

文章编号: 1001 - 893X(2011)08 - 0006 - 05

# 协作认知网络中基于融合准则与感知时间联合优化的策略\*

崔微微, 赵海峰, 穆晓敏

(郑州大学 信息工程学院, 郑州 450001)

**摘要:**在协作频谱感知网络中,感知时间和数据融合准则均影响着感知性能。假设控制信道为二进制对称信道的前提下,基于“ $k$  秩准则”建立了协作感知网络吞吐量优化问题的数学模型,目的是在保护主用户利益的前提下联合优化感知时间和  $k$  值使认知网络吞吐量最大化。理论分析了最优感知时间和  $k$  值的存在性,并进行了相关的计算机仿真。仿真结果表明:所提议的联合优化策略显著提高了协作感知网络的吞吐量,且认知网络的吞吐量对控制信道状态的变化具有鲁棒性。

**关键词:**认知无线电;协作频谱感知;融合准则;感知时间;吞吐量优化

**中图分类号:** TN92    **文献标识码:** A    **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.08.002

## Fusion Rule and Sensing Time Joint Optimization in Cooperative Spectrum Sensing Networks

CUI Wei-wei, ZHAO Hai-feng, MU Xiao-min

(Information Engineering School, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In cooperative spectrum sensing networks, the performance of the spectrum sensing is influenced by the sensing time and data fusion scheme. In this paper, under the assumption of BSC (Binary Symmetric Channel) control channel, the “ $k$  - out - of -  $N$ ” fusion rule is used to formulate a throughput tradeoff problem that is to jointly optimize the sensing time and  $k$  in order to maximize the throughput of secondary network. The existence of a pair of optimal sensing time and  $k$  value are analysed theoretically and some related computer simulations are performed. The simulation results demonstrate that when the joint optimization strategy proposed is employed, the throughput of the secondary networks is improved and its robustness is strengthened too.

**Key words:** cognitive radio; cooperative spectrum sensing; fusion rule; sensing time; throughput tradeoff

### 1 引言

频谱感知是认知无线电的关键技术之一,其目的是为认知用户提供可靠的瞬时信道利用信息。目前已有的频谱感知技术分为非协作和协作感知两大类。协作感知能够融合多个认知用户检测到的主用户信息,相对于单用户感知,可提高检测的准确性和

可靠性<sup>[1]</sup>。

近年来,协作频谱感知的研究集中在在一定的约束条件下给出一个折衷优化问题:大多数文献研究了在限定虚警概率的条件下使得检测概率最大化<sup>[2-8]</sup>;另一些文献研究了在限制认知用户对主用户的干扰的情况下使得吞吐量最大化<sup>[9-12]</sup>。协作感知网络的吞吐量与认知用户的数量、感知时间、主用户的接收信噪比、本地检测判决门限、融合策略、

\* 收稿日期:2011-03-02;修回日期:2011-04-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60702020)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No.60702020)

感知信道与控制信道等多种因素相关,因此提高吞吐量的问题是一个复杂的联合优化问题。文献[9-11]在固定的融合准则下优化感知时间来使吞吐量最大化。文献[12]将融合准则和感知时间联合起来优化吞吐量,但并没有考虑实际的控制信道。本文基于“k 秩准则”,在保护主用户的前提下,联合优化 k 值和感知时间来使得吞吐量最大。并且,本文在建立协作感知网络模型时,不再认为控制信道是理想的,而是将控制信道考虑为具有错误概率的二进制对称信道(BSC)。

论文结构安排如下:第 2 部分给出协作感知系统的模型及吞吐量的概念,第 3 部分给出融合准则和感知时间联合优化的数学模型,第 4 部分为计算机仿真结果与分析,最后是结论。

## 2 协作频谱感知

### 2.1 本文提议的协作频谱感知系统模型

协作感知网络由主用户、认知用户和融合中心组成。协作感知过程的完成需要经过两个信道,即感知信道(主用户和认知用户之间的信道)和控制信道(认知用户和融合中心之间的信道)。协作感知过程如图 1 所示。

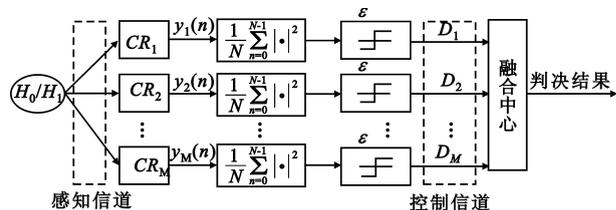


图 1 协作感知过程框图

Fig.1 Block diagram of cooperative sensing

首先,认知用户通过感知信道进行本地检测,假设有 M 个认知用户,第 i 个认知用户感知的信号  $y_i(n)$  满足以下二元假设:

$$\begin{aligned}
 H_0: y_i(n) &= u_i(n) \\
 H_1: y_i(n) &= h_i(n)s(n) + u_i(n)
 \end{aligned} \tag{1}$$

式中,  $H_0$ 、 $H_1$  分别表示主用户不存在和存在的假设,  $u_i(n)$  是均值为 0、方差为  $\sigma_u^2$  的高斯噪声,  $s(n)$  是主用户信号,  $h_i(n)$  为感知信道增益,  $|h_i(n)|$  服从瑞利分布。假定认知用户间的距离远小于主用户和认知用户间的距离,则所有的信道增益有相同的

方差,即  $E |h_i(n)|^2 = \sigma_h^2, i = 1, 2, \dots, M$  [13]。

如图 1 所示,假设每个认知用户采用能量检测进行本地频谱感知,则检测统计量为

$$T_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y_i(n)|^2, i = 1, 2, \dots, M \tag{2}$$

式中, N 为感知时间内的抽样点数。不失一般性,本文假设主用户信号和噪声均为复数值高斯信号。当 N 足够大时,利用中心极限定理可得概率:

$$P(T_i > \epsilon | H_0) = \phi\left(\left(\frac{\epsilon}{\sigma_u^2} - 1\right)\sqrt{\tau f_s}\right) \tag{3}$$

$$P(T_i > \epsilon | H_1) = \phi\left(\left(\frac{\epsilon}{\sigma_u^2(\gamma + 1)} - 1\right)\sqrt{\tau f_s}\right) \tag{4}$$

式中,  $\tau$  是感知时间,  $f_s$  表示抽样频率。其中:

$$\phi(x) = 1/\sqrt{2\pi} \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt$$

认知用户进行本地检测后,接着做出本地判决。假设所有的认知用户采用相同的判决门限  $\epsilon$ , 当  $T_i > \epsilon$  时,认知用户 i 做出判决  $D_i = 1$ , 即认为主用户存在; 当  $T_i < \epsilon$  时,认知用户 i 做出判决  $D_i = 0$ , 即认为主用户不存在。然后,各认知用户将判决结果  $D_i$  通过控制信道发送到融合中心。大多文献将控制信道假设为理想状态,实际中由于干扰和噪声的存在,认知用户不可能将判决结果毫无差错地发送到融合中心。由于认知用户向融合中心发送的为二进制数,在本文的研究中假定认知用户和融合中心之间的控制信道为二进制对称信道,以信道的传输错误概率  $P_{e,i}$  描述信道的优劣 [14], 则考虑控制信道影响后每个认知用户的虚警和检测概率分别为

$$\begin{aligned}
 P_{f,i}(\tau, \epsilon) &= P(T_i > \epsilon | H_0)(1 - p_{e,i}) + \\
 &\quad (1 - P(T_i > \epsilon | H_0))p_{e,i}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 P_{d,i}(\tau, \epsilon) &= P(T_i > \epsilon | H_1)(1 - p_{e,i}) + \\
 &\quad (1 - P(T_i > \epsilon | H_1))p_{e,i}
 \end{aligned} \tag{6}$$

最后,融合中心采用一定的融合准则(如“或准则”、“与准则”、“k 秩准则”等)融合各用户的判决信息,并进行决策判决。“k 秩准则”在  $k = 1$  时即为“或准则”,  $k = M$  时即为“与准则”,因此该准则中 k 的取值不同将影响融合性能。不失一般性,本文采用“k 秩准则”,并将 k 的取值作为联合优化约束条件。假设所有认知用户的虚警概率和检测概率都是相同的,即  $P_{f,i} = P_f, P_{d,i} = P_d$ , 则计入“k 秩准则”的影响后,协作感知系统的全局虚警概率和检测概率分别为

$$Q_f(\tau, \varepsilon, k) = \sum_{i=k}^M C_M^i P_f^i (1 - P_f)^{M-i} \quad (7)$$

$$Q_d(\tau, \varepsilon, k) = \sum_{i=k}^M C_M^i P_d^i (1 - P_d)^{M-i} \quad (8)$$

由此,全局虚警概率和检测概率被描述为感知时间、判决门限、 $k$  值的函数,进而感知性能也归结为 3 个约束条件下的联合优化问题。

## 2.2 优化问题的数学描述

为了保证主用户出现时,认知用户能及时腾出信道,认知用户周期性地地进行频谱感知。一周帧由感知时间  $\tau$  和数据传输时间  $T - \tau$  组成,如令  $C_0$  和  $C_1$  分别表示主用户不存在和存在时认知用户的吞吐量,  $P(H_0)$  和  $P(H_1)$  分别表示主用户不存在和存在的概率,则根据认知用户使用授权频带的情况,吞吐量有以下两种计算方法。

(1) 主用户不存在且认知用户通过检测后判断主用户不存在时,认知网络可达到的吞吐量为

$$R_0(\tau, \varepsilon, k) = \frac{T - \tau}{T} C_0 (1 - Q_f(\tau, \varepsilon, k)) P(H_0) \quad (9)$$

(2) 主用户存在而认知用户通过检测后判断主用户不存在时,认知网络可达到的吞吐量为

$$R_1(\tau, \varepsilon, k) = \frac{T - \tau}{T} C_1 (1 - Q_d(\tau, \varepsilon, k)) P(H_1) \quad (10)$$

那么认知网络的平均吞吐量为<sup>[9]</sup>

$$R(\tau, \varepsilon, k) = R_0(\tau, \varepsilon, k) + R_1(\tau, \varepsilon, k) \quad (11)$$

## 3 融合准则和感知时间联合优化策略

在采用“ $k$  秩准则”和固定错误概率  $P_{e,i}$  的情况下,协作感知网络吞吐量优化问题为在保护主用户的前提下联合优化感知时间、 $k$  值和判决门限  $\varepsilon$  来最大化吞吐量,此优化问题的数学模型为

$$\begin{aligned} \max_{\tau, \varepsilon, k} R(\tau, \varepsilon, k) \\ \text{s.t. } Q_d(\tau, \varepsilon, k) \geq \bar{Q}_d \end{aligned} \quad (12)$$

文献[12]已证明  $R_0(\tau, \varepsilon) \gg R_1(\tau, \varepsilon)$  且当且仅当  $Q_d = \bar{Q}_d$  时  $R_0(\tau, \varepsilon, k)$  最大,因此式(12)可简化为

$$\begin{aligned} \max_{\tau, \varepsilon, k} R_0(\tau, \varepsilon, k) \\ \text{s.t. } Q_d(\tau, \varepsilon, k) = \bar{Q}_d \end{aligned} \quad (13)$$

将  $Q_d(\tau, \varepsilon, k) = \bar{Q}_d$  代入式(8)可得  $\bar{p}_d$ , 然后由  $\bar{p}_d$  和式(4)、式(6)可得判决门限:

$$\varepsilon(\tau, k) = \sigma_u^2 (\gamma + 1) \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{f_s \tau}} \phi^{-1} \left( \frac{\bar{p}_d - p_e}{1 - 2p_e} \right) \right] \quad (14)$$

则式(13)可简化为

$$\begin{aligned} \max_{\tau, k} R_0(\tau, k) \\ \text{s.t. } 0 \leq \tau \leq T \\ 1 \leq k \leq M \end{aligned} \quad (15)$$

即吞吐量优化问题转化为联合优化最优感知时间  $\tau$  和“ $k$  秩准则”的  $k$  值来使得吞吐量最大化。接下来我们来证明存在一对最优的  $\tau$  和  $k$ 。

首先证明对于给定的  $k = \bar{k}$ , 存在最优的  $\tau$  使得吞吐量最大。令  $\bar{R}_0(\tau) = R_0(\tau, \bar{k})$ ,  $\bar{Q}_f(\tau) = Q_f(\tau, \bar{k})$ ,  $\bar{p}_f(\tau) = p_f(\tau, \bar{k})$ 。  $\bar{R}_0(\tau)$ 、 $\bar{Q}_f(\tau)$ 、 $\bar{p}_f(\tau)$  的一阶导数分别为

$$\begin{aligned} \nabla \bar{R}_0(\tau) = -\frac{C_0}{T} P(H_0) (1 - \bar{Q}_f(\tau) + \\ (T - \tau) \nabla \bar{Q}_f(\tau)) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\nabla \bar{Q}_f(\tau) = \bar{k} \left( \frac{M}{\bar{k}} \right) \bar{p}_f(\tau)^{k-1} (1 - \bar{p}_f(\tau))^{M-k} \nabla \bar{p}_f(\tau) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \nabla \bar{p}_f(\tau) = -\gamma \sqrt{\frac{f_s}{8\pi\tau}} \exp\left(-\frac{[(\gamma+1)m + \gamma\sqrt{\tau f_s}]^2}{2}\right) \\ (1 - 2p_e) \end{aligned} \quad (18)$$

显然,

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \nabla \bar{R}_0(\tau) = \infty \quad (19)$$

$$\lim_{\tau \rightarrow T} \nabla \bar{R}_0(\tau) = -\frac{C_0}{T} P(H_0) (1 - \bar{Q}_f(T)) < 0 \quad (20)$$

由式(19)和式(20)可得:存在  $\tau \in (0, T)$  使得吞吐量最大。将每个  $k$  值时的最大吞吐量进行比较就能得到一组最优的  $\tau$  和  $k$ 。

## 4 计算机仿真与结果分析

利用计算机仿真对式(15)进行求解,并与采用“或准则”和“与准则”时的性能进行比较。假设帧长  $T = 20$  ms, 抽样频率  $f_s = 6$  MHz, 认知用户数  $M = 25$ , 平均接收信噪比变化范围为  $-30 \sim 0$  dB。为了体现对主用户的保护,令  $\bar{Q}_d = 0.9999$ 。

### 4.1 不同融合准则下吞吐量的比较

图2给出了理想控制信道即  $P_e = 0$  时,不同融合准则下的归一化吞吐量和感知时间的关系。由图2可得到:采用最优的  $k$  值,归一化吞吐量明显要大于“或准则”和“与准则”,特别地,采用最优  $k$  值的吞吐量几乎为采用“与准则”时的 4 倍,且采用最优

$k$  值时,所需的最优感知时间减小了。

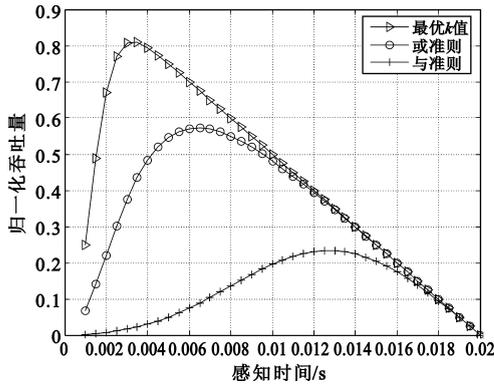


图 2  $p_e = 0$  时,不同融合准则下归一化吞吐量和感知时间的关系

Fig.2 Relationship between false alarm probability and sensing time under different fusion rule when  $p_e = 0$

### 4.2 控制信道质量对吞吐量的影响

图 3 给出了分别采用最优  $k$  值和“或准则”时信道恶化程度不同即  $p_e$  不同时,归一化吞吐量和感知时间的关系。由图 3 可看出:采用最优  $k$  值,控制信道的优劣对吞吐量影响不大;而采用“或准则”时,当控制信道较为恶劣时,严重影响了系统的吞吐量,如  $p_e = 0.1$  时,吞吐量还不到 0.1。图 2 和图 3 说明联合优化  $k$  值和感知时间时不仅提高了吞吐量,而且系统性能比较稳定,对控制信道状态的变化具有鲁棒性。

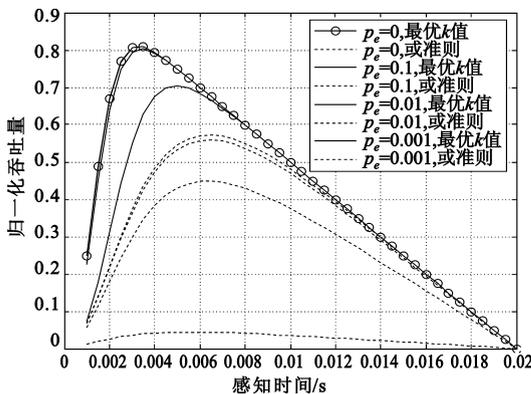


图 3 最优  $k$  值和“或准则”下不同  $p_e$  时的归一化吞吐量和感知时间的关系

Fig.3 Relationship between throughput and sensing time under different  $p_e$  and fusion rule

### 4.3 不同控制信道和信噪比下的最优 $k$ 值和感知时间

图 4 和图 5 给出了不同  $p_e$  值下,不同信噪比时

的最优  $k$  值和感知时间。由图 4 可以看出,不存在一个固定的  $k$  值在各种情况下均是最优的。由图 5 可以看出,  $p_e$  对不同信噪比下的最优感知时间影响不大,信噪比较低时,如  $-30 \sim -23$  dB,用于感知的时间大于帧长度的一半。图 4 和图 5 中,  $p_e = 0.001$ ,  $p_e = 0.0001$  和  $p_e = 0$  时最优  $k$  值和感知时间均几乎重合,同时图 3 中的最优吞吐量也近似相等,则控制信道错误概率的数量级在  $10^{-3}$  以下时,可以假设为理想的。

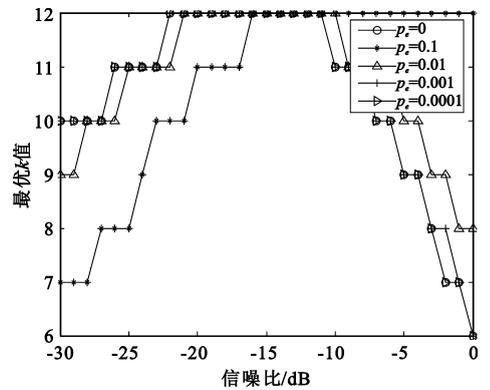


图 4 不同  $p_e$  值和信噪比下的最优  $k$  值  
Fig.4 The optimal  $k$  under different  $p_e$  and SNR

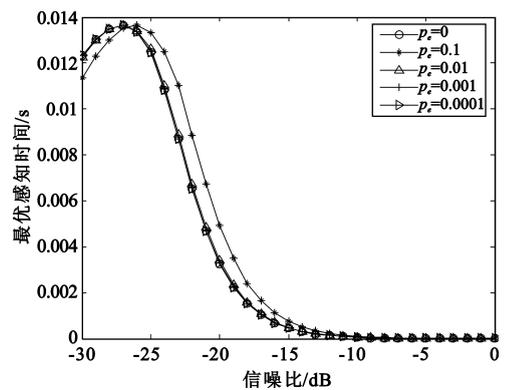


图 5 不同  $p_e$  值和信噪比下的最优感知时间  
Fig.5 The optimal sensing time under different  $p_e$  and SNR

## 5 结论

本文在采用“ $k$  秩准则”且考虑实际的控制信道的情况下建立了协作频谱感知吞吐量权衡模型,以联合优化  $k$  值和感知时间来达到最大的吞吐量,并对此进行了理论分析和计算机仿真。通过仿真可以得到,采用最优  $k$  值时达到的最大吞吐量相对于“或准则”和“与准则”明显提高了,而且此时系统性

能比较稳定,吞吐量不易受到控制信道优劣状态的影响。所以,在数据融合之前计算出最优的  $k$  值并采用最优  $k$  值进行数据融合是十分有意义的。本文在建立模型时将控制信道考虑为最简单的 BSC 信道,读者可以考虑实际的较为复杂的情况,如瑞利衰减信道等。

## 参考文献:

- [1] Amir Ghasemi, Elvino S Sousa. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environment[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Maryland, USA; IEEE, 2005: 131 - 136.
- [2] Visotsky E, Kuffner S, Peterson R. On collaborative detection of TV transmissions in support of dynamic spectrum sensing[C]//Proceedings of the First IEEE Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks. Baltimore, USA; IEEE, 2005: 131 - 136.
- [3] Kattipur A K, Hoang A T, Er M J. Data and decision fusion for distributed spectrum sensing in cognitive radio networks [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Information, Communications and Signal Processing. Singapore: IEEE, 2007: 1 - 5.
- [4] Ghasemi A, Sousa E S. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environment [C]//Proceedings of the First IEEE Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks. Baltimore, USA: IEEE, 2005: 338 - 345.
- [5] Quan Z, Cui S, Sayed A H. Optimal linear cooperation for spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2(1): 28 - 40.
- [6] Umikrishnan J, Veeralaloli V V. Cooperative sensing for primary detection in cognitive radio [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2(1): 18 - 27.
- [7] Ganesan G, Li Y G. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio - part I: two user networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(6): 2204 - 2213.
- [8] Ganesan G, Li Y G. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio - part II: multiuser networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(6): 2214 - 2222.
- [9] Liang Y C, Zeng Y, Peh E C Y, et al. Sensing throughput tradeoff for cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1326 - 1337.
- [10] Quan Z, Cui S, Sayed A H, et al. Wideband spectrum sensing in cognitive radio networks [C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Communications. Beijing, China: IEEE, 2008: 901 - 906.
- [11] Quan Z, Cui S, Sayed A H, et al. Optimal multiband joint detection for spectrum sensing in dynamic spectrum access networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(3): 1128 - 1140.
- [12] Peh E Y, Liang Y C, Zeng Y H. Optimization of Cooperative Sensing in Cognitive Radio Networks: A sensing throughput tradeoff View [C]//Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Communications. Dresden: IEEE, 2009: 1 - 5.
- [13] Zhang W, Mallik R K, Letaief K B. Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive radio networks [C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Communications. Beijing, China: IEEE, 2008: 3411 - 3415.
- [14] ZHANG Wei, Letaief K B. Cooperative Spectrum Sensing with Transmit and Relay Diversity in Cognitive Radio Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12): 4761 - 4766.

## 作者简介:

崔微微(1987—),女,河南新乡人,2009年于解放军信息工程大学获工学学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为认知无线电协作感知;

CUI Wei - wei was born in Xinxiang, Henan Province, in 1987. She received the B.S. degree from PLA Information Engineering University in 2009. She is now a graduate student. Her research concerns cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks.

Email: yvhaoming@126.com

赵海峰(1984—),男,河南扶沟人,2003年于郑州大学获工学学士学位,现为博士研究生,主要研究方向为认知无线电协作感知;

ZHAO Hai - feng was born in Fugou, Henan Province, in 1984. He received the B.S. degree from Zhengzhou University in 2003. He is currently working toward the Ph.D. degree. His research concerns spectrum sensing in cognitive radio networks.

Email: zhf198769@163.com

穆晓敏(1955—),女,河南郑州人,郑州大学教授、博士生导师,主要研究方向为通信信号处理、图像信号处理、数字水印技术、认知无线电技术等。

MU Xiao - min was born in Zhengzhou, Henan Province, in 1955. She is now a professor and also the Ph.D. supervisor. Her research interests include signal processing, image signal processing, digital watermarking technology, cognitive radio and so on.

Email: iexmmu@zzu.edu.cn