

认知无线电中基于 SA-MIMO-OFDM 的动态频谱共享方案

胡浩 周文安 宋俊德
(北京邮电大学电子工程学院 北京 100876)

摘要: 该文提出一种结合频谱自适应(Spectrum Adaptation, SA)与 MIMO-OFDM 技术的动态频谱共享方案。该方案基于功率门限模型实现非授权信号的自适应频谱成型,并给出了一种简单的动态功率分配算法以最大化比特率。仿真结果表明,该方案能够克服干扰温度模型的局部干扰问题,使用 MIMO 技术可进一步提高系统性能,通过动态功率分配算法可降低计算复杂性并提高频谱利用率。

关键词: 无线通信; 动态频谱共享; 认知无线电; MIMO-OFDM; 动态功率分配

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)07-1548-04

Dynamic Spectrum Sharing Scheme Based on Spectrum Adaptation and MIMO-OFDM in Cognitive Radio

Hu Hao Zhou Wen-an Song Jun-de

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In this paper, a novel dynamic spectrum sharing scheme combining Spectrum Adaptation (SA) and MIMO-OFDM is proposed. In the scheme, an improved model due to signal power thresholds is adopted to accomplish spectrum adaptation for unlicensed users. In order to achieve the rate maximization, a dynamic power allocation algorithm is also presented. Simulation results indicate that the propositional scheme solves the partial interference problem of Interference Temperature Model (ITM) and the system performance is further improved via using MIMO technique. The proposed algorithm reduces the computational complexity and improves the spectrum efficiency.

Key words: Wireless communication; Dynamic spectrum sharing; Cognitive radio; MIMO-OFDM; Dynamic power assignment

1 引言

随着无线通信技术的发展,频谱资源紧张的问题日趋严重,已出现的许多先进的无线通信理论和技术,其提高频谱效率的能力仍然有限。而认知无线电技术的出现^[1,2],实现了频谱的动态共享,为解决频谱资源不足、提高频谱利用率开创了崭新的局面。基于认知无线电的频谱共享是使用频谱感知信息,根据一定的学习和决策算法,实时自适应地改变系统工作参数,有效利用空闲频谱同时实现授权用户频段的共享。目前,动态频谱共享主要有两种方案,完全禁止和有条件地限制非授权用户接入授权频谱^[3]。虽然后者具有更高的容量性能和频谱效率,但是 FCC 建议的干扰温度模型^[4]仍存在缺陷。

本文提出了一种结合频谱自适应与 MIMO-OFDM^[5]的认知无线电系统——SA-MIMO-OFDM,通过动态设置非授权信号功率门限,消除了干扰温度模型中的局部干扰,并给出一种动态功率分配算法,实现了子载波平均功率与总平均功率受限条件下的传输速率最大化。最后给出仿真结果和分析。

2 系统模型

假设 SA-MIMO-OFDM 系统具有 N_{tx} 个发送天线和 N_{rx} 个接收天线,非授权信号接收端能够通过频谱感知和信道估计将无线环境状态信息完全掌握并及时反馈给发送端。假设信道为随机准静态 AWGN 信道,发送端根据反馈结果对输入数据比特进行相应的星座点映射,通过 IFFT 变换为 OFDM 符号,插入循环前缀后从 N_{tx} 个天线发送出去。接收端的 N_{rx} 个天线对接收到的 OFDM 符号去循环前缀和 FFT 变换,然后根据信道状态信息和动态功率分配参数的信令信息做出相应的解调,得到非授权用户数据,如图 1 所示。

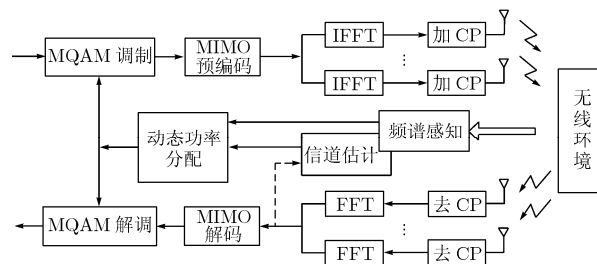


图 1 SA-MIMO-OFDM 系统框架

不失一般性, 假设系统包含的子载波总数为 N , 则第 k 个子载波上的 MIMO 信道模型可表示为

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{n}_k, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中 $\mathbf{H}_k \in C^{N_{rx} \times N_{tx}}$ 为第 k 个子载波上的信道矩阵, $\mathbf{X}_k = [x_{k,1} \ x_{k,2} \ \dots \ x_{k,t_x}]^T$ 为对应的发送信号向量, \mathbf{n}_k 为高斯白噪声向量, 其协方差矩阵为 $\sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_{rx}}$ 。利用矩阵的奇异值分解(SVD)理论^[6]将第 k 个子载波对应的 MIMO 信道进行分解 $\mathbf{H}_k = \mathbf{U}_k \mathbf{A}_k \mathbf{V}_k^H$, 其中 $\mathbf{U}_k \in C^{N_{rx} \times N_{rx}}$ 和 $\mathbf{V}_k^H \in C^{N_{tx} \times N_{tx}}$ 为酉矩阵, 分别表示发射预编码和接收解码。 $\mathbf{A}_k \in C^{N_{rx} \times N_{tx}}$ 为 \mathbf{H}_k 的奇异值组成的对角矩阵:

$$\mathbf{A}_k = \text{diag}(h_{k,1}, h_{k,2}, \dots, h_{k,r}, 0, \dots, 0), \\ h_{k,1} \geq h_{k,2} \geq \dots \geq h_{k,r} \geq 0 \quad (2)$$

通过以上分析可将第 k 个子载波对应的 MIMO 信道分解为并行独立的多个 SISO 子信道, 子信道个数 R 等于 \mathbf{H}_k 中非零特征值的个数且满足 $R \leq \min(N_{tx}, N_{rx})$ 。因此, 本系统等效为具有 $M = RN$ 个子载波的单天线准 OFDM 系统。

3 动态频谱共享模型

2003 年 11 月, 美国联邦通信委员会提出干扰温度模型^[4], 使用干扰温度作为频谱共享系统中度量干扰的新标准, 同时还定义了干扰温度限 T_L 为授权用户在特定位置和频段上可以忍受的干扰最大值。假设授权频段中心频率为 f_c , 带宽为 B , 授权信号带宽 $B_{lic} \subset B$ 。 $P_S(f), P_I(f)$ 为授权接收机处的非授权信号发射功率和干扰功率, 而 $P_S(f_c), P_I(f_c), T_L(f_c)$ 分别为非授权信号和干扰的功率均值及干扰温度限。根据干扰温度模型, 授权用户接收机处的总干扰功率均值 $P_T(f_c)$ 需要满足下式^[7]:

$$P_T(f_c) = \delta P_S(f_c) + P_I(f_c) \leq BkT_L(f_c) \quad (3)$$

式中 δ 为非授权发射机与授权接收机之间的路径损耗因子, $\delta \in (0, 1)$ 。由于干扰温度模型只限定干扰功率均值, 而在局部频段, 非授权信号与干扰总功率的峰值可能超过干扰温度限, 从而严重影响授权用户的信号接收。

为了解决该问题, 本文提出一种改进的功率门限模型, 在授权频段上对非授权信号发射功率峰值加以限制, 使之满足下式:

$$P_S(f) \leq [BkT_L(f_c) - P_I(f)] / \delta \quad (4)$$

从而使得授权接收机处的总干扰功率在授权频段上不大于干扰温度限

$$P_T(f) \leq \max[\delta P_S(f) + P_I(f)] \leq BkT_L(f_c) \quad (5)$$

因此, 通过式(4)可以消除干扰温度模型中的局部干扰, 实现频谱共享。

在 OFDM 系统中, 可定义子载波 k 上的非授权信号平均功率门限 $P_{TH}(k)$ 为

$$P_{TH}(k) = [BkT_L(f_k) - P_I(f_k)] / \delta \\ = \left[BkT_L(f_k) - \frac{N}{B} \int_{f_c - B(N-2k)/2N}^{f_c - B(N-2k-2)/2N} P_I(f) df \right] / \delta \quad (6)$$

其中 $T_L(f_k)$ 为子载波 k 上的干扰温度限, 需满足下式:

$$T_L(f_k) = \begin{cases} T_{\min} \propto \frac{kB}{P_I(f_k) + \delta P_S(f_k)}, & f_k \in B_{lic} \\ T_{\max} \propto \frac{kB}{P_I(f_k)}, & f_k \notin B_{lic} \end{cases} \quad (7)$$

式中玻耳兹曼常数 $k = 1.3807 \times 10^{-23}$ J/K。通过频谱测量信息自适应地调整干扰温度限, 可确定各子载波上的平均功率门限。

为了最大化每个子载波的传输能力, 可令

$$P_S(f_k) = P_{TH}(k) \quad (8)$$

根据上式即可通过设置每个子载波上的信号发射功率, 实现频谱自适应和动态功率分配, 避免干扰授权信号的同时最大化非授权信号传输性能。

4 动态功率分配算法

根据前文分析可知本系统等效为具有 M 个子载波的单天线准 OFDM 系统, 与传统的 OFDM 功率分配问题相比较, 本系统的动态功率分配增加了各子载波上的功率门限约束, 由于该约束条件满足线性, 因此动态功率分配问题的可行域为凸集, 可采用拉格朗日乘子法求解, 其目标是在一定的发射功率和误码率条件下, 使系统传输速率达到最大。该优化问题可描述如下:

$$\text{最大化 } B = \sum_{k=1}^N \sum_{r=1}^R b_{k,r} \quad (9)$$

约束条件为

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k=1}^N \sum_{r=1}^R P_{k,r} &\leq P_{\text{budget}}, \quad \forall k = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{r=1}^R P_{k,r} &\leq P_{TH}(k), \quad \forall k = 1, 2, \dots, N \\ 0 &\leq \sum_{r=1}^R b_{k,r} \leq \bar{b}_k, \quad \forall k = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 $P_{k,r}$ 和 $b_{k,r}$ 分别为分配给第 k 个子载波上的第 r 个子信道的平均功率和比特数; P_{budget} 为系统允许的最大总平均功率; $P_{TH}(k)$ 和 \bar{b}_k 分别为第 k 个子载波上的信号平均功率门限和可分配的最大比特数, \bar{b}_k 由系统支持的最大调制级别确定。 $b_{k,r}$ 可由 Shannon 信道容量公式获得:

$$b_{k,r} = \log_2 \left[1 + \frac{P_{k,r} h_{k,r}^2}{\sigma_{k,r}^2 \Gamma} \right] \quad (11)$$

式中 $h_{k,r}$ 和 $\sigma_{k,r}^2$ 分别为子载波 k 的第 r 个等效子信道的传递函数和噪声功率; Γ 是信道的 SNR 差额^[8](SNR GAP), 表示采用一定调制方式和误码率下, 所能达到的信道容量与理论信道容量的差值。在 QAM 调制方式下, SNR 差额可以表示成 $\Gamma = -\ln(5 \times \text{BER})/1.5$ 。

传统的注水算法能够实现最优的功率分配, 但这种方法的计算难度大, 需要假设星座规模量化精度无限小, 意味着传输比特数为小数, 因而在很多情况下无法收敛, 无法应用于实际通信系统中。已有的功率分配方法采用二分法来求解非整数的比特分配结果, 在通过另一个二分搜索调整结果为整数解, 算法复杂且运算量较大。本节提出一种动态功率分

配算法。该算法通过初始分配满足所有约束条件的最大整数比特,使得系统传输速率快速地逼近最大值,然后根据各子信道增益和功率门限动态调整功率分配,最后,为达到系统目标容量,采用递增分配方法保证算法收敛性并使比特总数达到最大,从而实现频谱自适应的同时最大化传输性能。

算法流程如下:

(1)初始化分配:各等效子信道初始功率分配 $P_{\text{ini}} = P_{\text{budget}}/M = P_{\text{budget}}/(NR)$,根据式(11)计算比特分配矩阵 $\mathbf{b}_{\text{ini}} \in C^{N \times R}$ 。结合式(10),可以得到子载波 k 上第 r 个子信道满足所有约束条件的整数比特分配为

$$b_{k,r} = \text{ent}[\min\{b_{\text{ini}}(k,r), \bar{b}_k\}/d] \times d \quad (12)$$

式中 ent 表示取整运算, d 为比特分配的步长。

(2)各子载波逐一分配功率,以子载波 k 为例方法如下:

(a)在所有子信道上计算减少和增加单位步长比特的发射功率差值:

$$\Delta P^-(b_{k,r}) = P(b_{k,r}) - P(b_{k,r} - d) \quad (13)$$

$$\Delta P^+(b_{k,r}) = P(b_{k,r} + d) - P(b_{k,r}) \quad (14)$$

(b)去除减少单位比特发射功率下降最多的子信道,在剩余子信道中查找增加单位比特发射功率提高最少的子信道:

$$k, r^- = \arg \max_{(k,r) \in (N,R)} \Delta P^-(b_{k,r}), k, r^+ = \arg \min_{(k,r) \in (N,R) \setminus k, r^-} \Delta P^+(b_{k,r}) \quad (15)$$

式中集合 $(N,R) \setminus k, r^-$ 表示从集合 (N,R) 中去掉元素 (k, r^-) 。如果 $\Delta P^-(b_{k,r^-}) < \Delta P^+(b_{k,r^+})$,则功率调整过程结束。若满足平均功率限制条件,则调整功率分配

$$P^+(b_{k,r^+}) = P^+(b_{k,r^+}) + \Delta P^+(b_{k,r^+}) \quad (16)$$

$$P^-(b_{k,r^-}) = P^-(b_{k,r^-}) - \Delta P^-(b_{k,r^-}) \quad (17)$$

若不满足以上条件,去掉 k, r^+ 子信道,重复步骤(2)直至不能再调整功率。

(3)递增分配:在所有子信道中查找增加单位比特发射功率提高最小的子信道为 $n^+ = \arg \min \Delta P^+(b_m)$ 。若满足 $\Delta P^+(b_{n^+}) + \sum_{m=1}^M P(b_m) \leq P_{\text{budget}}$,则 $P^+(b_{n^+}) = P^+(b_{n^+}) + \Delta P^+(b_{n^+})$,否则去掉子信道 n^+ ,重复步骤(3)直到不能再分配比特。

算法结束时所获得的功率分配向量即为满足限制条件的最优功率分配,同时可实现频谱自适应。

5 仿真分析

假设授权频段 $B = [0, 20\text{MHz}]$,其中授权信号带宽 $B_{\text{lic}} = [5, 15\text{MHz}]$ 。系统中子载波数为 128,发送和接收天线数均为 2。仿真所采用无线信道的时延扩展为 150ns,系统采样间隔 50ns,循环前缀长度为 32,OFDM 符号周期为 14.4 μs ,子载波间隔为 78.125kHz。可用调制方式为:0, 4QAM, 16QAM, 64QAM 和 256QAM。比特调整步长 d 为 2。

图 2 给出了一个特定信道采样下基于干扰温度模型(ITM)使用注水算法和基于功率门限模型(PTM)使用本文算

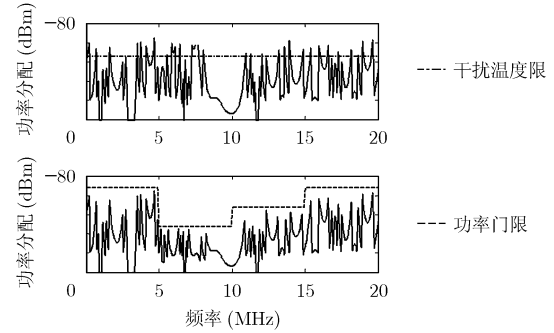


图2 系统功率分配

法的功率分配结果。可以看出,前者在授权信号存在的频段,部分子载波上功率峰值大于干扰温度限,对授权信号造成干扰;后者为各子载波动态设置功率门限实现频谱自适应,在授权信号存在频段限制其发射功率,其它频段功率分配与注水最优分配一致。可见该算法的分配结果符合理论分析,可以达到最优功率分配同时实现动态频谱共享。

如图 3 所示为系统频谱效率,其中“None”为非频谱共享系统。当使用单天线系统(SISO)时,由于功率门限模型比干扰温度模型具有更加严格的功率限制,使得传输比特数减少,因而频谱效率略低。但是相比非频谱共享系统,本系统仍具有 45%左右的效率提升。若使用多天线系统(MIMO),系统频谱效率提高约一倍。

如图 4 所示为不同系统中的授权信号比特错误概率。当使用单天线系统(SISO)时,基于干扰温度模型的系统存在非授权用户的局部干扰而误码率最大,本文系统性能略低于授权信号独占频谱的非共享系统。说明局部干扰会严重干扰授权信号,性能下降约 3dB,而使用功率门限模型对授权信号的干扰满足要求,利用多天线系统(MIMO)有 5dB 左右的性能提升。

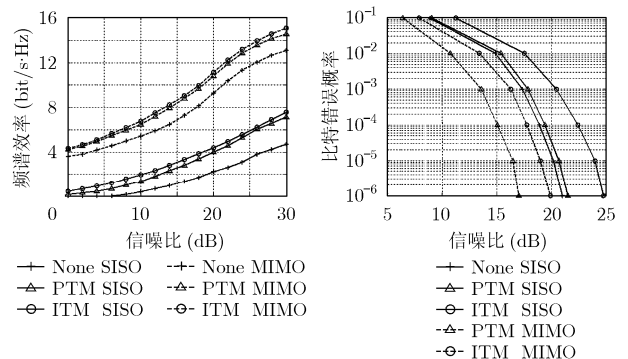


图3 系统频谱效率($P_b = 10^{-3}$)

图4 系统误比特概率

图 5 中给出了本文的动态功率分配算法与经典贪婪算法^[9](Greedy)以及目前效率最高的分配算法之一—Krongold 算法^[10]的复杂性比较。从图中可以看出,本文算法所需的平均迭代次数受信噪比影响较小,通过初始比特分配和功率调

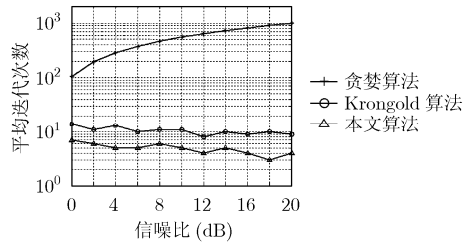


图5 平均迭代次数

整, 使其平均迭代次数远远低于传统贪婪算法, 大约为 Krongold 算法的一半。

6 结束语

基于 SA-MIMO-OFDM 的认知无线电系统通过功率门限模型实现频谱自适应, 克服了干扰温度模型的局部干扰问题, 同时实现动态频谱共享。本文提出的动态功率分配算法, 可以在满足功率门限的条件下达到注水算法的最优功率分配。仿真表明, 该方案能构造满足频谱共享要求且最大化传输能力的信号功率谱, 实现动态、高效的频谱共享。

参考文献

- [1] Mitola J and Maguire G Q. Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] Haykin S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Area in Communications*, 2005, 23(2): 201-220.
- [3] Etkin R, Parekh A, and Tse D. Spectrum sharing for unlicensed bands. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(3): 517-528.
- [4] FCC. Establishment of Interference Temperature Metric to Quantify and Manage Interference and to Expand Available Unlicensed Operation in Certain Fixed Mobile and Satellite Frequency Bands. ET Docket 03-289, Notice of Inquiry and Proposed Rulemaking.
- [5] Stuber G L, Barry J R, and McLaughlin S W, *et al.* Broadband MIMO-OFDM wireless communications. *Proc. IEEE*, 2004, 92(2): 271-294.
- [6] Gao J and Faulkner M. On implementation of bit-loading algorithms for OFDM systems with multiple-input multiple-output. Proc of VTC-Fall, Vancouver BC, Canada, September 2002: 199-203.
- [7] Clancy T. Formalizing the Interference Temperature Model. *Wiley Journal on Wireless Communications and Mobile Computing*, 2007, 7(9): 1077-1086.
- [8] Cioffi J M, *et al.* MMSE decision-feedback equalizers and coding part I: Equalization results. *IEEE Trans. on Communications*, 1995, 43(10): 2582-2594.
- [9] Hughes-Hartogs D. Ensemble modem structure for imperfect transmission media. U.S. Patents, 4679227 (July 1987), 4731816 (March 1988) and 4833796 (May 1989).
- [10] Prince K, Krongold B, and Dey S. A framework for efficient rate-power allocation for OFDM in a composite-fading environment. Proc. ICC'2005, Seoul, Korea, May 2005: 2558-2562.

- 胡 浩: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为无线通信网络与先进技术。
- 周文安: 女, 1971 年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为无线通信网络技术与业务管理。
- 宋俊德: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 长期从事移动通信、宽带无线通信方面的研究工作。