

新的感知无线电信道模型及其容量分析

谢显中, 杨志花, 郑轶

(重庆邮电大学 个人通信研究所 计算机网络与通信信息产业部重点实验室, 重庆 400065)

摘 要: 将新的感知无线电信道模型将交织型信道模型和干扰型信道模型结合在一起, 引入开关的概念, 将频谱空洞的检测融合在信道中, 形成有部分主用户信息的感知无线电双用户信道模型。在这种新的信道模型中, 将主用户和感知用户之间的信道看作是一个压缩信道, 引入压缩率, 感知用户通过一个压缩信道来感知主用户的部分信息。针对新的感知信道模型, 分析并计算了相应信道容量。最后, 仿真验证了理论模型的有效性和容量优势。

关键词: 感知无线电信道; 压缩信道; 部分信息; 信道容量

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2010)06-0136-05

New cognitive radio channel model and the analysis of its capacity

XIE Xian-zhong, YANG Zhi-hua, ZHENG Yi

(Institute of Personal Communication MII Key Lab on Computer Network and Communication of Chongqing
University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: New cognitive radio channel model is the combination of the interweave channel and the interference channel. By introducing the switch concept, the spectrum hole sensing was combined the channel model. So a new cognitive radio two-user channel model with partial knowledge of the primary messages at the cognitive transmitter was proposed. First, the channel between the primary user and the second user was modeled as a compression channel and introduced the compression rate. Then, the channel capacity was analyzed and calculated. Finally, numerical results illustrate the validity of the new channel model and the advantage of its capacity.

Key words: cognitive radio channel; compression channel; partial knowledge; channel capacity

1 引言

感知无线电技术是无线电发展的一个新的里程碑^[1], 它能够自动地检测周围的环境情况, 智能地调整系统的参数以适应环境的变化, 在不对授权用户造成干扰的条件下从空间、频率、时间等多维地利用空闲频谱资源进行通信。目前, 感知无线电技术的研究已取得许多进展^[2], 但是有关感知无线电信道的研究还有很大差距, 已提出的感知无线电信

道模型的建立主要包括 2 种: 交织型信道模型^[3]、干扰型信道模型^[4~7]。

文献[3]提出了一种双开关交织型信道模型, 主要工作仅仅集中在检测频谱空洞。文献[4,5]提出了一种双用户干扰信道模型, 即发送端 1 和发送端 2 共同争用同一信道, 发送端 1 可以获得发送端 2 发送的编码信息, 在这种情况下可以获得更高的信道容量, 通常情况下, 可以把发送端 1 看作感知用户, 发送端 2 看作主用户, 在这种模型中, 最关键的问

收稿日期: 2009-05-25; 修回日期: 2010-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60872037); 重庆市自然科学基金资助项目 (2008BB2411); 重庆市教委应用基础研究基金资助项目 (KJ080508)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60872037); The Natural Science Foundation of Chongqing (2008BB2411); The Educational Committee Application Base Research Foundation Program of China (KJ080508)

题就是感知用户对主用户信息的获取能力。文献 [6,7] 提出一种频率选择性衰落情况下的双用户感知无线电信道模型，其中假设感知用户可以获得主用户的全部信息。

基于此，本文提出了一种新的感知无线电信道模型，该模型将交织型信道模型和干扰型信道模型结合在一起，引入开关的概念^[8]，将频谱空洞的检测融合在信道中，形成有部分主用户信息的感知无线双用户信道模型。在这种新的信道模型中，将主用户和感知用户之间的信道看作是一个压缩信道，引入压缩率，感知用户通过一个压缩信道来感知主用户的部分信息，这里的感知不仅仅包括检测主用户的存在性，检测到主用户存在后，还可以获得主用户的部分信息。针对新的感知信道模型，分析并计算了相应信道容量。最后，仿真验证了理论模型的有效性，说明了信道容量和 2 个参数的关系，这 2 个参数分别是感知用户用来传输自身信息所消耗的功率百分比和压缩率，功率百分比越大，压缩率越小，信道容量就越大，在实际中要折中考虑这 2 个参数。

2 新的频率选择性感知无线电双用户信道模型

2.1 传统的感知无线电双用户信道模型

感知无线电信道模型首先在文献 [4] 中被提出，主用户传输链路和感知用户传输链路使用同一个传输媒质（使用同一个信道）。在感知信道模型中，感知用户使用其感知能力可以获取主用户信息。如图 1 所示，把发射机 1—接收机 1 看作是感知用户传输链路，发射机 2—接收机 2 看作是主用户传输链路，其中，发射机 1 发送信息 $X_{1,k}$ 到接收机 1，消耗功率为 $P_{1,k}$ ，发射机 2 发送信息 $X_{2,k}$ 到接收机 2，

消耗功率为 $P_{2,k}$ 。

由图 1 可知，感知用户不仅知道自己的信息 $W_{1,k}$ ，而且可以获得主用户的全部信息 $W_{2,k}$ 。

在第 k 个子信道，发射机 1 利用它的功率 $P_{1,k}$ 的 $(1-\alpha_k)$ 部分来传输 $W_{2,k}$ ，接收端所收到的信号可以表示为

$$Y_{1,k} = a_{11,k} X_{1,k} + a_{21,k} X_{2,k} + V_{1,k} \quad (1)$$

$$Y_{2,k} = a_{12,k} X_{1,k} + a_{22,k} X_{2,k} + V_{2,k} \quad (2)$$

其中， $\{a_{ij,k}\}$ 表示第 k 个子信道上发送端 i 和接收端 j 之间的信道增益。 $\{V_{i,k}\}$ 是均值为 0，方差为 N_i 的高斯噪声，其中 $i=1,2$ 。

另外，假设 $X_{1,k}$ 和 $X_{2,k}$ 都采用平均功率约束为

$$E[X_{i,k}^2] \leq P_{i,k}, i \in \{1,2\} \quad (3)$$

本文考虑的两用户之间的干扰为弱干扰^[9]。 $R_{i,k}$ 表示用户 i 在第 k 个子信道上的传输速率，定义系数 $H_{ij,k} = (a_{ij,k}^2) / N_{i,k}$ 。根据文献 [10]，可以得出系统模型的容量如下：

$$R_{1,k} \leq C \left(\frac{\alpha_k P_{1,k} H_{11,k}}{N_{1,k}} \right) \quad (4)$$

$$R_{2,k} \leq C \left(\frac{(\sqrt{(1-\alpha_k) P_{1,k} H_{12,k}} + \sqrt{P_{2,k} H_{22,k}})^2}{N_{2,k} + \alpha_k P_{1,k} H_{12,k}} \right) \quad (5)$$

其中， $C(x) = \frac{1}{2} \text{lb}(1+x)$ 。

2.2 新的感知无线电双用户信道模型

在实际中，感知用户不可能得到主用户的全部信息，所以本文对传统双用户感知无线电信道模型进行改进，提出一种新的感知无线电双用户信道模型，如图 2 所示。该模型将交织型信道模型和干扰

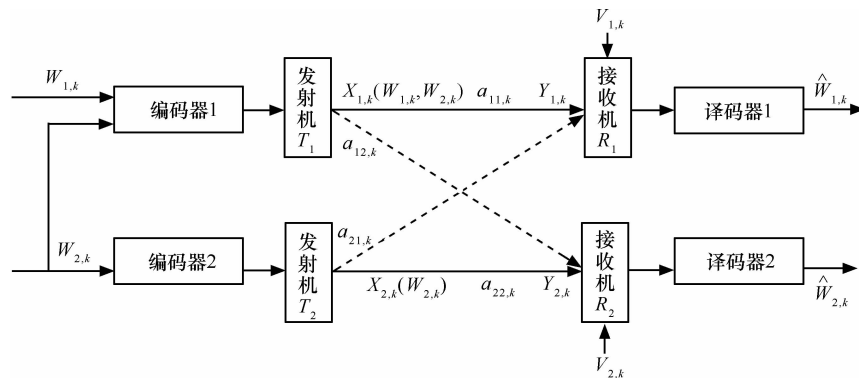


图 1 第 k 个感知无线电双用户子信道模型

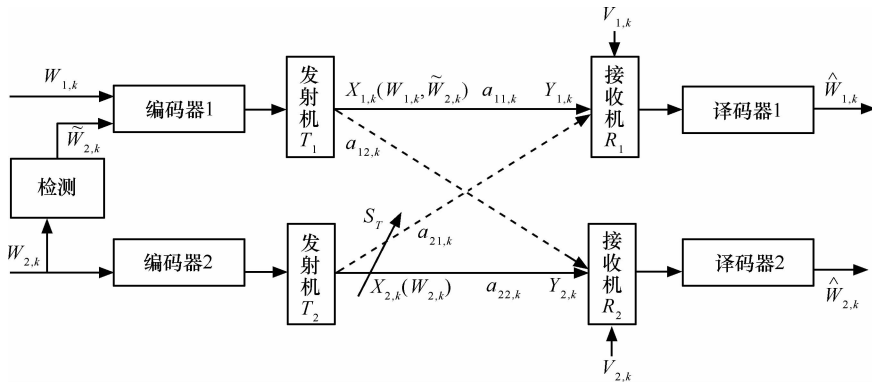


图 2 新的双用户感知无线电信道模型

型信道模型结合在一起，引入开关的概念，将频谱空洞的检测融合在信道中，形成有部分主用户信息的感知无线电双用户信道模型。

这里的感知用户只能得到主用户的部分信息，感知用户和主用户之间可以通过一个压缩信道来建立，从而获得主用户的部分信息， $\tilde{W}_{2,k}$ 表示感知用户得到的部分主用户信息。这里的检测包括两方面的内容，其中一方面的内容是可以检测主用户的存在性，所以在发射机 2—接收机 2 链路上引入了一个开关 S_T ， S_T 取值如下：

$$S_T = \begin{cases} 0, & \text{主用户不存在} \\ 1, & \text{主用户存在} \end{cases} \quad (6)$$

接收端所收到的信号可以表示为

$$Y_{1,k} = a_{11,k} X_{1,k} + S_T a_{21,k} X_{2,k} + V_{1,k} \quad (7)$$

$$Y_{2,k} = (a_{12,k} X_{1,k} + a_{22,k} X_{2,k} + V_{2,k}) S_T \quad (8)$$

当 $S_T = 0$ 时， $\begin{cases} Y_{1,k} = a_{11,k} X_{1,k} + V_{1,k}, \\ Y_{2,k} = 0 \end{cases}$ ；当 $S_T = 1$ 时，

$$\begin{cases} Y_{1,k} = a_{11,k} X_{1,k} + a_{21,k} X_{2,k} + V_{1,k} \\ Y_{2,k} = a_{12,k} X_{1,k} + a_{22,k} X_{2,k} + V_{2,k} \end{cases}。$$

当检测到主用户存在时，通过压缩信道获得主用户的部分信息，这样将主用户和感知用户之间的信道看作是一个压缩信道。根据速率压缩理论^[11]，引入压缩率，假设 $W_{2,k}$ 是高斯的，感知信道（压缩信道）可以通过压缩随机变量 E 表达如下：

$$W_{2,k} = \tilde{W}_{2,k} + E, \quad E \sim N(0, D) \quad (9)$$

其中， $D = \beta E[W_{2,k}^2] = \beta E[X_{2,k}^2]$ ， β 为压缩率，是一个常数。当 $\beta = 1$ 时，压缩最大，没有检测到任何

信息；当 $\beta = 0$ 时，压缩最小，检测到主用户的全部信息。

3 新的感知无线电双用户信道模型的容量分析与计算

由 $W_{2,k}$ 产生的压缩随机变量 E 对于编码器 1 是不知道的，所以可以把它看作是发射机 1—接收机 1 链路上的加性干扰。利用式(4)和式(5)，当主用户存在时，在发射机 1—接收机 1 链路上的容量可以表示如下：

$$\begin{aligned} R_{1,k} &\leq C\left(\frac{\alpha_k P_{1,k} H_{11,k}}{N_{1,k} + D}\right) = \frac{1}{2} \text{lb}\left(1 + \frac{\alpha_k P_{1,k} H_{11,k}}{N_{1,k} + D}\right) \\ &= \frac{1}{2} \text{lb}\left(1 + \frac{\alpha_k P_{1,k} H_{11,k}}{N_{1,k} + \beta E[X_{2,k}^2]}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

而在发射机 2—接收机 2 这条链路上，因为主用户端不知道感知用户的任何信息，所以其容量表达式是不变的，表示为

$$\begin{aligned} R_{2,k} &\leq C\left(\frac{(\sqrt{(1-\alpha_k)P_{1,k}H_{12,k}} + \sqrt{P_{2,k}H_{22,k}})^2}{N_{2,k} + \alpha_k P_{1,k}H_{12,k}}\right) \\ &= \frac{1}{2} \text{lb}\left(1 + \frac{(\sqrt{(1-\alpha_k)P_{1,k}H_{12,k}} + \sqrt{P_{2,k}H_{22,k}})^2}{N_{2,k} + \alpha_k P_{1,k}H_{12,k}}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

下面分 2 种情况来计算容量。

1) 当 $S_T = 0$ 时，即主用户不存在时，容量计算如下：

$$C_{1,k} = C\left(\frac{P_{1,k}H_{11,k}}{N_{1,k}}\right) = \frac{1}{2} \text{lb}\left(1 + \frac{P_{1,k}H_{11,k}}{N_{1,k}}\right) \quad (12)$$

2) 当 $S_T = 1$ 时，即感知用户可以获得主用户的部分信息，由式(13)可得到。

$$R_{1,k} \leq C \left(\frac{\alpha_k P_{1,k} H_{11,k}}{N_{1,k} + H_{21,k} D} \right) = \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \frac{\alpha_k P_{1,k} H_{11,k}}{N_{1,k} + H_{21,k} D} \right) = \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \frac{\alpha_k P_{1,k} H_{11,k}}{N_{1,k} + H_{21,k} \beta E[X_{2,k}^2]} \right) \quad (13)$$

所以，感知无线电信道的容量主要与 β 和 α_k 这 2 个参数有关。

首先考虑 α_k 对它的影响。由于感知发射机 T_1 不应该引起发射机 2—接收机 2 速率的损失，于是，

$R_{2,k}$ 有一个上限 $C \left(\frac{P_{2,k} H_{22,k}}{N_{2,k}} \right)$ ，可以得到下面一个不等式方程：

$$R_{2,k} \leq C \left(\frac{(\sqrt{(1-\alpha_k) P_{1,k} H_{12,k}} + \sqrt{P_{2,k} H_{22,k}})^2}{N_{2,k} + \alpha_k P_{1,k} H_{12,k}} \right) \leq C \left(\frac{P_{2,k} H_{22,k}}{N_{2,k}} \right) \quad (14)$$

解这个方程可以得出：

$$0 < \alpha_k \leq 1 - \frac{P_{2,k} H_{22,k} \left(\sqrt{P_{1,k} H_{12,k} (P_{2,k} H_{22,k} + N_{2,k}) + N_{2,k}^2} + N_{2,k} \right)^2}{P_{1,k} H_{12,k} (P_{2,k} H_{22,k} + N_{2,k})^2} \quad (15)$$

然后，需要最大化发射机 1—接收机 1 链路的传输速率，所以在第 k 个子信道上，为了不影响发射机 2—接收机 2 速率的损失，发射机 1—接收机 1 链路的容量的最大值如式(16)所示。

$$C_{1,k|\alpha_k=\delta_{1,k}} = C \left(\frac{\delta_{1,k} P_{1,k} H_{11,k}}{N_{1,k} + H_{21,k} \beta E[X_{2,k}^2]} \right) \quad (16)$$

其中，

$$\delta_{1,k} = 1 - \frac{P_{2,k} H_{22,k} \left(\sqrt{P_{1,k} H_{12,k} (P_{2,k} H_{22,k} + N_{2,k}) + N_{2,k}^2} + N_{2,k} \right)^2}{P_{1,k} H_{12,k} (P_{2,k} H_{22,k} + N_{2,k})^2}$$

4 仿真结果

下面用 MATLAB 对新的感知无线电双用户信道模型及其容量分析进行仿真。由式(13)可知，感知无线电信道容量 $C_{1,k}$ 与参数 α_k 和 β 有关。参数选取为： $N_{1,k} = 1$ ， $N_{2,k} = 1$ ， $P_{1,k} = 10$ ， $P_{2,k} = 2$ 。其中 $H_{11,k}$ 和 $H_{22,k}$ 信道服从瑞利分布， $H_{12,k} = 0.95H_{11,k}$ ， $H_{21,k} = 0.95H_{22,k}$ 。下面用蒙特卡罗方法对容量进行

仿真，将所得仿真曲线与理论曲线进行对比。

1) 信道容量 $C_{1,k}$ 与参数 α_k 之间的关系

首先假设 β 不变。如图 3 所示，由理论曲线可知 $C_{1,k}$ 随着 α_k 的增加而增加，表明感知用户用于传输自己信息的功率越多，容量就会越大。用蒙特卡罗方法得出的仿真曲线验证了理论分析的正确性。

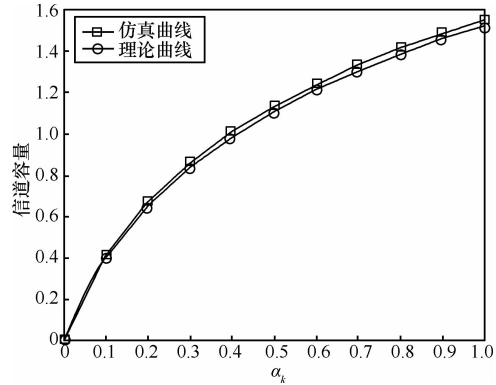


图 3 信道容量 $C_{1,k}$ 与 α_k 的关系

2) 信道容量 $C_{1,k}$ 与参数 β 之间的关系

假设

$$\alpha_k = \delta_{1,k} = 1 - \frac{P_{2,k} H_{22,k} \left(\sqrt{P_{1,k} H_{12,k} (P_{2,k} H_{22,k} + N_{2,k}) + N_{2,k}^2} - N_{2,k} \right)^2}{P_{1,k} H_{12,k} (P_{2,k} H_{22,k} + N_{2,k})^2} = 0.0324$$

如图 4 所示，由理论曲线可知 β 越大，信道容量越小，这说明感知用户感知主用户的信息可以使得信道容量增加，而且感知的信息越多，信道容量就越大。用蒙特卡罗方法得出的仿真曲线验证了理论分析的正确性。

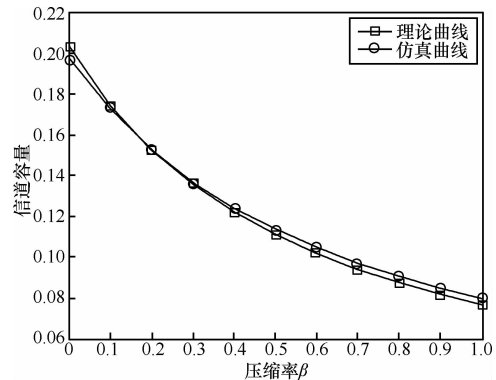


图 4 信道容量与压缩率 β 的关系

3) 同时考虑参数 α_k 和参数 β 与信道容量 $C_{1,k}$ 的关系

如图 5 所示,同时比较了 $\alpha_k = 0.01$ 、 $\alpha_k = 0.02$,
 $\alpha_k = 0.0324$ 三种情况下 $C_{1,k}$ 与参数 β 之间的关系。

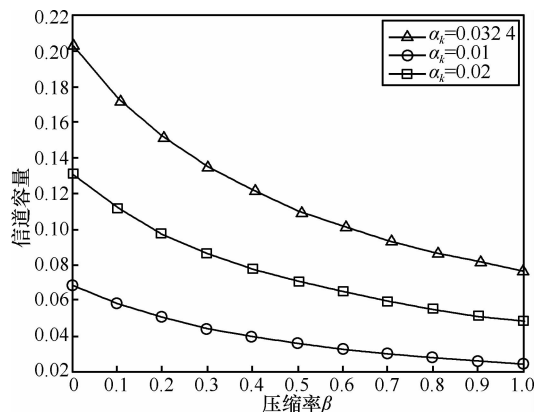


图 5 参数 α_k 和参数 β 与信道容量 $C_{1,k}$ 的关系

由图 5 可知,压缩率 β 越大, α_k 越小,容量 $C_{1,k}$ 就越小;反之,压缩率 β 越小, α_k 越大,容量就越大。为了使容量变大,压缩率 β 就要尽量小, α_k 尽量大。

另外,考虑如果压缩率 β 越小,感知用户获得的主用户信息越多,感知用户用于传输主用户信息所消耗的功率就会越多,即在实际中, β 越小, α_k 就越小。而为了使信道容量尽可能得大,希望 β 更小, α_k 更大,这样就产生了矛盾。所以在实际中要折中考虑 β 和 α_k 的取值。

4) $S_T = 0$ 和 $S_T = 1$ 时的信道容量

由式(12)和式(13)可知,当 $\alpha_k = 1$, $\beta = 0$ 时,所求的容量 $C_{1,k} = 1.73$, 就是 $S_T = 0$ 时的信道容量。由图 6 可知,很显然, $S_T = 0$ 时的信道容量总是大于 $S_T = 1$ 时的信道容量。所以首先检测主用户是否存在是重要的,这里引入开关的概念是必要的。本文假设检测无误,而实际中总会存在虚警概率和漏检概率,这是下一步研究的重点。

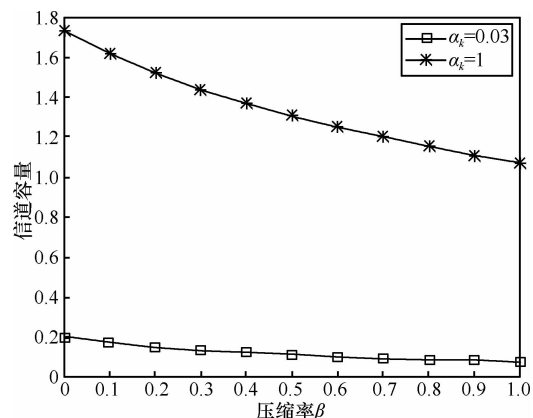


图 6 $S_T = 0$ 和 $S_T = 1$ 时信道容量的比较

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] 谢显中. 感知无线电技术及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
XIE X Z. Cognitive Radio Technology and Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2008.
- [3] JAFAR S A, SRINIYASA S. Capacity limits of cognitive radio with distributed and dynamic spectral activity[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(3):529-537.
- [4] DEYROYE N, MITRAN P, TAROKH V. Achievable rates in cognitive radio channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(5):1813-1827.
- [5] DEYROYE N, VU M, TAROKH V. Achievable rates and scaling laws in cognitive radio channels[A]. EURASIP J Wireless Commun Networking[C]. 2008.
- [6] YI N, MA Y, TAFAZOLLI R. Multi-tone transmissions over two-user cognitive radio channel with weak interference[A]. IEEE PIMRC 2008[C]. 2008. 1-5.
- [7] CHUNG S T, CIOFFI J M. The capacity region of frequency-selective Gaussian interference channels under strong interference[J]. IEEE Trans Communications, 2007, 55(9): 1812-1821.
- [8] GOLDSMITH A, JAFAR S A, MARIC I, et al. Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: an information theoretic perspective[A]. Proceeding of IEEE[C].2009.894-914.
- [9] YU W. Multiuser water-filling in the presence of crosstalk[A]. Proc Information Theory and Applications Workshop[C]. San Diego, USA, 2007. 414-420.
- [10] WU W, VISHWANATH S, ARAPOSTATHIS A. Capacity of a class of cognitive radio channels: interference channels with degraded message set[J]. IEEE Trans Inf Theory, 2007, 53(II): 4391-4399.
- [11] PRADHAN S, CHOU J, RAMCHANDRAN K. Duality between source coding and channel coding and its extension to the side information case[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2003, 49(5): 1181-1203.

作者简介:



谢显中 (1966-), 男, 四川通江人, 博士, 重庆邮电大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为移动通信技术。

杨志花 (1984-), 女, 山西朔州人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为感知无线电频谱检测和信道模型。

郑轶 (1980-), 男, 浙江杭州人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为感知无线电频谱检测。