

文章编号: 1001 - 893X(2011)03 - 0069 - 06

认知无线电系统中利用模糊逻辑的频谱分配*

文 凯^{1,2}, 付玲生², 傅小玲²

(1. 重庆邮电大学 重庆信科设计有限公司, 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学 通信新技术应用研究所, 重庆 400065)

摘要:为了较全面地分析频谱分配问题, 突出系统的效益和公平性能, 提出了一种利用模糊逻辑的认知无线电频谱分配方案。首先给出模糊逻辑系统(FLS)的概念, 然后利用 FLS 综合分析感知空闲频谱和次用户的特性, 最后结合系统吞吐量最大、公平性和随机分配 3 种准则将空闲频谱分配给次用户使用。仿真结果证实了方案的可行性。

关键词: 认知无线电; 频谱分配; 模糊逻辑; 系统吞吐量

中图分类号: TN915.9 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.03.016

Spectrum Allocation Using Fuzzy Logic for Cognitive Radio Systems

WEN Kai^{1,2}, FU Ling-sheng², FU Xiao-ling²

(1. Chongqing Information Technology Designing Co., Ltd., Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. Institute of the Applications of Advanced Telecommunications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: To analyse spectrum allocation issue more comprehensively and highlight the performances of effectiveness and fairness of the system, a spectrum allocation scheme using fuzzy logic for cognitive radio(CR) is proposed. First the concept of fuzzy logic system(FLS) is given, and then the FLS is used to comprehensively analyse the characteristics of the perceived idle spectrum and the secondary users, finally the idle spectrum is allocated to secondary users in accordance with system throughput maximum, fairness and random allocation criteria. Simulation results confirm the feasibility of scheme.

Key words: cognitive radio(CR); spectrum allocation; fuzzy logic; system throughput

1 引言

频谱利用率低下是比频谱资源稀缺更为本质的一个问题。认知无线电(Cognitive Radio, CR)的提出, 为实现频谱资源的高效利用提供了一种有效途径。CR 是一种智能无线电系统, 能感知无线环境并智能地从周围环境中学习, 通过实时改变一系列工作参数来适应环境变化^[1]。次用户(Secondary User, SU)能够实时检测“频谱空穴”, 在对主用户(Primary User, PU)通信不造成有害干扰的情况下, 可以动态地利用“频谱空穴”进行通信, 实现灵活的频谱共享

并充分提高频谱利用率。认知无线电的关键技术和体系架构等研究近年来取得了一定进展。2004 年 IEEE 802.22 WRAN 工作组正式成立, 标志着认知无线电技术首次从概念走向现实。CR 技术必然将在未来无线通信发展中发挥着至关重要的作用。

频谱分配是认知无线电 MAC 层的关键技术之一^[2]。认知无线电系统应该根据可用频谱的分析结果, 为有通信需求的次用户分配合适的频段。现有的经典频谱分配算法主要是基于图论着色模型的, ZHENG 等人在这方面进行了大量研究^[3-4], 但基于图论的方法将干扰建立为简单的二元对立模型, 并不符合认知无线电的实际情况。模糊逻辑能够模拟

* 收稿日期: 2010 - 10 - 26; 修回日期: 2010 - 02 - 28

人的思维方式,不需要精确解析模型,它在无线通信网络中的建模和控制方面得到了广泛的应用^[5]。认知无线电频谱分配中利用模糊逻辑决策,可以克服频谱检测的非精确性问题并降低分配方案的复杂度。文献[6]考虑次用户的频谱需求率、移动性和距离因素针对某个空闲频段利用 FLS 得到次用户的接入概率,然后选择概率最大的次用户接入。但要完成 M 个空闲信道的分配需执行 M 次算法,造成分配时间过长不能保障次用户通信的实时性要求,而且该方法只考虑到次用户的特性而没考虑 CR 中重要的频谱特性。

为此,本文提出一种利用模糊逻辑的频谱分配方案,综合考虑了可用频谱特性和次用户特性依据吞吐量最大、随机分配和公平性准则进行频谱分配,能有效突出吞吐量性能与用户公平性并减少了分配时间。

2 利用模糊逻辑的认知无线电频谱分配设计

认知无线电是以频谱感知为基础的,利用模糊逻辑的系统能够容忍频谱感知和检测结果存在一定的误差。SU 检测的“频谱空穴”是时域或频谱形式,信道是频谱分配的基本单位,次用户均采用带宽为 B 的单个信道进行传输。信道采用集中式的分配,次用户将感知信息通过上行控制信道传送给基站,在基站中执行模糊逻辑算法后进行统一分配。频谱分配模型设计如图 1 所示。

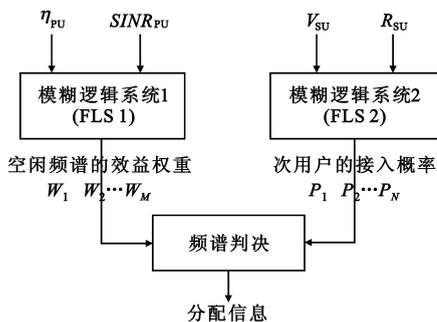


图 1 利用模糊逻辑的频谱分配模型

Fig.1 Spectrum allocation model using fuzzy logic

该模型利用模糊逻辑系统 (Fuzzy Logic System, FLS) FLS1 和 FLS2 综合分析得到空闲信道和次用户特性,然后依据不种准则经频谱判决将不同频谱效益的信道分配给不同接入概率的次用户。与文献[6]相比,方案着重分析了可用频谱特性且可以一次性将空闲频谱分配完毕,节约了分配时间。

2.1 模糊逻辑知识

方案主要利用 FLS 系统,它的一般构成如图 2 所示^[7]。FLS 包括模糊化、解模糊化、知识库和模糊推理 4 个模块。整个实时决策过程就是由这 4 个模块执行的 3 个步骤的一个循环。首先,获取各个输入如信道可用性、SINR、移动性或距离等精确量,将其转变成合适的模糊集合来描述测量不确定性即模糊化。然后,模糊化量被推理模块使用来触发储存在知识库里的规则从而进行模糊运算。推理的结果是频谱效益权重或接入概率的模糊集合。最后,利用解模糊化方法将其转化成一个精确值输出即解模糊化。

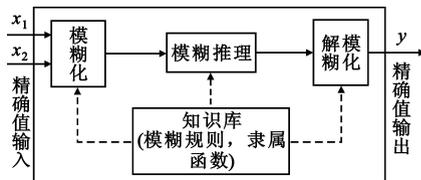


图 2 FLS 的一般构成

Fig.2 General structure of FLS

考虑一个 2 输入、1 输出的 FLS,采用重心法解模糊化,其知识库中包含的 IF - THEN 规则形式如下:

$$R^l: \text{IF } x_1 \text{ IS } F_1^l \text{ AND } x_2 \text{ IS } F_2^l, \text{ THEN } y \text{ IS } G^l$$

要计算出 FLS 的一个精确输出值,首先计算每一条规则结论模糊集的质心 c_c^l ,然后按下式计算:

$$y(x_1, x_2) = \frac{\sum_{l=1}^M \mu_{F_1^l}(x_1) \mu_{F_2^l}(x_2) c_c^l}{\sum_{l=1}^M \mu_{F_1^l}(x_1) \mu_{F_2^l}(x_2)} \quad (1)$$

式中, M 是 FLS 中所含规则数, $\mu_{F^l}(x)$ 是隶属函数, c_c^l 是第 l 条规则结论模糊集的重心。

2.2 模糊逻辑系统 FLS 1

FLS 1 的设计是基于空闲信道的可用性和干扰信噪比(SINR)考虑,利用专家知识综合评判可用频谱质量。由于 PU 随机出现的概率和无线环境的不同,使得可用信道存在着很大的差异,所以不同信道带给次用户的效益是不同的。我们用 FLS 1 输出频谱的效益权重来衡量不同信道的好坏。

CR 要求次用户通信不对主用户造成有害干扰。当 PU 返回时,占用此信道的 SU 必须立刻切换频谱退出,否则会与 PU 产生碰撞给其带来干扰。所以,可依据统计信息获得每个信道的 PU 返回概率或信道可用性情况,为次用户分配一个可用性高的信道可提高其成功传输的概率。基于空闲占时比

(FTR)^[8]来计算信道可用性,将信道 i 的空闲占时比定义为

$$R_{FT_i}(T_k) = T_{idle}/T_k \quad (2)$$

式中, T_k 是信道 i 的测量时间, T_{idle} 是信道总的空闲时间。

根据用户的业务要求, 设定如下的两层模型:

(1) 短时特征 (T_1): 表征了 PU 短时间内的时域相关性, 即 PU 现在使用某个频段, 则在 t_1 后 PU 很有可能还在使用该信道。

(2) 长期特征 (T_2): 表征了 PU 的长期时域相关性, 来预测 PU 未来的频谱活动。

所以, 信道 i 的可用性为

$$\eta_i = \alpha R_{FT_i}(T_1) + (1 - \alpha) R_{FT_i}(T_2) \quad (3)$$

式中, $0 \leq \eta_i \leq 1$, α 和 $1 - \alpha$ 分别是频谱短时和长期特征的权值。

除考虑信道的占用情况外, 我们还考虑次用户检测到的可用信道的干扰信噪比 (SINR)^[9]。对于一个空闲信道, 不同次用户检测的 SINR 值可能不同, 我们取其平均值。由于基站要与系统中所有的用户通信, 感知到信道的干扰信噪比必须大于一个最小要求的 SINR 值。为了给认知用户提供更好的信道质量和容量, 基站应该选择那些具有高 SINR 值的信道来分配。根据香农公式, 信道 i 的信道容量为

$$C_i = B \ln(1 + SINR_i) \quad (4)$$

FLS 1 由 2 输入和 1 输出语言变量构成。表示信道可用性和频谱效益权重的语言变量被分成 5 种标记:

$$T(\eta_{PU}) = T(W_{PU}) = \{\text{Very Low, Low, Medium, High, Very High}\} \quad (5)$$

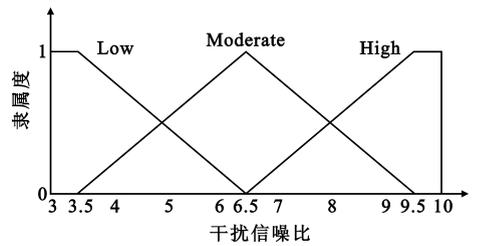
而干扰信噪比划分为 3 种标记:

$$T(SINR_{PU}) = \{\text{Low, Medium, High}\} \quad (6)$$

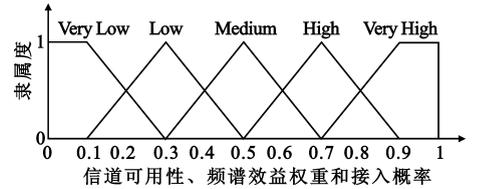
每个语言标记唯一对应于一个隶属函数, 表示这 3 个变量的隶属函数如图 3(a) 和 (b) 所示。

2.3 模糊逻辑系统 FLS 2

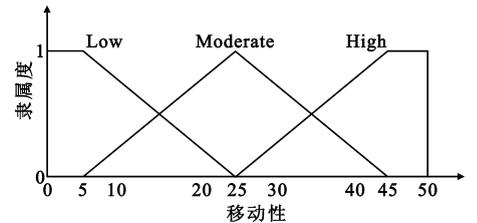
FLS 2 的设计主要是基于次用户的移动性和次用户与基站的距离考虑的, 利用专家知识选择合适的次用户使用各空闲信道。不同特性的次用户接入频谱后对 CR 系统的影响程度不同。一般来说, 具有较远距离和较小移动性的 SU 更易不对 PU 产生干扰。



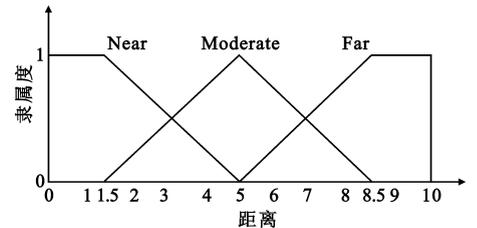
(a) 干扰信噪比



(b) 信道可用性、频谱效益权重和接入概率



(c) 移动性



(d) 距离

图 3 表示 FLS 1 和 FLS 2 变量的所有隶属函数

Fig. 3 The membership functions used to represent all variances in FLS 1 and FLS 2

首先考虑次用户的移动性, 它关系到能否分配到频谱以及对通信活动起到很重要的影响作用。移动性减小了探测到 PU 信号的能力, 如果检测不到 PU 的活动, SU 可能作出错误的决策, 对 PU 产生有害干扰。当认知用户以速率 v 移动时, 会引起频移为 f_d 的多普勒效应。

另外, 终端的地理位置分布关系到无线信道的特性, 位置不同信道的特性相差很大。一般距离基站近的终端信道条件好, 距离基站远的终端信道条件差。可以利用上行链路到达时间 (TOA) 方法计算次用户到基站的距离。设移动台发射信号的时刻为 t , c 是光速, 基站收到信号的时刻为 t_i , 基站坐标为

(x_0, y_0) , 则:

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} = c(t_i - t) \quad (7)$$

FLS2 也是 2 输入 1 输出结构。表示移动性和距离的变量被分成 3 种标记:

$$\begin{aligned} T(V_{SU}) &= \{Low, Moderate, High\} \\ T(R_{SU}) &= \{Near, Moderate, Far\} \end{aligned} \quad (8)$$

而接入概率被划分为 5 种标记:

$$T(P_{SU}) = \{Very Low, Low, Medium, High, Very High\} \quad (9)$$

表示这 3 个变量的隶属函数如图 3(a)、(c)、(d) 所示。

表 1 和表 2 包含了 FLS 1 和 FLS 2 知识库中的所有模糊规则, 均获自于一组网络专家的经验知识。输入参数 η_{PU} 、 $SINR_{PU}$ 、 V_{SU} 和 R_{SU} 模糊化表示为隶属度后触发多条模糊规则, 进而推理判断出信道质量和次用户接入概率, 最后经解模糊化并精确输出。

表 1 模糊逻辑系统 1 的规则库

Table 1 FLS 1 fuzzy rule base

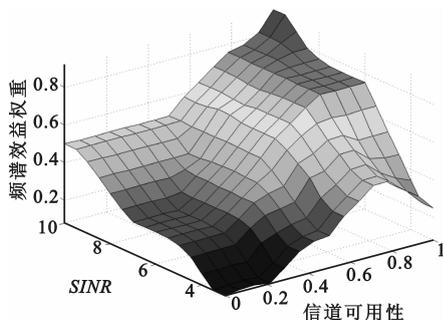
Rule	Antecedent 1	Antecedent 2	Consequence
1	Very Low	Near	Very Low
2	Very Low	Medium	Low
3	Very Low	Far	Medium
4	Low	Near	Very Low
5	Low	Medium	Low
6	Low	Far	Medium
7	Medium	Near	Very Low
8	Medium	Medium	Medium
9	Medium	Far	Medium
10	High	Near	Medium
11	High	Medium	High
12	High	Far	High
13	Very High	Near	Low
14	Very High	Medium	High
15	Very High	Far	Very High

表 2 模糊逻辑系统 2 的规则

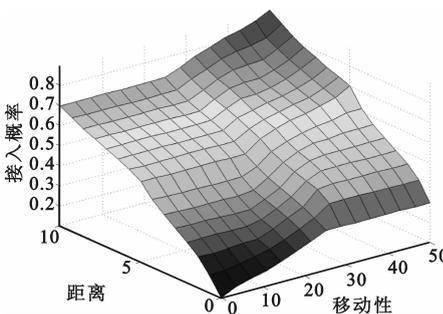
Table 2 FLS 2 fuzzy rule base

Rule	Antecedent 1	Antecedent 2	Consequence
1	Low	Near	Very Low
2	Low	Moderate	Medium
3	Low	Far	Very High
4	Moderate	Near	Very Low
5	Moderate	Moderate	Medium
6	Moderate	Far	High
7	High	Near	Low
8	High	Moderate	Low
9	High	Far	Medium

模糊逻辑系统 FLS 1 和 FLS 2 均使用 Matlab 中模糊逻辑工具箱建立。图 4(a) 和 (b) 分别是 FLS 1 输出频谱效益权重和 FLS 2 输出接入概率的曲面图, 曲面反映出了模糊推理规则的情况。



(a) FLS 1 输出曲面



(b) FLS 2 输出曲面

图 4 模糊逻辑系统 FLS 1 和 FLS 2 的输出曲面

Fig. 4 The output surfaces of fuzzy logic system FLS 1 and FLS 2

2.4 频谱判决

频谱判决就是依据一定的准则分配信道给当前的次用户, 不同判决结果会影响系统吞吐量和用户传输公平性。定义认知无线电的系统吞吐量为

$$Throughput = \sum_{i \in M, j \in N} Blb(1 + SINR_i) W_i P_j \quad (10)$$

式中, $SINR_i$ 和 W_i 分别是信道 i 的干扰信噪比和频谱效益权重, P_j 是次用户的接入概率。传输公平性可以用吞吐量方差 δ^2 来度量, 因为它代表了系统中各次用户吞吐量偏离均值的程度。假设用 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ 表示 n 个相互竞争的数据流各自的吞吐量, 则公平性度量:

$$\delta^2 = \frac{1}{n - 1} \sum_i (\mu_i - \bar{\mu})^2 \quad (11)$$

频谱判决采用以下 3 种准则:

(1) 随机分配准则

该准则是一种最简单的分配方式, 它将信道随机地分配给次用户使用而不考虑信道和次用户的差异性。

(2) 吞吐量最大准则

该准则会产生一个 *Throughput* _ Max, 它是所有可能分配方式下系统吞吐量中的最大值即最大化系统吞吐量, 该准则将较大效益权重的空闲频谱分配给较大接入概率的次用户。

(3) 公平性准则

该准则下会产生一个最小的系统吞吐量方差 δ^2_{Min} 。该准则将具有较大效益权重的空闲频谱分配给较小接入概率的次用户, 使得各次用户的吞吐量更加均衡从而体现传输的公平性。

3 仿真与分析

主要利用 Matlab 软件对系统吞吐量和次用户传输公平性两个性能指标作仿真分析。仿真中模糊逻辑系统的输入参数范围设置如表 3 所示, 这些参数包括信道带宽、信道可用性、平均 *SINR* 值、次用户离基站的距离和次用户移动性。

表 3 CR 系统的参数设置

Table 3 Parameters setting of CR system

参数	值
信道带宽/MHz	5
信道可用性	0 ~ 1
平均 <i>SINR</i> /dB	3 ~ 10
距离/km	0 ~ 10
移动性/(km/h)	0 ~ 50

假设在基站 10 km 范围内随机产生 *N* 个次用户和 *M* 个空闲信道。为了便于分析, 我们讨论 *M* 与 *N* 相同的情况, 在认知用户数 *N* = 5、10、15、20、25、30 时对 3 种准则下系统性能进行仿真, 结果如图 5 和图 6 所示。

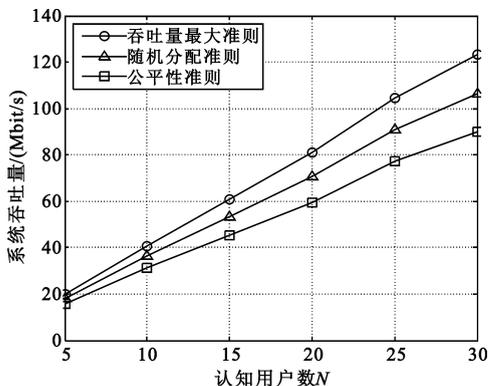


图 5 3 种准则下的系统吞吐量性能

Fig. 5 System throughput performance under 3 criteria

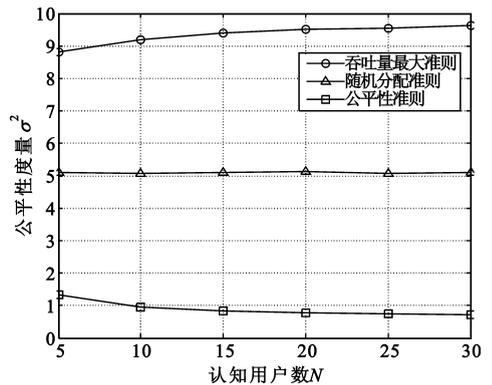


图 6 3 种准则下的次用户公平性性能

Fig. 6 SUs' fairness performance under 3 criteria

由图 5 知, 随着次用户数的增多系统吞吐量一直在增加, 因为此时可用的信道数也在增加。比较 3 种准则下的吞吐量可知, 吞吐量最大分配下 *Throughput* 最高, 而公平性分配准则下 *Throughput* 最低, 随机分配准则下的 *Throughput* 居中。由图 6 知, 吞吐量最大分配准则下的 δ^2 最大, 说明该方式下的次用户传输公平性最差, 并且随着次用户的增多这一趋势更加明显。随机分配准则下的 δ^2 居中且几乎不受次用户数的影响, 说明传输公平性一般且较稳定。公平性准则下的 δ^2 最小且随着次用户的增多而逐渐减小, 说明传输公平性最优且随着次用户的增多而变好。总的来说, 随机分配性能一般, 吞吐量最大准则突出了系统效益最大化的特点, 公平性准则更加突出了分配使次用户传输更公平的特点。

4 结论

模糊逻辑为包含非精确、不完全信息和复杂系统建模问题提供了一种有效的解决方法。本文提出了一种利用模糊逻辑的认知无线电频谱分配方案, 设计了 2 个 FLS 分别分析空闲频谱和次用户的特性, 仿真了在吞吐量最大、随机分配和公平性 3 种分配准则下所提方案的系统性能, 结果表明吞吐量最大准则和公平性准则各自具有的优点, 利用模糊逻辑解决 CR 系统频谱分配问题是可行和有效的。如何在方案中进行自适应频谱分配将是笔者下一步关注的方向。

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] 刘全,高俊,关建新,等.认知无线网络链路层关键技术的研究进展[J].电讯技术,2010,50(3):1-9.
LIU Quan, GAO Jun, GUAN Jian-xin, et al. Survey on Linker Layer Key Technologies in Cognitive Radio Networks [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(3):1-9. (in Chinese)
- [3] ZHENG H, PENG C. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access[C]//Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Communications. Seoul, Korea: IEEE, 2005:3132-3136.
- [4] CAO L, ZHENG H. Distributed rule-regulated spectrum sharing[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1):130-145.
- [5] 罗菊,付玲生.模糊逻辑在无线通信网络的进展[J].四川兵工学报,2010,31(10):148-150.
LUO Ju, FU Ling-sheng. Advance in fuzzy logic in Wireless Communication networks[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2010, 31(10):148-150. (in Chinese)
- [6] Hong-Sam T Le, Hung D Ly. Opportunistic Spectrum Access Using Fuzzy Logic for Cognitive Radio Networks[C]//Proceedings of 2008 IEEE Second International Conference on Communications and Electronics. Hoi An, Vietnam: IEEE, 2008:240-245.
- [7] 张国良,曾静,柯熙政,等.模糊控制及其 MATLAB 应用[M].西安:西安交通大学出版社,2002.
ZHANG Guo-liang, ZENG Jing, KE Xi-zheng, et al. Fuzzy Control and Its MATLAB Application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002. (in Chinese)
- [8] 杨晓燕,杨震,刘善彬.基于预测的认知无线电机机会频谱接入[J].重庆邮电大学学报,2009,21(1):14-19.
YANG Xiao-yan, YANG Zhen, LIU Shan-bin. Forecast-based opportunistic spectrum access for cognitive radio net-

works[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunication, 2009, 21(1): 14-19. (in Chinese)

- [9] Na Do-Hyun, Nan Hao, Yoo Sang-Jo. Policy-based Dynamic Channel Selection Architecture for Cognitive Radio Networks [C]//Proceedings of the Second International Conference on Communication and Networking in China. Shanghai: IEEE, 2007:1190-1194.

作者简介:

文凯(1972-),男,重庆长寿人,2008年获电子科技大学博士学位,现为教授级高级工程师、硕士生导师,主要从事移动通信及认知网络的研究;

WEN Kai was born in Changshou, Chongqing, in 1972. He received the Ph. D. degree in University of Electronic Science and Technology of China in 2008. He is now a senior engineer of professor and also the instructor of graduate student. His research interests include mobile communication and cognitive radio networks.

Email: kai.wen@163.net

付玲生(1985-),男,安徽庐江人,硕士研究生,主要研究方向为认知无线电系统中的频谱分配;

FU Ling-sheng was born in Lujiang, Anhui Province, in 1985. He is now a graduate student. His research direction is spectrum allocation for cognitive radio.

Email: fulingsheng0512@163.com

傅小玲(1986-),女,重庆万州人,硕士研究生,主要研究方向为认知无线电系统中的频谱分配。

FU Xiao-ling was born in Wanzhou, Chongqing, in 1986. She is now a graduate student. Her research direction is spectrum allocation for cognitive radio.

Email: wsfx11389628@126.com

工业和信息化部期刊出版专业技术人员 继续教育培训圆满完成

3月13日至19日,由新闻出版总署教育培训中心和工业和信息化部(简称工信部)科技期刊管理办公室组织的期刊出版专业技术人员继续教育培训班在北京举办,工信部科技期刊管理办公室主管的期刊出版专业技术人员参加了培训,本刊编辑部派出了3名人员参加此次培训。

此次培训是根据《出版专业技术人员继续教育暂行规定》(新出政发[2010]10号)文件要求而举办的,目的是帮助工信部科技期刊管理办公室主管的期刊出版专业技术人员完成规定学时的继续教育,提高出版技术人员的业务水平,促进各期刊的健康发展。培训班邀请了出版及相关领域资深讲师,结合工信部科技期刊出版实际情况,从出版法规、编辑规范、编辑业务等实用业务知识方面进行了培训,尤其是针对2009—2010年度工信部期刊评比中发现的主要编辑差错、共性问题等进行的分析,使参训人员受益匪浅。全部参训人员学完规定课程后参加并通过了考试,获得了由新闻出版总署教育培训中心颁发的继续教育培训合格证书。

此次培训密切结合了科技期刊的实际情况,取得了预期的效果,必将促进科技期刊质量、规范化的进一步提高。

《电讯技术》编辑部