到一定程度时, 认知用户平均吞吐量达到系统上限, 不会再因数据长度的增加而增大.

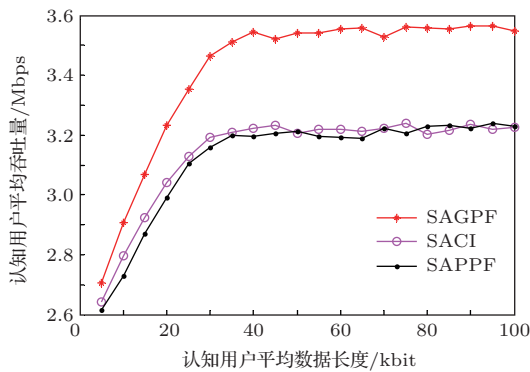


图7 认知用户平均吞吐量与平均数据长度的关系

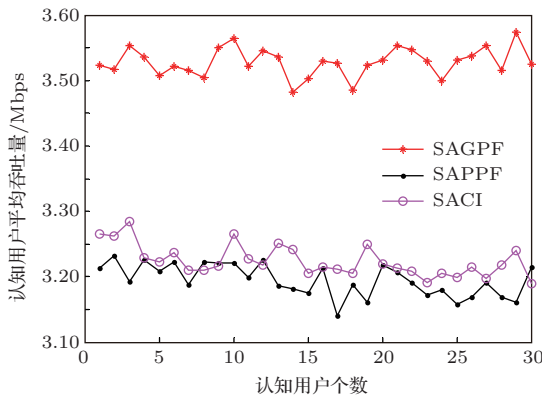


图8 认知用户平均吞吐量

当认知用户数据长度为一定值时, 三种调度方案中SAGPF可以使认知用户拥有的吞吐量最高. 这是因为SAGPF调度算法充分利用跨度资源, 系统服务时间最少, 平均吞吐量更新频繁, 从而每个认知用户最终具有的吞吐量较高. SAPI每一时刻都调度瞬时速率最高的认知用户, 追求了整个系统吞吐量的最大化, 但是由于其系统服务时间较长, 无法保证每个认知用户的平均吞吐量. SAPPF虽

然是在跨度内按调度等级接受服务的, 每一时刻所调度的用户瞬时速率不是最大的, 但其系统服务时间比SACI短, 侧重用户之间的吞吐量公平, 所以综合来看平均吞吐量与SACI不相上下.

图8给出了当数据长度为40 kbit时, 系统内30个认知用户的平均吞吐量. 从中可以更直观的看出SAGPF调度算法下30个认知用户具有的平均吞吐量最高, 平均为3.55 Mbps; SAPPF与SACI的30个认知用户具有的平均吞吐量不相上下, 平均为3.2 Mbps. 这些数据与图7中数据长度为40 kbit时的认知用户平均吞吐量相对应.

4 结 论

本文在认知无线电系统中提出了一种基于频谱聚合的全局比例公平调度算法(SAGPF), 用以解决认知用户在提高自身吞吐量的同时如何公平利用系统资源的问题. SAGPF调度算法考虑了频谱聚合跨度和数据队列长度的因素, 使认知用户之间的吞吐量公平得到保证的同时还提高了用户服务质量, 降低了系统服务时间, 从而达到提高系统效率的目的. 通过仿真验证, SAGPF调度算法相比于其他两种算法在公平性指数、吞吐量抖动以及系统服务时间等方面都更具有优势, 更适合作为认知无线电频谱聚合场景下的调度方案.

参考文献

- [1] Iwamura M, Etemad K, Fong M H, Nory R, Love R 2010 *IEEE Communications Magazine* **48** 60
- [2] Shen Z K, Pappasakellariou A, Montojo J, Gerstenberger D, Xu F L 2012 *IEEE Communications Magazine* **50** 122
- [3] Liu Y, Peng Q Z, Shao H Z, Peng Q H, Wang L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 078406 (in Chinese)[刘允, 彭启琮, 邵怀宗, 彭启航, 王玲 2013 物理学报 **62** 078406]
- [4] Jiang H, Liu C B, Wu C 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 038804 (in Chinese)[江虹, 刘从彬, 伍春 2013 物理学报 **62** 038804]
- [5] Yuan G X, Zhang X, Wang W B, Yang Y 2010 *IEEE Communications Magazine* **48** 88
- [6] Galaviz G, Covarrubias D H, Andrade A G 2011 *IEEE Communications Letters* **15** 1202
- [7] Pedersen K I, Frederiksen F, Rosa C, Nguyen H, Garcia L G U, Wang Y Y 2011 *IEEE Communications Magazine* **49** 89
- [8] Rui Y, Cheng P, Li M Q, Zhang Q T, Guizani M 2013 *IEEE Wireless Communications* **20** 101

- [9] Li J P, Tan Z H, Tao C, Xu S Y 2010 *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing* Su Zhou, Oct. 21–23, 2010 p1
- [10] Zu Y X, Zhou J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 019501
- [11] Zhang X J, Lu Y, Tian F, Sun Z X, Cheng X F 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 078401 (in Chinese)[张学军, 鲁友, 田峰, 孙知信, 成谢锋 2014 物理学报 **63** 078401]
- [12] Zheng S L, Yang X N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 148402 (in Chinese)[郑仕链, 杨小牛 2012 物理学报 **61** 148402]
- [13] Chai Z Y, Zheng L P, Zhu S F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 118801 (in Chinese)[柴争义, 郑丽萍, 朱思峰 2012 物理学报 **61** 118801]
- [14] Zu Y X, Zhou J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 079501 (in Chinese)[祖云霄, 周杰 2011 物理学报 **60** 079501]
- [15] Zhou H, Fan P Y, Letaief K B, Xia X G 2010 *IEEE International Conference on Communications* Cape Town, May 23–27, 2010 p1
- [16] Shi H, Prasad R, Onur E, Niemegeers I 2013 *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **99** 1
- [17] Kwan R, Leung C, Zhang J 2009 *IEEE Signal Processing Letters* **16** 461
- [18] Attar A, Devroye N, Li H M, Leung V C M 2010 *7th International Symposium on Wireless Communication Systems* York, Sept. 19–22, 2010 p1041
- [19] Zhou H, Fan P Y, Li J 2011 *IEEE Trans. on Vehicular Technology* **60** 1867
- [20] Almatarneh R K, Ahmed M H, Dobre O A 2010 *Vehicular Technology Conference Fall* Ottawa ON, Sept. 6–9, 2010 p1
- [21] Girici T, Zhu C X, Agre J R, Ephremides A 2010 *Journal of Communications and Networks* **12** 30
- [22] Wang X, Cai L 2013 *IEEE Trans. on Wireless Communications* **12** 1584
- [23] Ren Z Y, Chen S Z, Hu B, Ma W G 2013 *IEEE Communications Letters* **17** 868
- [24] Wang B, Zhao D M 2010 *IEEE Trans. on Wireless Communications* **9** 1150
- [25] Jeon J H, Lim J T 2012 *IET Communications* **6** 2816
- [26] Matthew A, Krishnan K, Kavita R, Alexander S, Phil W 2001 *IEEE Communications Magazine* **39** 150
- [27] Wang Q, Xu D, Xu J 2006 *25th International IPCCC* Phoenix, April. 10–12, 2006 p97

Global proportional fairness scheduling algorithm based on spectrum aggregation in cognitive radio*

Yin Cong[†] Tan Xue-Zhi Ma Lin Yu Yang

(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

(Received 31 October 2013; revised manuscript received 26 February 2014)

Abstract

In a cognitive radio system, it is still a problem that resource scheduling among secondary users (SUs) is distributed unfairly when spectrum aggregation technology is involved to support high-speed data transmission. A global proportional fair scheduling algorithm is proposed based on spectrum aggregation to solve the problem. This paper focuses on the relation between the fairness for SUs and spectrum aggregation. Throughput fairness can be guaranteed as much as possible after considering two parameters, the span of spectrum aggregation and the remaining data queue length of SUs. Simulation results show that the proposed scheduling algorithm takes advantage of fairness and the delay of system service as compared with the other two scheduling algorithms, max C/I and partial proportional fairness. Meanwhile, it is shown that the proposed scheduling algorithm has lower throughput shake to make sure of fairness among SUs and high efficiency of system.

Keywords: cognitive radio, spectrum aggregation, proportional fairness scheduling algorithm, throughput fairness

PACS: 84.40.Ua

DOI: 10.7498/aps.63.118402

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61071104), and the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2011ZX03004-004).

† Corresponding author. E-mail: 11B305006@hit.edu.cn