

# 认知无线电系统频谱自适应调度算法设计

徐斌阳, 李健颖, 李少谦

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

**【摘要】**针对认知无线电系统多媒体业务应用,提出了一种基于频谱感知的自适应分组调度算法。该算法通过自适应地调整实时业务和非实时业务间的资源配额,以在空闲频谱资源变化情况下保证实时业务的QoS需求。基于IEEE 802.22无线区域网(WRAN)的认知无线电系统仿真表明,同已有的3种典型分组调度算法M-LWDF、Exp和PF相比较,该频谱自适应分组调度算法可以在变化的空闲频谱条件下为实时业务提供更为可靠的QoS保障,获得更高的系统吞吐量和频谱利用效率。

**关键词** 认知无线电; 多媒体; 分组调度; QoS; 频谱利用效率  
中图分类号 TN929 文献标识码 A

## Spectrum-Aware Scheduling Algorithm for Cognitive Radio Multimedia Application

XU Bin-yang, LI Jian-ying, and LI Shao-qian

(National Key Laboratory of Communication, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** A spectrum-aware scheduling algorithm is proposed for multimedia applications in cognitive radio system. The algorithm adaptively adjusts the resource share allocated between real-time traffic and non-real-time traffic in varying spectrum environment to provide QoS guarantee for real-time traffic. System simulation based on IEEE 802.22 wireless regional area network shows that the proposed algorithm can provide both better QoS guarantee for real-time traffic and higher system throughput and spectrum utilization compared with conventional scheduling algorithms.

**Key words** cognitive radio; multimedia; packet scheduling; QoS; spectrum utilization

由于认知无线电系统的可用频谱为主系统的空闲频谱<sup>[1]</sup>,因而,认知无线电系统的可用频谱资源会因主系统频谱使用变化而呈现时变特性。在多媒体业务应用环境中,因为实时分组业务对分组传输时延有较高要求,系统可用资源的减少容易造成这些业务的实时要求得不到满足而出现业务服务中断,引起实时业务QoS下降。一种在系统资源变化(或者系统负载变化)环境下确保业务QoS的常用策略是资源/信道预留方式<sup>[2]</sup>。然而,这种资源预留的方式降低了频谱利用效率,同时与认知无线电系统的应用初衷相违背。而现有的分组调度算法,如M-LWDF(modified largest weighted delay first)<sup>[3]</sup>, Exp(exponential rule)<sup>[4]</sup>和PF(proportional fair)<sup>[5]</sup>等,缺乏随资源变化动态调整调度策略的机制,不能在可用频谱较少条件下为实时业务提供可靠的QoS保障。

本文针对认知无线电系统多媒体业务应用,提

出一种根据可用频谱数量的变化,动态调整实时业务与非实时业务服务机会的自适应分组调度算法。

### 1 频谱自适应分组调度算法

算法由分组调度和频谱分配两部分组成。分组调度部分根据每个分组队列的服务状态和QoS要求计算出调度周期内的队列优先级,并确定分组队列的服务次序;频谱分配部分则根据分组调度确定的队列服务顺序为分组队列分配传输信道。由于认知无线电系统物理层多采用正交频分多址方式(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)<sup>[5]</sup>,因而,频谱分配的基本单元为时频块。

本文采用如下符号约定对算法进行描述: $i$ 和 $j$ 分别为用户和业务类型标识; $r_{i,n}(t)$ 表示调度时刻 $t$ 用户 $i$ 在子信道 $n$ 上的传输速率; $\tilde{r}_{i,j}(t)$ 为用户 $i$ 的 $j$ 类业务队列在统计时间间隔 $T$ 内获得的平均分组传

收稿日期: 2007-02-05; 修回日期: 2007-09-25

基金项目: 国家863计划(2005AA133910)

作者简介: 徐斌阳(1977-),男,博士,主要从事无线资源管理、QoS保证机制、无线多媒体通信、频谱共享等方面的研究。

输速率;  $\bar{r}_j$  表示  $j$  类业务的传输速率要求;  $w_{i,j}(t)$  为在调度时刻  $t$  之前, 用户  $i$  的  $j$  类业务队列列首分组的已等待时间;  $T_j$  为  $j$  类业务分组的传输时延界限。

### 1) 分组调度

在调度时刻  $t$ , 用户  $i$  的  $j$  类业务队列的优先级通过下式计算得到:

$$q_{i,j}(t) = \kappa_j \exp \left[ \alpha_j \frac{w_{i,j}(t) - T_j}{T_j} + \beta_j \frac{\bar{r}_j - \tilde{r}_{i,j}}{\bar{r}_j} \right]$$

$$\text{式中 } \kappa_j = \begin{cases} 1 + \frac{u(N - \tilde{N})}{N} & j \text{ 为实时业务} \\ 1 & j \text{ 为非实时业务} \end{cases}; N \text{ 为可}$$

用子信道数随机变量均值;  $\tilde{N}$  为系统感知到的可用子信道数;  $u(\cdot)$  为单位阶跃函数;  $\alpha_j$  和  $\beta_j$  分别为  $j$  类业务的时延优先级和吞吐量优先级加权因子, 且  $\alpha_j + \beta_j = 1$ 。按照以上计算得到的优先级数值, 对系统内的分组队列按照优先级降序排序。

### 2) 频谱分配

假定: 调度时刻  $t$  系统感知到的可用频谱为  $\tilde{N}$  个空闲子信道, 每个子信道在一个调度周期内被分为  $M$  个传输时隙; 分组队列  $q(i, j)$  的列首分组大小为  $s(i, j)$ ; 频谱分配初始, 信道剩余传输时隙  $r(n) = M, n = 1, 2, \dots, \tilde{N}$ ; 则频谱分配过程可用如下流程描述:

(1) 为具有最高优先级的分组队列  $q(i, j)$  选取可用最佳信道容量的传输子信道  $n$ , 选择的准则为:

$$q(i, j) \leftarrow \arg \max_{n, r(n) > 0} \{ \tilde{r}_{i,n}(t) \}$$

(2) 计算在已选出的传输信道  $n$  上, 传输分组大小为  $s(i, j)$  的队列  $q(i, j)$  列首分组所需要的传输时隙数为:

$$r'(n) = \left\lceil \frac{s(i, j)}{\tilde{r}_{i,n}(t)} \right\rceil$$

(3) 统计系统可用时隙: 若  $r'(n) \leq r(n)$ , 则更新信道  $n$  剩余传输时隙数  $r(n) = r(n) - r'(n)$ , 进入

(4); 若  $r'(n) > r(n)$ , 则计算队列  $q(i, j)$  列首分组剩余比特数  $s'(i, j) = s(i, j) - r(n)\tilde{r}_{i,n}(t)$ , 且令  $r(n) = 0$ , 返回(1)为分组队列  $q(i, j)$  列首分组剩余比特选择传输信道, 分配传输时隙。

(4) 判断系统是否有剩余时频块; 若  $r(n) \neq 0$ , 则进入(5), 若  $r(n) = 0, \forall n = 1, 2, \dots, \tilde{N}$ , 则进入(6)。

(5) 更新优先级队列, 返回(1)为最高优先等级的分组队列分配传输信道和传输时隙。

(6) 根据已分配的信道和时隙, 加载分组比特, 传输分组, 完成该调度周期的频谱分配。

## 2 算法仿真及性能分析

本文参考IEEE 802.22 WRAN系统环境对算法性能进行评估。仿真采用的系统模型由一个位于小区中心的基站和在地理位置上均匀分布的多个CPE(customer premise equipment)构成。CPE为位置固定的认知无线电用户设备。小区半径设为33 km。基站发射天线和CPE接收天线高度分别为100 m和10 m。基站的等效全向发射功率(EIRP)为100 W。基站发射信号经历大尺度路径损耗、阴影衰落和多径衰落。其采用的信道模型分别为包括视距和非视距路径衰落的大尺度路径损耗模型<sup>[6]</sup>、采用二维正弦和<sup>[7]</sup>的阴影衰落模型以及文献[7](附录B)给出的12径衰落参数模型。WRAN的工作中心频率为600 MHz。

系统承载的业务包括UGS(unsolicited grant service)类VoIP, rtPS(real-time polling service)类MPEG以及nrtPS(non-real-time Polling Service)类FTP3种分组业务<sup>[8]</sup>。这三类业务根据文献[8]给出的业务源模型建模, 模型及QoS参数由表1给出。仿真过程中, 每个CPE与基站同时保持3个数据流连接, 每个数据流对应一种分组业务。表1中的IDP为自中断确定过程(interrupted deterministic process), IRP为中断更新过程(interrupted renewal process), IPP为间歇泊松过程(interrupted poisson process)。

表1 VoIP、MPEG及FTP业务模型及QoS参数

业务类型	仿真模型	ON/OFF持续周期分布函数	分组到达时间间隔分布函数	分组产生速率 /packets·s <sup>-1</sup>	分组大小 /bit	业务源比特速率 $r_j$ /kb·s <sup>-1</sup>	分组传输时延界限 $T_j$ /ms	丢包率界限 $\delta$
UGS/VoIP	IDP	指数分布	固定值	17.6	528	9.3	80	0.010
rtPS/MPEG	2IRP	Pareto分布	指数分布	1 26.3	1 504	190	280	0.001
nrtPS/FTP	4IPP	指数分布	指数分布	6.5	1 536	10	60 000	0.001

信道实时传输容量根据表2给出的CPE接收信号信噪比对应的调制编码方案(MCS)得出。

WRAN的MAC帧由下行子帧和上行子帧构成<sup>[9-10]</sup>。MAC帧长为20 ms, 其中下行子帧长10 ms。

子帧被划分为33个等长时隙, 每个时隙对应一个OFDM符号周期长度。WRAN应用的主系统为数字电视(DTV)广播系统, 一个6 MHz的DTV频道被划分为32个WRAN子信道。WRAN与DTV主系统共享2

个DTV频道,即64个WRAN子信道。设每个子信道被DTV系统占用的概率为0.25,且子信道的被占用状态相互独立,每秒更新一次。并假定WRAN系统对空闲子信道的检测无差错。频谱自适应分组调度算法中的VoIP、MPEG及FTP业务时延优先级因子 $\alpha$ 分别设为0.5、0.9和0.7。

表2 仿真中采用的MCS

接收机信噪比典型值/dB	调制方式	编码速率
9.4	QPSK	1/2
11.2	QPSK	3/4
16.4	16QAM	1/2
18.2	16QAM	3/4
22.7	64QAM	2/3
24.4	64QAM	3/4

分组调度算法、M-LWDF、Exp及PF算法下的丢包率当系统承载115个CPE的业务负荷时,频谱自适应分组调度算法、M-LWDF、Exp及PF算法下VoIP及MPEG两种业务丢包率累计分布数值结果如图1所示。此时,VoIP、MPEG及FTP3种业务获得的平均分组传输时延分别为{12.2, 10, 10, 10}ms、{13.8, 23.9, 30.4, 1 202.1}ms和{36.9, 201.2, 274.1, 10}ms。4种分组调度算法获得的系统吞吐量分别为{19.01, 18.99, 18.91, 17.88}Mb/s。

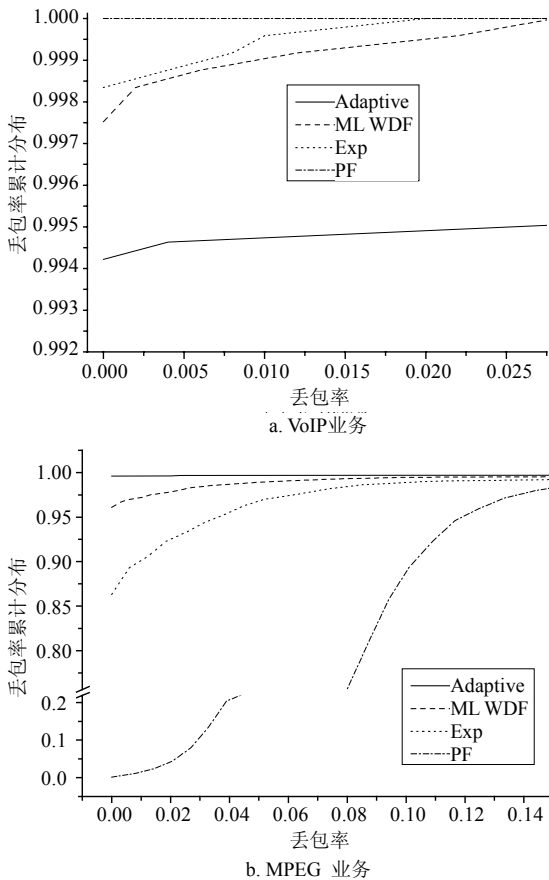


图1 CPE数目为115时,VoIP及MPEG业务在频谱自适应分组调度算法、M-LWDF、Exp及PF算法下的丢包率

图2给出了当系统负载增加到125个CPE时,频谱自适应分组调度算法、M-LWDF、Exp及PF算法下VoIP及MPEG两种业务丢包率累计分布数值结果。VoIP、MPEG及FTP业务在4种调度算法下获得的平均分组传输时延分别为{18.4, 10.7, 11.1, 9.9}ms、{26.7, 121.6, 432.4, 3 622.5}ms和{201.9, 567, 504.7, 10}ms。4种分组调度算法获得的系统吞吐量分别为{20.7, 19.2, 9.5, 18.3}Mb/s。上述VoIP、MPEG和FTP业务的丢包率分别于每传送500、5 000和50 000个分组统计一次。

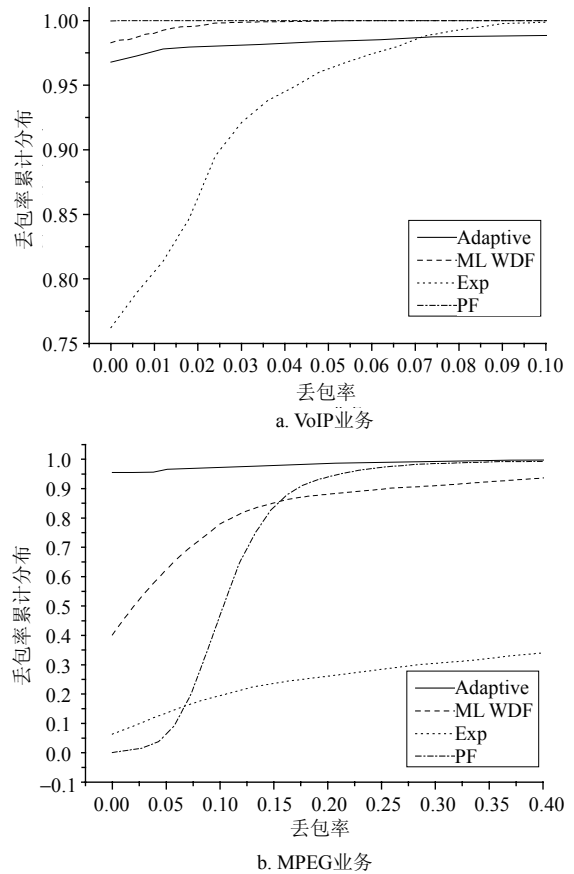


图2 CPE数目为125时,VoIP及MPEG业务在频谱自适应分组调度算法、M-LWDF、Exp及PF算法下的丢包率

### 3 结束语

本文针对认知无线电系统多媒体业务应用,提出了一种根据可用频谱资源的数量变化动态调整实时业务和非实时业务的调度机会以为实时业务提供可靠QoS保障的自适应分组调度算法。系统级的仿真结果表明,频谱自适应分组调度算法可以在不同的系统业务负荷下为实时业务提供较M-LWDF、Exp及PF分组调度算法更为可靠的QoS保障,同时获得更高的系统吞吐量和频谱利用效率。

(下转第921页)

- E-Commerce Technology. San Diego, USA: IEEE Computer Society, 2004: 146-152.
- [9] AIELLO M, PLATZER C, ROSEENBERG F, et al. Web service indexing for efficient retrieval and composition[C]//Proceedings of the 8th IEEE International Conference on E-Commerce Technology and the 3rd IEEE International Conference on Enterprise Computing, E-Commerce, and E-Services (CEC/EEE '06). Palo Alto, USA: IEEE Computer Society, 2006: 63-65.
- [10] BLAKE M B, CHEUNG W, JAEGER M C, et al. WSC-06: the web service challenge[C]//Proceedings of the 8th IEEE International Conference on E-Commerce Technology and the 3rd IEEE International Conference on Enterprise Computing, E-Commerce, and E-Services (CEC/EEE '06). Palo Alto, USA: IEEE Computer Society, 2006: 62-63.
- [12] 朱海平. 基于概念图的语义搜索[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- ZHU Hai-ping. Semantic search by matching conceptual graphs[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2006.

编辑 熊思亮

(上接第817页)

## 参 考 文 献

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [2] HEREDIA-URETA H, CRUZ-PEREZ F A, ORTIGOZA-GUERRERO L. Capacity optimization in multiservice mobile wireless networks with multiple fractional channel reservation[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2003, 52(6): 1519-1539.
- [3] ANDREWS M, KUMARAN K, et al. CDMA data QoS scheduling on the forward link with variable channel conditions[R]. Bell Laboratories Technical Report, April 2000.
- [4] SHAKKOTTAI S, STOLYAR A L. Scheduling for multiple flows sharing a time-varying channel- the exponential rule[R]. Bell Laboratories Technical Report, Dec 2000.
- [5] VISWANATH P, TSE D N C, LARROIA R. Opportunistic beamforming using dumb antennas[J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2002, 48(6): 1277-1294.
- [6] ELI S, GERALD C. WRAN channel modeling. [2005- 07-12]. [http://www.ieee802.org/22/Meeting\\_documents/2005\\_July/22-05-0055-01-0000\\_WRAN\\_Channel\\_Modeling-ES-GC.doc](http://www.ieee802.org/22/Meeting_documents/2005_July/22-05-0055-01-0000_WRAN_Channel_Modeling-ES-GC.doc).
- [7] CAI X, GIANNAKIS G B. A two dimensional channel simulation model for shadow fading processes[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2003, 52(6): 1558-1567.
- [8] BAUGH C R, HUANG J. Traffic model for 802.16 TG3 MAC/PHY simulations[DB/OL]. [2001-03-02]. [http://www.ieee802.org/16/tg3/contrib/802163c-01\\_3\\_0r1.pdf](http://www.ieee802.org/16/tg3/contrib/802163c-01_3_0r1.pdf).
- [9] WEISS T A, JONDRAL F K. Spectrum pooling an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency[J]. Communications Magazine, IEEE, 2004, 42(3): S8-14.
- [10] BENKO J, CHEONG Y C, CORDEIRO C. A PHY/ MAC proposal for IEEE 802.22 WRAN systems part 2: The Cognitive MAC[DB/OL]. [2006-02-23]. [http://www.ieee802.org/22/Meeting\\_documents/2006\\_Mar/22-06-0003-03-0000\\_ETRI-FT-I2R-Motorola-Philips-Samsung-Thomson\\_MAC\\_Spec.doc](http://www.ieee802.org/22/Meeting_documents/2006_Mar/22-06-0003-03-0000_ETRI-FT-I2R-Motorola-Philips-Samsung-Thomson_MAC_Spec.doc).

编辑 漆 蓉

(上接第903页)

- [3] SZU H H, TELFER B A, KADAMBE S L. Neural network adaptive wavelets for signal representation and classification[J]. Optical Engineering, 1992, 31(9): 1907-1916.
- [4] ZHANG Q, BENVENISE A. Wavelet network[J]. IEEE Trans on Neural Network, 1992, 3(6): 889-898.
- [5] SZU H H, TELFER B, KADAMBE B. Neural network adaptive wavelets for signal representation and classification[J]. Optical Engineering, 1992, 31(9): 1907-1916.
- [6] ZHANG J, WALTER G, MIAO Y, et al. Wavelet neural networks for function learning[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(6): 1485-1497.
- [7] CAO L, HONG Y. Predicting chaotic time series with wavelet networks[J]. Physic D, 1995, 21(5): 85-97.
- [8] 马 光. 共轭梯度法训练小波神经网络[J]. 信息技术, 2004, 28(9): 54-60.
- MA Guang. Training arithmetic of wavelet neural network conjugate grads algorithm[J]. Information Technology, 2004, 28(9): 54-60.
- [9] ZHANG J, WALTER G, MIAO Y, et al. Wavelet neural network for function learning[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(6): 1485-1497.
- [10] Zhang Qing-hua. Using wavelet network in nonparametric estimation[J]. IEEE Trans Neural Network, 1997, 8(2): 227-236.
- [11] COHEN M, A, GROSSBERG S. Absolute stability of global pattern formation and parallel memory storage by competitive neural networks[J]. IEEE Trans Syst Man Cybern, 1983, SMC-13: 815-826.

编辑 熊思亮