

文章编号:1000-582X(2008)10-1185-04

# 认知无线电的 OFDM 系统自适应比特分配算法

苏建欢<sup>1,2</sup>, 冯文江<sup>2</sup>, 何奇文<sup>1</sup>, 邹琦萍<sup>1</sup>

(1. 河池学院 物理与电子工程系 广西 宜州 546300; 2. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030)

**摘要:**根据认知无线电系统的传输方式需要,设计了一种基于 OFDM 的认知无线电体系结构,并在子信道分配已经完成的前提下,在保证服务质量所需误码率的同时,提出了一种自适应比特分配算法,动态地分配子信道上的比特及能量,使得所需要的发射总功率达到最小(或者平均每比特信噪比达到最大)。仿真结果表明,与等比特分配算法相比,本自适应比特分配算法相对简单,降低了系统的传输功率,其误码率性能明显好于等比特分配算法。

**关键词:**认知无线电;自适应 OFDM 系统;比特分配

中图分类号:TN929. 52

文献标志码:A

## Adaptive bit allocation algorithm in an orthogonal frequency division multiplexing system of cognitive radio

SU Jian-huan<sup>1,2</sup>, FENG Wen-jiang<sup>2</sup>, HE Qi-wen<sup>1</sup>, ZOU Qi-ping<sup>1</sup>

(1. Department of Physics and Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou 546300, P. R. China;  
2. The Institute of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** An orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) based cognitive radio architecture was designed to meet the transmission requirements of a cognitive radio system. After finishing the allocation of subtransmission, and keeping BER within the limit that ensures service quality, an adaptive bit allocation method was proposed to allocate the bit and energy of subtransmission dynamically. The total power for launching needed reached its minimum (or SNR per bit reached its maximum). Compared with the fixed bit allocation method, the proposed method is simpler, decreases the system transmission power, and has better BER performance.

**Key words:** cognitive radio; adaptive orthogonal frequency division multiplexing system; bit allocation

在认知无线电系统中,要求使用的传输方式要具有灵活可靠并能实时地适应传输信道改变的特性<sup>[1]</sup>,自适应 OFDM 技术<sup>[2-4]</sup>可以适应认知无线电系统的这些要求。OFDM 技术不仅可以很好的抵抗多径效应,而且还可以根据每个子载波上的衰落情况动态地调整每个子信道上所采用的调制解调方

式、发射功率、编码方式等,因而,OFDM 被选作认知无线电系统传输链路的关键调制<sup>[5]</sup>技术。笔者在设计一种认知无线电系统结构的基础上,为了提高系统性能,对基于认知无线电系统的 OFDM 自适应比特分配算法进行研究。

收稿日期:2008-07-12

基金项目:广西教育厅科研基金资助项目(200608MS172)

作者简介:苏建欢(1968-),男,河池学院教师,主要从事无线宽带接入技术和通信信号处理等方向的研究,

(Tel)13877866150;(E-mail) sujianhuan@126.com。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

## 1 认知无线电系统结构

图 1 是一种认知无线电终端系统结构原理框图,它是以为 OFDM 为核心调制技术。在这个认知无线电系统中,为了获得空闲频谱资源信息,无线传输场景分析模块对区域内全频段进行检测,并将获得的频谱状态信息传送给 MAC,由 MAC 层确定认知无线电系统可用空闲频谱,同时 MAC 层向射频前端提供重配置控制信号,射频前端基于一定的准则自动调节发射频率到选定的频段。此外,物理层还能根据 MAC 层提供的控制信号自适应调整调制方式并采用自适应加载技术增强无线链路性能。



图 1 认知无线电终端系统结构原理图

图 2 为基于认知无线电的自适应调制 OFDM 系统的原理框图<sup>[6]</sup>。该系统采用接收端做信道估计的方式,并通过反馈信道通知发送端,发送端由此获取各个子载波的信道条件,然后根据一定的算法确定各个子载波分配的比特数,并将数据比特进行相应的星座点映射,再进行 OFDM 调制。同时各子载波调制方式作为信令信息也同时发送。

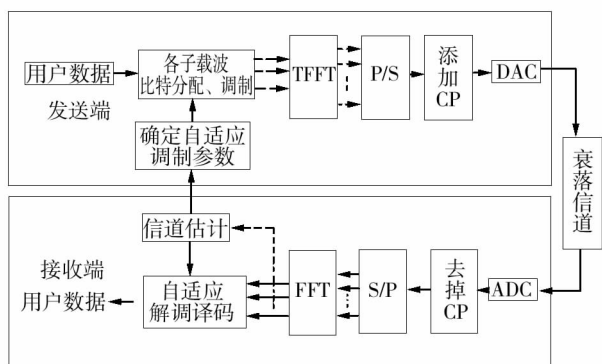


图 2 自适应调制 OFDM 系统框图

接收端先去掉循环前缀、串/并变换和 FFT 变换。然后根据信道估计得到的信道条件和自适应调制的信令信息,对各个子载波作相应的解调,得到数据比特,同时将信道估计的结果通过反馈信道送到发送端。

## 2 比特分配

OFDM 把实际信道划分为若干子信道,根据各

个子信道的瞬时特性分配数据比特和传输功率,可以优化系统性能,达到提高系统功率和频谱的效率、充分利用信道资源的目的。通过自适应分配比特来提高 OFDM 调制系统性能的方法已有许多学者进行了研究,提出了许多自适应比特及功率分配的算法,如 Hughes-Hartogs<sup>[7-8]</sup>算法,Czylwik 算法<sup>[9]</sup>,位去除法<sup>[10]</sup>,Jang 算法<sup>[11]</sup>等。

在认知无线系统中,比特分配则转化为多用户 OFDM 的问题。多用户 OFDM 系统的自适应分配既包含了子信道的分配,又包含了子信道上的比特和功率分配。文献[12-13]将这 2 种分配同时进行,所以算法非常复杂,不适宜实际应用。

笔者在子信道分配已经完成的条件下,从固定信息传输速率出发,研究在保证服务质量(QoS)所需 BER 的条件下,动态地分配子信道上的比特及能量,使得所需要的发射总功率达到最小(或者平均每比特信噪比达最大)。

比特加载算法可以按照被优化的资源和所规定的限制条件来分类<sup>[14]</sup>。优化通常有 2 种准则:最大比特率准则和功率最小化准则。

在比特率最大化算法中,大家感兴趣的是在发射总功率受限制的条件下,如何使总数据传输速率最大化(在满足一定的误码率要求基础上)。

在使信道容量最大化的场合,最佳的能量分配方法是“注水定理”,但这种方法的计算难度大,而且还需要假设星座规模量化精度要无限小,这在实际中是很难实现的。

## 3 自适应比特分配算法

在认知无线电系统,要求传输速率维持相对稳定,其传输速率相对固定。因此,根据最小发射功率的准则,给出以下自适应比特分配算法。

分配问题及约束条件表述如下:

能量最小化

$$\min \text{mize} \sum_{n=1}^N e_n(b_n). \quad (1)$$

约束条件

$$\sum_{n=1}^N b_n = B, \quad (2)$$

$$b_n \in (0, 1, 2, 4, 6, 8), n = 1, 2, \dots, N.$$

限制每个符号包含总比特数 B 以维持稳定的传输速率;由于使用了 MQAM 调制,这里除 1 外仅允许传偶数比特,以平衡信号 I、Q 分量的 BER。同时规定各子信道在每符号期间所携带的最大信息比特数为 8 dB。

分配的过程简述如下:

## ① 初始化分配

假定信道条件估计良好,第  $n$  条子信道的增益(衰减)幅度为  $g_n$  (即  $|H(n)|^2$ ),初始化分配过程简述为

1)按下列式计算第  $i$  信道上加载的比特

$$b'_i = \log_2(1 + \frac{3E_i g_i}{KN_i}), \quad (3)$$

其中  $K = [Q^{-1}(\frac{P_c}{N_e})]^2$ ,  $Q$  为积分函数<sup>[15]</sup>

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\beta^2/2} d\beta \quad (4)$$

$P_c$  为目标误码率,对 MQAM 调制<sup>[9]</sup>,  $N_e \approx 3$ ,所加单边功率谱密度为  $N_0$  的高斯白噪声,初始计算令  $E_i = 1$ ;

2)对  $b'_i$  取整:  $b_i = \text{round}(b'_i)$ ;并限制  $b_i$  只能取 0,1,2,4,6 或 8 dB;

3)计算各子信道传输  $b_i$  dB 所需的功率  $e_i$ 。由

$$f(b_i) = (N_0/3)[Q^{-1}(\frac{P_c}{N_e})]^2(2^{b_i} - 1), \quad (5)$$

得

$$e_i = f(b_i)/g_n = (N_0/3)K(2^{b_i} - 1)/g_n. \quad (6)$$

## ② 调整使分配满足比特约束条件限制

建立能量增量表,包含每个子信道增加 1 dB 时所需的能量增量,每次调整按 1 dB 需求、根据能量增量增减 1 dB;如对第  $i$  信道,由  $(b-1)$  dB 增加 1 dB 至  $b$  时,所需能量增量为

$$\Delta e_i(b) = e_i(b) - e_i(b-1) = (N_0/3)K(2^{b_i-1})/g_n. \quad (7)$$

此处要求系统子信道最大传输量为 8 dB,则从 8~9 dB 及以上所需的能量增量被设为很高的值,并且不支持除 1 以外的奇数 dB。为满足此限制,对能量增量表中的 3,4 dB 的增量采取平均化:

$$\Delta e'_i(3) = \Delta e'_i(4) = [\Delta e_i(3) + \Delta e_i(4)]/2. \quad (8)$$

对 5,6 dB 和 7,8 dB 也作如此处理。而当最后 1 dB 被分至某信道时却未达偶数比特,则用后面“配置最后 1 dB”的算法处理。

满足比特总数  $B$  限制的算法如下:

对各子信道初始分配的比特数求和

$$B' = \text{sum}(b_i),$$

如果  $B' \neq B$ ,重复以下步骤至  $B' = B$ 。

若  $B' > B$  则

$$n = \text{argmax}_{1 \leq j \leq N} \Delta e_j(b_j),$$

$$b_n \leftarrow b_n - 1,$$

$$B' \leftarrow B' - 1;$$

若  $B' < B$  则

$$n = \text{argmax}_{1 \leq j \leq N} \Delta e_j(b_j + 1),$$

$$b_n \leftarrow b_n + 1,$$

$$B' \leftarrow B' + 1.$$

## ③ 配置最后 1 dB 分配算法:

1)如果有由于分配最后 1 dB 造成的含不支持比特数的信道,则设该子信道标号为  $\nu$ ,计算  $\Delta e_\nu(b(\nu))$  和  $\Delta e_\nu(b(\nu) + 1)$ 。

2)查找分配了 1 dB 的子信道,其减少 1 dB 所减能量最大的记为信道  $i$ ,得能量增量为  $\Delta e_i(b(i))$ ,计算  $E_1$ :

$$E_1 = \Delta e_\nu(b(\nu) + 1) - \Delta e_i(b(i)). \quad (9)$$

3)找到分配 0 或 1 dB 的子信道,其增加 1 dB 所需能量最小的记为信道  $j$ ,得能量增量为  $\Delta e_j(b(j) + 1)$ ,计算  $E_2$ :

$$E_2 = \Delta e_j(b(j) + 1) - \Delta e_\nu(b(\nu)). \quad (10)$$

4)若  $E_1 \leq E_2$ , $i$  信道减 1 dB, $\nu$  信道加 1 dB;反之, $j$  信道加 1 dB, $\nu$  信道减 1 dB。从而作相应的能量调整,至此完成满足约束条件的比特分配。

## 4 仿真分析

为了检验本自适应比特分配算法(adaptive bits allocation algorithm, ABA)的性能,将此算法与等比特分配算法作仿真比较。对各不同信噪比情况都作 100 次蒙特卡罗<sup>[13]</sup>仿真。自适应分配一次持续时间用相关时间表示,此期间内假设信道冲激响应保持不变。这里取信道中 1 dB 高斯白噪声的单边功率谱密度为  $N_0 = 1$ ,对平均每个子信道传输比特数  $(\text{avg}(b))$  的不同情况分别作仿真分析,并分别与 QPSK、16QAM、64QAM 的等比特分配相比较。

时变信道对第  $l$  个 OFDM 符号的冲激响应为

$$h_l(t) = \sum_{i=0}^{r-1} \mu_i(i) e^{j\theta_l(i)} \delta(t - \tau_l(i)), \quad (11)$$

其中  $\mu_i(i)$ 、 $\theta_l(i)$ 、 $\tau_l(i)$  分别是第  $i$  条路径的幅度、相位和相对时延, $r$  是路径数。具体仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设定

信道带宽	5 MHz
子信道数 $N$	64
保护间隔	16
多径路数	4
分配算法相关时间	50OFDM 符号周期
各路径功率衰减方式	指数衰减
各子信道比特分配可选	0,1,2,4,6,8

仿真的结果如图 3-5 所示。

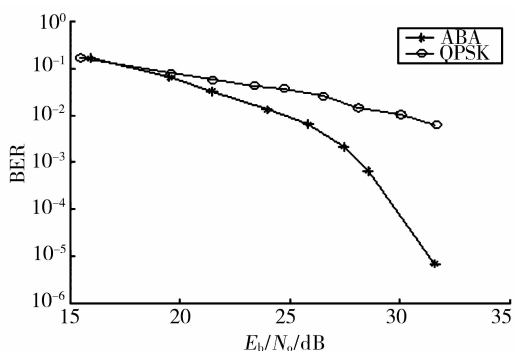


图 3  $E_b/N_0$  与 BER 的关系 ( $\text{avg}(b)=2$  时)

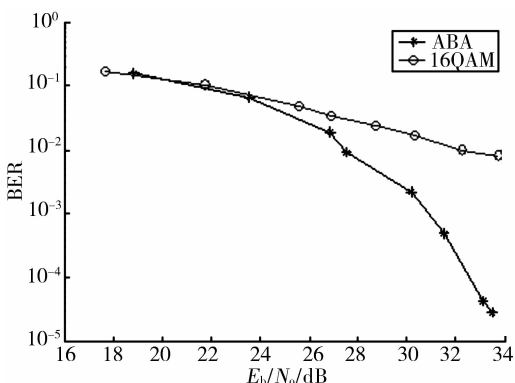


图 4  $E_b/N_0$  与 BER 的关系 ( $\text{avg}(b)=4$  时)

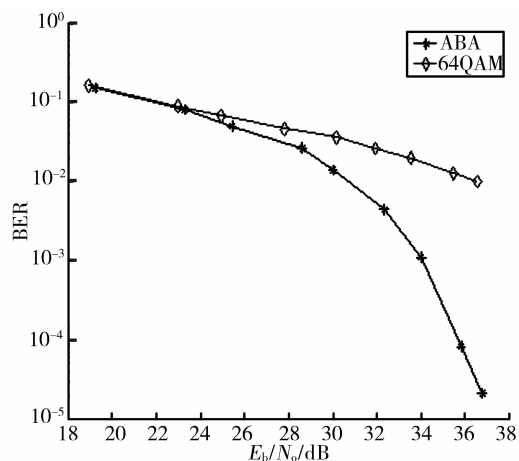


图 5  $E_b/N_0$  与 BER 的关系 ( $\text{avg}(b)=6$  时)

由仿真结果可见,采用的自适应比特分配 (ABA)算法在误码率性能上明显优于等比特分配。在误码率为  $10^{-2}$  时,平均比特信噪比 ( $E_b/N_0$ ) 要下降 5 dB 左右。随着误码率性能要求的提高,自适应分配的信噪比优势更明显。接收机的误码率取决于调制解调方式和接收机每比特的信噪比;当子信道平均比特数增加,在相同误码率情况下,所需的平均

比特信噪比升高。即相同信道条件及性能要求下,在增加系统传输速率时,自适应分配算法可明显减少了系统总的传输功率。

## 5 结 语

仿真结果表明,在以 OFDM 为核心调制技术的认知无线电系统中,本自适应动态比特分配算法的误码率性能比等比特分配算法较好;在系统传输速率增加时;与等比特分配算法相比,本算法可以减少系统总的传输功率。仅以 QPSK 和 QAM 为例进行仿真验证,对其它的编码调制方式有待以后做进一步研究。

## 参考文献:

- [1] HAYKIN S. Brainempowered wireless communications [J]. IEEE JSAC, 2005, 23 (2): 201-220.
- [2] YANG T S, HALLEN D A, HALLEN H. Enabling adaptive OFDM for mobile radio channels [C] // Military Communications Conference, 2004. North Cardina: IEEE, 2004(2): 704-710.
- [3] LI Z, WANG W H, ZHOU W A, et al. A modified sub-optimum adaptive bit and power allocation algorithm in wideband OFDM system [J]. Electrical and Computer Engineering, 2003, 3(5): 1589-1592.
- [4] TORABI M, SOLEYMANI M R. Adaptive bit allocation for space-time block coded OFDM system [C] // Acoustics, Speech, and Signal processing, 2003. [s. l.]: Proceedings of (ICASSP '03), 2003(4): 409-412.
- [5] IEEE 802. 22. Working group on wireless regional area networks [EB/OL]. (2003-02-13) [2004-05-12] <http://www.IEEE802.org/22/2004>.
- [6] CAO X, ZHU G X, LING X J, et al. Subband based adaptive bit and power allocation for OFDM systems wireless communications [C] // Networking and Mobile Computing 2006. [s. l.]: WICOM 2006: 1-4.
- [7] HARTOGS D H. Ensemble modem structure for imperfect transmission media: U. S. A., 4679227 [P]. 1987-7-12.
- [8] LAI Q T, YIN J X, LIN F, et al. Performance of adaptive bit and power allocation MIMO-OFDM system based on greedy algorithm [J]. Wireless Communications, 2005(9): 44-49.
- [9] CZYLWIK A. Adaptive OFDM for wideband radio channels [J]. IEEE Globecom, 1996(8): 713-718.
- [10] SONALKAR R, SHIVELY R. An efficient bit-loading algorithm for DMT applications [J]. IEEE Globecom, 1998: 2683-2688.
- [11] JANG J H, LEE K WANG B, LEE Y H. Transmit power and bit allocation for OFDM system in a fading channel [C] // GLOBECOM '03. San Francisco: [s. n.], 2003(2): 858-862.

(下转第 1193 页)

## 4 结 论

提出了一种适用于硬件实现的离散混沌图像加密算法,并在 FPGA 上实现了该算法。首先介绍了该算法的加密解密过程和 4 个基本变换,并分析了该算法适宜于 FPGA 实现的特点。随后设计了对应于该算法的主要功能模块及相应的输入、输出和控制模块,并在 Cyclone EP1C6 芯片上实现了一个完整的图像加密系统。该文最后分析了算法的安全性及系统性能。实验证明,该系统安全性高,加密速度快,硬件资源消耗小,非常适宜于低端 FPGA 开发。

### 参考文献:

- [1] LIAN S, SHUN J, WANG Z. A block cipher based on a suitable use of the chaotic standard map[J]. *Chaos Soliton & Fractals*, 2005, 26 (1):117-129.
- [2] NECHVATAL J. Report on the development of the advanced encryption standard[J]. *National Institute of Standards and Technology*, 2000,10:201-203.
- [3] PICHLER F, SCHARINGER J. Ciphering by Bernoulli shifts in finite abelian groups [J]. *Contributions to General Algebra. Proc. Linz-Conference*, 1994:465-476.
- [4] SCHAROMGER J. Fast encryption of image data using chaotic Kolmogorov flows[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1998, 7(2): 318-325.
- [5] FRIDRICH J. Symmetric ciphers based on two-dimensional chaotic maps[J]. *I J Bifur Chaos*, 1998, 8(6):1259-64.
- [6] CHEN G, CHEN Y, LIAO X. An extended method for obtaining S-boxes based on three-dimensional chaotic Baker maps [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2007; 31(3), 571-579.
- [7] TANG G P, LIAO X F, CHEN Y. A novel method for

designing S-boxes based on chaotic maps[J]. *Chaos, Solitons & Fractals* 2005;23:413-9.

- [8] KOHDA T, TSUNEDA A. Statistics of chaotic binary sequences [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*,1997,43(1):104-12.
- [9] CHEN G, MAO Y, CHUI C. Symmetric image encryption scheme based on 3D chaotic cat maps[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2004, 21 (3): 749-761.
- [10] TANG G P, LIAO X F. A method for designing dynamical S-boxes based on discretized chaotic map[J]. *Chaos, Solitons & Fractals* 2005,23:9-1901.
- [11] QI D, ZOU J, HAN X. A new class of scrambling transformation and Its application in the image information covering[J]. *Science China*, 2000, 43(3): 304-312.
- [12] ZHANG M, Shao G, ANDYI K. T-matrix and its applications in image processing [J]. *Electronics Letters*,2004, 40(25): 1583-1584.
- [13] MANICCAM S, BOURBAKIS N. Image and video encryption using SCAN patterns [J]. *Pattern Recognition*,2004, 37(4): 725-737.
- [14] LIN C J, TSAI H M. FPGA implementation of a wavelet neural network with particle swarm optimization learning [J]. *Mathematical and Computer Modelling*,2008, 47:982-996.
- [15] FAIEDH H, GAFSI Z, TORKI K, BESBES K. Digital hardware implementation of a neural network used for classification[J]. *International Conference on Microelectronics*,2004(12):551-554.
- [16] MAEDA Y, TADA T, FPGA implementation of a pulse density neural network with learning ability using simultaneous perturbation[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*,200314 (3) : 688-695.

(编辑 侯 湘)

(上接第 1188 页)

- [12] WONG C. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999,17(10):1747-1758.
- [13] QIU Y H, PAN Y H. Adaptive bit and power allocation with adaptive transmit diversity for broadband MISO/OFDM wire less transmission [C] // *Neural Networks and Signal Processing. New Jersey: Proceedings of the 2003 International Conference*, 2003(2):1472-1476.

- [14] HU Z P, ZHU G X, XIA Y, et al. Adaptive subcarrier and bit allocation for multiuser MIMO-OFDM transmission [C] // *Vehicular Technology Conference 2004. [s.l.]: VTC 2004-Spring, 2004(2):779 -783.*
- [15] TU J C, CIOFFI J M. A loading algorithm for the concatenation of codes with multi-channel modulation methods[J]. *IEEE Globecom*,1990:1183-1187.

(编辑 侯 湘)