

认知无线电中的干扰抑制合并算法*

郝张红, 赵宏志, 唐友喜

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 成都 611731)

摘要: 认知无线电中, 认知用户允许接入授权频谱会对主用户造成严重干扰。为解决这一问题, 结合多天线技术, 提出一种干扰抑制合并算法。该方法不需要干扰信号的先验信息, 可有效降低主用户与认知用户之间的干扰。从理论上推导了采用新算法后系统的 SINR (信干噪比) 表达式, 给出了误码率下限。仿真结果表明, SIR (信干比) 为 0 dB、接收天线数目为 2、BER 为 10^{-3} 时, 干扰抑制合并算法性能优于传统的最大比合并算法 6 dB。

关键词: 认知无线电; 多天线技术; 干扰抑制合并; 最大比合并

中图分类号: TN975 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)05-1825-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.05.059

Algorithm of interference rejection combining in cognitive radio systems

HAO Zhang-hong, ZHAO Hong-zhi, TANG You-xi

(National Key Laboratory of Science & Technology on Communications, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The cognitive users could cause harmful interference to the primary users when they access the licensed spectrum in cognitive radios. To solve this problem, this paper presented an interference rejection combining (IRC) employing multiple antennas. It didn't require any priori information about the interference, effectively reducing the interference between primary users and cognitive users. Furthermore, it derived the theoretical expression of SINR (signal-to-interference-plus-noise power ratio) and gave the lower bound of BER (bit error rate). It carried out the computer simulation under the condition of one transmit antenna and two receive antennas. The results show that when SIR (signal-to-interference ratio) is 0 dB, at BER of 10^{-3} , IRC gives about 6 dB better performance than MRC (maximum ratio combining).

Key words: cognitive radio (CR); multiple antennas; interference rejection combining; maximum ratio combining

0 引言

认知无线电是一种能有效提高频谱利用率的技术^[1]。其频谱共享主要有频谱正交 (spectrum overlay) 和频谱重叠 (spectrum underlay) 两种方式^[2]。频谱正交是指认知用户动态地接入那些在空间或者时间上暂时空闲的授权频谱。频谱重叠是指认知用户和主用户同时使用相同的频段。无论使用哪种方式, 认知用户接入这些授权频谱都需要满足对主用户不造成有害干扰的要求。

美国联邦通信委员会 (FCC) 提出了干扰温度模型, 规定认知用户对主用户的干扰累积不能超过主用户的干扰温度容限, 但是很难准确测量干扰温度容限。目前, 用于认知无线电中干扰消除的方法还有波束成型^[3-5]和预编码^[6]。文献[7]将并行干扰消除用于认知无线电系统上行链路。文献[8]提出了干扰准直和串行干扰消除联合检测方法, 但是串行干扰消除存在较大的处理时延。而且并行干扰消除和串行干扰消除都会产生严重的误差传播效应。

干扰抑制合并 (interference rejection combining, IRC) 算法是一种通过估计出干扰和噪声的相关矩阵, 从而对干扰起到抑

制作用的分集合并技术。文献[9]指出干扰抑制合并算法能够抑制多径干扰和同频干扰, 但并没有从理论上进一步分析干扰抑制合并算法的性能。

本文针对认知无线电系统, 从理论上分析了干扰抑制合并算法的性能, 推导了信干噪比 (SINR) 计算公式, 并且给出了理论误码率下限, 最后进行了仿真和性能分析。

1 系统模型

考虑认知无线电系统上行链路, 认知用户采用频谱重叠方式共享频谱。系统中只有一个主用户和一个认知用户, 都采用直接序列扩频传输技术和单根发射天线。主用户基站和认知用户基站都有 N_r 根接收天线。系统模型如图 1 所示。

主用户信号 x_p 和认知用户信号 x_c 通过 BPSK 调制后, 分别与各自的扩频码和扰码进行扩频和加扰操作, 最后经发射天线发送出去。本文考虑信道模型为独立同分布的平坦 Rayleigh 衰落信道。主用户和认知用户发射端与接收端结构如图 2 所示。主用户基站和认知用户基站的第 j 根接收天线接收到的第 i 个码片 $y_{pj}(i)$ 和 $y_{cj}(i)$ 分别为

$$y_{pj}(i) = \sqrt{P_p} h_{pj}(i) s_p(i) + \sqrt{P_c} h_{pc,j}(i) s_c(i) + n_{pj}(i) \quad (1)$$

收稿日期: 2011-09-08; **修回日期:** 2011-10-15 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (60832007, 60901018, 60902027, 61001087, U1035002/L05); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (ZYGX2009J010); 国家重大科技专项资助项目 (2011ZX03001-006-01)

作者简介: 郝张红 (1981-), 女, 河北邢台人, 博士, 主要研究方向为无线移动通信抗干扰技术 (hzh_0515hzh@uestc.edu.cn); 赵宏志 (1978-), 男, 副教授, 主要研究方向为抗干扰技术、无线信号处理、并行运算等; 唐友喜 (1964-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为无线通信中的数字信号处理。

$$y_{cj}(i) = \sqrt{P_c} h_{cj}(i) s_c(i) + \sqrt{P_p} h_{cp,j}(i) s_p(i) + n_{cj}(i) \quad (2)$$

其中: P_p 和 P_c 分别表示主用户发射功率和认知用户发射功率; $h_{pj}(i)$ 和 $h_{cj}(i)$ 分别表示主用户发射天线到主用户基站第 j 根接收天线对应第 i 时刻的信道系数和认知用户发射天线到主用户基站第 j 根接收天线对应第 i 时刻的信道系数; $h_{pc,j}(i)$ 表示认知用户发射天线到主用户基站第 j 根接收天线对应第 i 时刻的信道系数; $h_{cp,j}(i)$ 表示主用户发射天线到认知用户基站第 j 根接收天线对应第 i 时刻的信道系数; n_{pj} 和 n_{cj} 是零均值、噪声功率为 σ^2 的加性高斯白噪声; $s_p(i)$ 和 $s_c(i)$ 分别表示主用户发射的第 i 个码片和认知用户发射的第 i 个码片, 可以表示为^[10]

$$s_p(i) = \sum_{k=0}^{K-1} b_p(k) S_p(i) C_p(i - Nk) \quad (3)$$

$$s_c(i) = \sum_{k=0}^{K-1} b_c(k) S_c(i) C_c(i - Nk) \quad (4)$$

其中: $b_p(k), b_c(k) \in \{+1, -1\}$ 分别表示主用户和认知用户发射的第 k 个符号; K 表示符号长度; $S_p(i), S_c(i)$ 分别表示主用户和认知用户的第 i 个扰码; $C_p(i), C_c(i)$ 分别表示主用户和认知用户的第 i 个扩频码; N 是扩频码的码长, 也即扩频增益。扰码和扩频码具有下面的性质:

$$|S_p(i)| = |S_c(i)| = 1 \quad i = 0, 1, \dots, NK - 1 \quad (5)$$

$$|C_p(i)| = |C_c(i)| = \begin{cases} 1 & i = 0, 1, \dots, N - 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

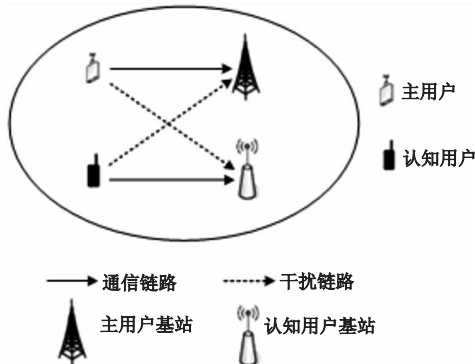


图1 系统模型

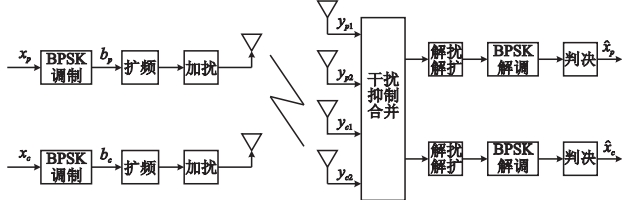


图2 主用户和认知用户发射与接收结构

将式(1)(2)表示成矩阵形式:

$$y_p(i) = \sqrt{P_p} h_p(i) s_p(i) + \sqrt{P_c} h_{pc}(i) s_c(i) + n_p(i) \quad (7)$$

$$y_c(i) = \sqrt{P_c} h_c(i) s_c(i) + \sqrt{P_p} h_{cp}(i) s_p(i) + n_c(i) \quad (8)$$

其中: $y_p(i) = [y_{p1}(i), \dots, y_{pN_r}(i)]^T$, $h_p(i) = [h_{p1}(i), \dots, h_{pN_r}(i)]^T$, $h_{pc}(i) = [h_{pc,1}(i), \dots, h_{pc,N_r}(i)]^T$, $n_p(i) = [n_{p1}(i), \dots, n_{pN_r}(i)]^T$, $y_c(i) = [y_{c1}(i), \dots, y_{cN_r}(i)]^T$, $h_c(i) = [h_{c1}(i), \dots, h_{cN_r}(i)]^T$, $h_{cp}(i) = [h_{cp,1}(i), \dots, h_{cp,N_r}(i)]^T$, $n_c(i) = [n_{c1}(i), \dots, n_{cN_r}(i)]^T$; $(\cdot)^T$ 表示转置。

2 干扰抑制合并算法

干扰抑制合并算法需要计算干扰信号与噪声的相关矩阵。

对于主用户基站, 干扰信号是认知用户发射的信号; 而对于认知用户基站, 接收到的主用户信号就是干扰信号。假设主用户信号和认知用户信号分别与噪声独立, 因此主用户基站和认知用户基站的干扰信号与噪声的相关矩阵分别为

$$R_{pp}(i) = E[(\sqrt{P_c} h_{pc}(i) s_c(i) + n_p(i))(\sqrt{P_c} h_{pc}(i) s_c(i) + n_p(i))^H] = P_c h_{pc}(i) h_{pc}^H(i) + \sigma^2 \quad (9)$$

$$R_{cc}(i) = E[(\sqrt{P_p} h_{cp}(i) s_p(i) + n_c(i))(\sqrt{P_p} h_{cp}(i) s_p(i) + n_c(i))^H] = P_p h_{cp}(i) h_{cp}^H(i) + \sigma^2 \quad (10)$$

其中: $(\cdot)^H$ 表示共轭转置。由此可得干扰抑制合并权重^[11]分别为

$$\omega_{pp}^H(i) = h_p^H(i) R_{pp}^{-1}(i) \quad (11)$$

$$\omega_{cc}^H(i) = h_c^H(i) R_{cc}^{-1}(i) \quad (12)$$

干扰抑制合并后, 主用户基站和认知用户基站的信号可以表示为

$$z_p(i) = \omega_{pp}^H(i) y_p(i) \quad (13)$$

$$z_c(i) = \omega_{cc}^H(i) y_c(i) \quad (14)$$

对于干扰抑制合并后的信号进行解扰解扩和判决, 得到发射信号的估计信号:

$$\hat{x}_p(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=kN}^{(k+1)N-1} z_p(i) p_p^*(i) \quad (15)$$

$$\hat{x}_c(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=kN}^{(k+1)N-1} z_c(i) p_c^*(i) \quad (16)$$

其中: $(\cdot)^*$ 表示共轭。 $p_p(i) = S_p(i) C_p(i - kN)$, $p_c(i) = S_c(i) C_c(i - kN)$ 。

将式(7)(13)代入式(15)可得

$$\hat{x}_p(k) = \sqrt{P_p} \omega_{pp}^H(k) h_p(k) b_p(k) + \frac{\sqrt{P_c}}{N} \sum_{i=kN}^{(k+1)N-1} \omega_{pp}^H(i) (h_{pc}(i) s_c(i) + n_p(i)) p_p^*(i) \quad (17)$$

将式(8)(14)代入式(16)可得

$$\hat{x}_c(k) = \sqrt{P_c} \omega_{cc}^H(k) h_c(k) b_c(k) + \frac{\sqrt{P_p}}{N} \sum_{i=kN}^{(k+1)N-1} \omega_{cc}^H(i) (h_{cp}(i) s_p(i) + n_c(i)) p_c^*(i) \quad (18)$$

主用户信号的误码率分析与认知用户信号的误码率分析类似, 以主用户信号误码率分析为例。主用户基站天线输出平均信噪比 γ 为

$$\gamma = \frac{E[|\sqrt{P_p} \omega_{pp}^H h_p|^2]}{E[|u|^2]} \quad (19)$$

其中:

$$u(k) = \frac{\sqrt{P_c}}{N} \sum_{i=kN}^{(k+1)N-1} \omega_{pp}^H(i) (h_{pc}(i) s_c(i) + n_p(i)) p_p^*(i) \quad (20)$$

将式(9)(20)代入式(19)可得

$$\gamma = \frac{NP_p | \omega_{pp}^H h_p |^2}{\omega_{pp}^H R_{pp}^{-1} \omega_{pp}} \quad (21)$$

由文献[12]可得误码率为

$$P_b(P_p, h_p) = \int_0^\infty Q(\sqrt{2\gamma}) p(\gamma) d\gamma \quad (22)$$

其中: $p(\gamma)$ 是信噪比 γ 的概率密度函数, $Q(x) = \frac{1}{2\pi} \int_x^\infty \exp$

$\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$ 。

由式(22)可知计算误码率的闭合式很复杂, 本文考虑误

码率下限,即没有干扰信号时,主用户的误码率性能。此时,IRC的性能与MRC(最大比合并)性能相当^[11]。由文献[12]可得误码率理论下限为

$$P_{b,lower}\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = \left[\frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{E_b/N_0}{1+E_b/N_0}} \right) \right]^{N_r} \times \sum_{n=0}^{N_r-1} \binom{N_r-1+n}{n} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{E_b/N_0}{1+E_b/N_0}} \right) \right]^n \quad (23)$$

其中: $E_b/N_0 = NP_p/\sigma^2$ 。

实际中接收端是无法已知干扰信号的信道信息的,仿真时本文采用文献[13]中的方法来估计干扰信号与噪声的相关矩阵。

$$R_{pp} = \frac{1}{NK} \sum_{i=0}^{NK-1} y_p(i) y_p^H(i) \quad (24)$$

3 仿真实验与结果分析

为了验证干扰抑制合并算法在认知无线电系统中抑制干扰的有效性,将干扰抑制合并算法与最大比合并进行了仿真比较。假设主用户信号和认知用户信号已经同步,主用户基站和认知用户基站都有两根接收天线。不考虑信道编码,扩频增益为16,扩频码为正交可变扩频因子码;扰码为长Gold码。因为主用户具有使用频谱的优先权,因此定义信干比 $SIR = P_p/P_c$ 。仿真中使用理想信道估计。

图3和4分别是主用户误码率(BER)性能曲线和认知用户BER性能曲线,其中 $SIR = 0$ dB。从图中可以看出,随着信噪比的增加,干扰抑制合并算法的性能比最大比合并越来越好,当误码率为 2×10^{-3} 时,不论是主用户端还是认知用户端,干扰抑制合并算法性能都比最大比合并算法有2 dB的提高。

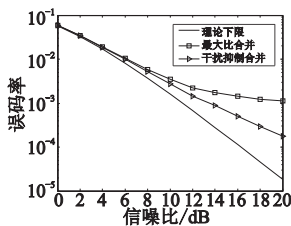


图3 主用户BER性能曲线
($SIR=0$ dB, $N_r=2$)

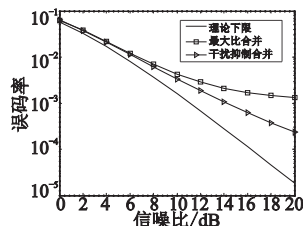


图4 认知用户BER性能曲线
($SIR=0$ dB, $N_r=2$)

图5是主用户和认知用户的BER与SIR的关系曲线,其中 $E_b/N_0 = 20$ dB。从图5中可以看出,对于主用户来说,随着SIR的增加,误码率减小,这是因为SIR增加,相当于干扰信号减弱;随着SIR的增加,干扰抑制合并算法的性能与最大比合并的性能越来越接近。对于认知用户来说,随着SIR增加,误码率增大,这是因为SIR增加,相当于干扰信号增强。对于主用户,当误码率为 10^{-3} ,使用最大比合并时,需要的信干比为0 dB;使用干扰抑制合并时,需要的信干比小于-6 dB,说明使用干扰抑制合并算法可以允许认知用户以更大的功率发射信号,或者允许更多的认知用户共同使用此段频谱,进一步提高频谱利用率。

4 结束语

针对认知无线电系统中,主用户和认知用户之间的交互干扰问题,本文结合多天线技术,将干扰抑制合并算法应用于认

知无线电系统中。推导了SINR表达式,给出了误码率理论下限。仿真实验表明,干扰抑制合并算法比最大比合并具有更好的抑制性能,可以进一步提高频谱利用率。

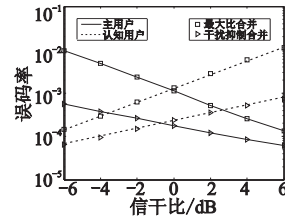


图5 BER与SIR关系曲线 ($E_b/N_0=20$ dB, $N_r=2$)

参考文献:

- [1] 刘允,彭启琮,邵怀宗,等. 基于OFDM的认知无线电频谱检测算法研究[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(6): 2277-2279.
- [2] ZHANG Xi, SU Hang. Opportunistic spectrum sharing scheme for CDMA-based uplink MAC in cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(4): 716-730.
- [3] FEI Yue, WU Zhuo. An interference cancellation scheme for cognitive radio network[C]//Proc of the 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing. 2010: 1-4.
- [4] JORSWIECK E, MOCHAOURAB R. Beamforming in underlay cognitive radio: null-shaping design for efficient Nash equilibrium[C]//Proc of the 2nd International Workshop on Cognitive Information Processing. 2010: 476-481.
- [5] BAKR O, JOHNSON M, MUDUMBAI R, et al. Multi-antenna interference cancellation techniques for cognitive radio applications[C]//Proc of IEEE Conference on WCNC'2009. 2009: 1-6.
- [6] ZHOU J, THOMPSON J. Linear precoding for the downlink of multiple input single output coexisting wireless systems[J]. IET Communications, 2008, 2(6): 742-752.
- [7] WU Zhuo, YAN Li-jia. Interference cancellation scheme for uplink cognitive radio system[J]. Journal of Shanghai University: English Ed, 2011, 15(1): 16-20.
- [8] WU J M, YANG T F, CHOU H J. MIMO active interference alignment for underlay cognitive radio[C]//Proc of IEEE International Conference on ICC Workshops. 2010: 1-5.
- [9] YU C H, TIRKKONEN O. Characterization of SINR uncertainty due to spatial interference variation[C]//Proc of the 11th IEEE International Workshop on SPAWC. 2010: 1-5.
- [10] BAUM K L, THOMAS T A, VOOK F W, et al. Cyclic-prefix CDMA: an improved transmission method for broadband DS-CDMA cellular systems[C]//Proc of IEEE International Conference on Wireless Communications and Networking Conference. 2002: 183-188.
- [11] MALLIK R K, WIN M Z, CHIANI M, et al. Bit-error probability for optimum combining of binary signals in the presence of interference and noise[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2004, 3(2): 395-407.
- [12] PROAKIS J G. Digital communications [M]. 4th ed. [S. l.]: McGraw-Hill, 2002.
- [13] LARSSON E G. Model averaged interference rejection combining[J]. IEEE Trans on Communications, 2007, 55(2): 271-274.