

基于 Otsu 准则的 TDCS 自适应判决门限算法

王 杰, 毛玉泉, 张衡阳, 郭 尧, 李 波

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

摘要 提出了一种基于 Otsu 准则的 TDCS 自适应门限选择方案, 该方法首先对信道感知的频谱幅值进行灰度映射, 然后利用 Otsu 准则将频谱灰度分为背景噪声和干扰 2 类, 同时确定出最佳的分类阈值作为 TDCS 剔除干扰的判决门限。该方法能够根据对信道的感知结果动态地搜索最佳判决门限, 具有很强的自适应能力。仿真结果表明: 文中所提方法在信道背景噪声变化时表现出比传统方法优异的性能, 尤其是当背景噪声升高到一定程度时, 传统固定门限值方法的通信系统将不能正常工作, 而文中所提方法还具有良好的通信性能。

关键词 变换域通信系统; Otsu 准则; 自适应门限; 基函数; 频谱感知; m 序列

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.04.017

中图分类号 TN92 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)04-0071-05

TDCS Adaptive Threshold Selection Algorithm Based on Otsu Guidelines

WANG Jie, MAO Yu-quan, ZHANG Heng-yang, GUO Yao, LI Bo

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: A new TDCS adaptive threshold selection algorithm based on Otsu guidelines is proposed. In this algorithm, the spectral amplitude of the channel sensing are gray mapped, the spectrum grayscale is divided into background noise and interference by using Otsu guidelines, the best classification threshold is determined as the TDCS interference-rejecting decision threshold as well. The method is of strong adaptive capacity based on the perception of the channel and can be used to search the best decision threshold dynamically. Simulation results show that, the proposed method demonstrates superior performance than the traditional methods in the changing of channel background noise, especially when the background noise is increased to a certain extent, the communication system with traditional fixed threshold method will not work properly, but the use of the proposed method still makes the system performance good.

Key words: TDCS; Otsu guidelines; adaptive threshold; basis function; spectrum sensing; m sequence

变换域通信系统(Transform Domain Communication System, TDCS)是基于变换域处理技术和扩频技术发展起来的一项新技术, 具有很强的抗干扰能力^[1], 并且“见缝插针”的通信方式使它具有很高的频谱利用率, 作为认知无线电的候选技术之一而得到广泛研究^[2]。TDCS 通过在收发两端联合设

计波形来把有用信号的能量放到无干扰频段, 即信息调制后的传输信号不包含干扰频段的频谱分量^[4], 从而达到主动抵抗干扰的目的。另外, 随着伪随机相位的引入, TDCS 基函数(Basis Function, BF)具有类似于白噪声的性质, 从而使 TDCS 在有着很强的抗干扰性能的同时具有低截获率/低检测

收稿日期: 2013-01-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61202490); 陕西省自然科学基金资助项目(2010JQ8010)

作者简介: 王 杰(1987-), 男, 云南昭通人, 硕士生, 主要从事航空通信抗干扰技术研究。

E-mail: xdwj061216@126.com

概率(Low Probability of Interception/Low Probability of Detection, LPI/LPD)特性^[5]。

在 TDCS 中, BF 的生成算法是其核心内容, 包括 BF 幅度谱形成算法和随机相位生成算法两部分。其中幅度谱形成算法决定了 BF 在变换域中的能量分布是否能避开干扰^[6], 决定着 TDCS 抗干扰能力的大小; 而随机相位生成算法决定了系统的 LPI/LPD 性能和多址能力^[7], 不在本文探讨范围之内。在剔除干扰频段形成 BF 幅度谱过程中, 传统方法是选择一个固定值作为判决门限^[8], 将高于该门限的频段设为 0 以剔除干扰, 反之设为 1 以保留此频段。但是若门限值取得过大, 可能会导致窄带干扰信号的漏检, 不能将干扰剔除干净而使 BF 中混有干扰的频率分量, 使系统误码率增加; 若取得太小, 可能剔除掉本不存在干扰频段而导致可用频谱的浪费, 使 BF 频率组成简单而降低其相关性能。

针对上述问题, 受大津法(Otsu)的启示, 将电磁环境感知的频谱幅值进行灰度映射后利用 Otsu 算法来自适应地选择最佳判决门限值。与传统固定门限值方法相比, 基于 Otsu 准则的 TDCS 自适应门限算法可以随着电磁环境的变化而实时地调整门限值, 具有很强的自适应性, 最后通过仿真验证了该算法的可行性和有效性。

1 TDCS 及 Otsu 的频谱幅值分析

1.1 TDCS 基本工作原理

从 1988 年 German 提出 TDCS 的思想^[9]以来, 在其独特的抗干扰方式和当今频率资源日益紧张的推动下, 变换域通信得到广泛的研究, 其基本工作原理见图 1、图 2, 它是基于 FFT 的变换域通信系统, 其他变换域通信系统的原理图基本一样, 只是将相应变换模块更换为其他的变换方法^[10-11]。

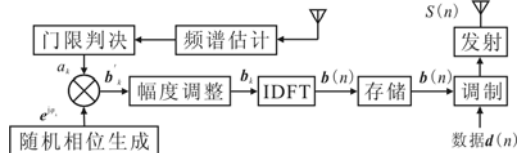


图 1 TDCS 发射机原理图

Fig. 1 Transmitter schematics of TDCS

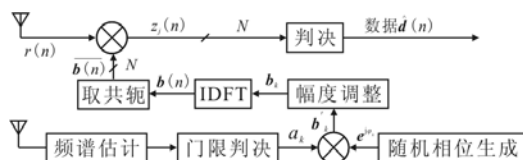


图 2 TDCS 接收机原理图

Fig. 2 Receiver schematics of TDCS

图 1 中, TDCS 发射机对其工作信道的电磁环境以周期为 T_c 进行采样, 得到信道的实时功率谱, 然后将每个采样点的功率谱幅值和门限值比较, 大于门限值的对应位置设定为 0, 小于或等于门限值的位置设定为 1, 从而生成 BF 的幅度谱 a_k 。将 a_k 和 m 序列映射得到的随机相位 $e^{j\theta_k}$ 对应相乘, 得到 BF 的频域形式:

$$\mathbf{b}'_k = a_k e^{j\theta_k}, \quad k=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

对 \mathbf{b}_k 进行幅度调整, 以确保发射信号的能量能够相同:

$$\mathbf{b}_k = c_k \mathbf{b}'_k = c_k a_k e^{j\theta_k}, \quad k=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中 $c_k = \sqrt{N/N_k}$, N_k 是频谱幅值为 1 的个数; N 为 BF 长度。将式(2)做离散傅里叶反变换(Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT)得到 BF 的时域离散形式:

$$\mathbf{b}(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [c_k a_k e^{j\theta_k} e^{j2\pi kn/N}] \right\} \delta(n - mT_s) \quad (3)$$

式中 T_s 为 BF 的周期, 且 $T_s = NT_c$ 。

最后将 $\mathbf{b}(n)$ 存储起来作为调制的 BF。

图 2 中, TDCS 接收端采用与发射端相同的技术生成相应的基函数, 只是在 IDFT 变换后多一个共轭运算, 得到 BF 的共轭 $\overline{\mathbf{b}(n)}$:

$$\overline{\mathbf{b}(n)} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [c_k a_k e^{-j\theta_k} e^{j2\pi kn/N}] \right\} \delta(n - mT_s) \quad (4)$$

将接收到的信号矢量 $\mathbf{r}(n)$ 和 $\overline{\mathbf{b}(n)}$ 的 N 次循环移位矢量 $\overline{\mathbf{b}(n)}_j$ 做相关运算: 估计出所传送的数据符号 $\hat{\mathbf{d}}(n)$ 。

1.2 Otsu 频谱幅值分析

Otsu 是在图像分割中提出的最大类间方差法, 也叫大津法^[12-13], 因计算简单、自适应性强而被广泛使用。按照 Otsu 思想, 将环境频谱幅值映射为灰度级为 L 的灰度直方图形式, 其像素的灰度取值为 $[0, 1, \dots, L-1]$, 灰度值是 i 的像素个数为 n_i , 则总的像素数为:

$$M = \sum_{i=0}^{L-1} n_i \quad (5)$$

灰度值 i 出现的概率为:

$$p_i = n_i / M \quad (6)$$

设以灰度 T 为阈值将图像像素分成两类, 即灰度为 $[0, 1, \dots, T]$ 的像素构成一类, 记为 C_0 ; 灰度为 $(T, T+1, \dots, L-1]$ 的像素构成另外一类, 记为 C_1 。将 C_0 和 C_1 出现的概率分别记为 $p_0(T)$ 和 $p_1(T)$, 2 类的灰度均值记为 $\mu_0(T)$ 、 $\mu_1(T)$, 两类的方差记为 $\sigma_0^2(T)$ 、 $\sigma_1^2(T)$ 。整个环境频谱幅值的灰度均值为 μ , 2 类的类间距离平方 $\sigma_0^2(T)$ 为:

$$\delta_b^2(T) = p_0(T)(\mu_0(T) - \mu)^2 + p_1(T)(\mu_1(T) - \mu)^2 \quad (7)$$

按照 Otsu 提出最大类间距离准则下的门限值为 T^* 有:

$$\delta_b^2(T^*) = \max_{0 \leq T < N-1} \delta_b^2(T) \quad (8)$$

也可以按照 2 类的类内方差之和最小来寻找最佳门限值 T^* , 设 2 类的类内方差之和为:

$$\delta_w^2(T) = P_0(T)\delta_0^2(T) + P_1(T)\delta_1^2(T) \quad (9)$$

最佳门限值 T^* 可以按下式搜索得到:

$$\delta_w^2(T^*) = \min_{0 \leq T < N-1} \delta_w^2(T) \quad (10)$$

由 Otsu 理论已知, 最大类间距离准则和最小类内方差准则找出的门限值是相同的。

2 门限值自适应选择步骤

TDCS 具有的很强的抗干扰能力和 LPI/LPD 性能都归功于其特殊的基函数生成方式, 其中 TDCS 幅值生成决定了其在变换域中的能量分布是否避免干扰, 即决定着 TDCS 抗干扰能力和大小, 且通信环境可能随时在变, 传统方法利用一个固定值作为判决门限显然缺乏自适应性而不利于 TDCS 性能的发挥。为此, 提出了一种基于 Otsu 准则的 TDCS 门限自适应选择方法, 具体步骤如下:

Step1 对频谱感知结果进行灰度映射。将频谱幅值在区间 $[\min(|F(\omega)|), \max(|F(\omega)|)]$ 上平均划分为 N 个灰度值, 然后将各频点幅值映射为与其最近的灰度值整数:

$$i_k = \left\lfloor \frac{|F(\omega_k)| - \min(|F(\omega)|)}{\max(|F(\omega)|) - \min(|F(\omega)|)} (N-1) \right\rfloor, \quad k=0, 2, \dots, (N-1) \quad (11)$$

式中: $F(\omega_k)$ 为频谱感知得到的环境频谱幅值; $\lfloor x \rfloor$ 表示对 x 按四舍五入取整; i_k 为对应灰度值; N 为采样点数。

Step2 统计概率分布。灰度值 i 出现的概率 p_i 表示为:

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (12)$$

式中: n_i 为灰度值为 i 的频率点数; N 为采样点数。

Step3 初始化。设循环扫描的起始值 $T=0$ 。

Step4 以 T 为阈值将频点分成 2 类。即幅值 $|F(\omega)| \leq T$ 的构成一类 C_0 , $|F(\omega)| > T$ 的构成另一类 C_1 。

Step5 分别计算各类的概率:

$$P_0(T) = \sum_{i=0}^T p_i \quad (13)$$

$$P_1(T) = \sum_{i=T+1}^{N-1} p_i = 1 - P_0(T) \quad (14)$$

Step6 分别计算各类的均值和方差:

$$\mu_0(T) = \sum_{i=0}^T i \frac{p_i}{P_0(T)} = \frac{1}{P_0(T)} \sum_{i=0}^T i p_i \quad (15)$$

$$\mu_1(T) = \sum_{i=T+1}^{N-1} i \frac{p_i}{P_1(T)} = \frac{1}{P_1(T)} \sum_{i=T+1}^{N-1} i p_i \quad (16)$$

$$\delta_0^2(T) = \sum_{i=0}^T (i - \mu_0)^2 \frac{p_i}{P_0(T)} \quad (17)$$

$$\delta_1^2(T) = \sum_{i=T+1}^{N-1} (i - \mu_1)^2 \frac{p_i}{P_1(T)} \quad (18)$$

Step7 按照式(7)和式(8)计算 2 类的类间距离平方及 2 类的类内方差之和;

Step8 顺序迭代。根据式(8)和式(10)最大类间距离准则和最小类内方差准则指标, 找出最佳判决门限 T^* 。

3 仿真与分析

在仿真中选用单音、多音 2 种干扰样式, 其中单音干扰中心频率为 200 Hz, 多音干扰由中心频率分别为 75 Hz、150 Hz、200 Hz、285 Hz、340 Hz、395 Hz、440 Hz 共 7 个单音干扰组成, 谱估计采用 20 阶的 AR 模型, 电磁环境谱估计结果见图 3; 传统固定门限选为谱估计功率谱最大幅值的 40%, 图 4~图 7 为存在多音干扰、背景噪声变化时不同门限法对干扰剔除的结果。计算误码率时迭代 1 000 次, 采用 9 级的最大移位寄存器序列映射产生相应的伪随机相位矢量, 信道采样频率为 512 Hz, 采样点数 N 即生产基函数长度为 512, 按照式(11)将频谱感知结果映射为 512 个灰度级, 最后按照 Otsu 最大类间距离准则求得 T 作为判决门限值进行干扰剔除, 采用双极性调制方式。

由仿真结果可以看出, 在低背景噪声情况下, 图 4 所示为固定门限判决方法对、多音干扰剔除的结果, 其能够保留更多的频率资源, 但对干扰信号的剔除不够干净; 在图 5 中, 多音干扰的自适应门限判决方法能够精确定位并剔除干扰频段, 比固定门限方法具有更好的抗干扰能力。当背景噪声很高时, 环境谱幅值高于固定判决门限值而造成无频段可用的情况, 如图 6 所示, 此时 TDCS 已没有可用频段供其传输数据信息, 通信系统已然失效; 图 7 为高环境噪声时自适应门限判决方法对干扰剔除的结果, 其能够根据背景噪声的变化而自动搜索门限值, 该算

法仍然可以有效剔除干扰频段,使 TDCS 仍然具有良好的通信性能。

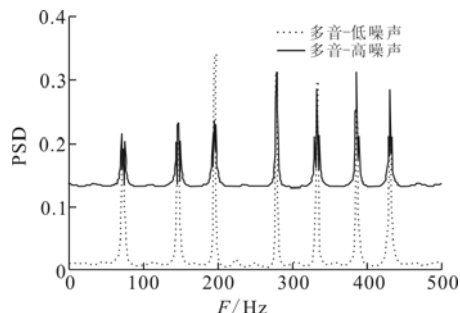


图3 多音干扰功率谱估计

Fig. 3 Power spectrum estimation of multiple interference

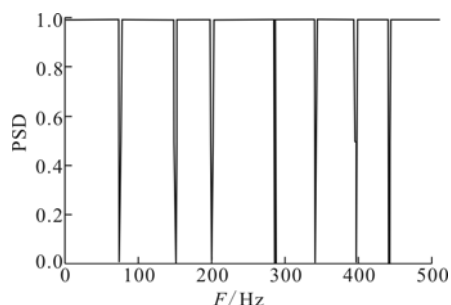


图4 多音低噪声-固定门限 BF 幅度谱

Fig. 4 The BF amplitude spectrum of fixed threshold with multiple interference and low noise

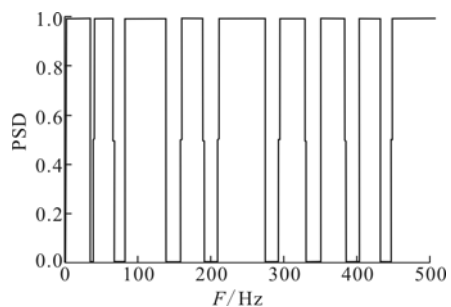


图5 多音低噪声-自适应门限 BF 幅度谱

Fig. 5 The BF amplitude spectrum of adaptive threshold with multiple interference and low noise

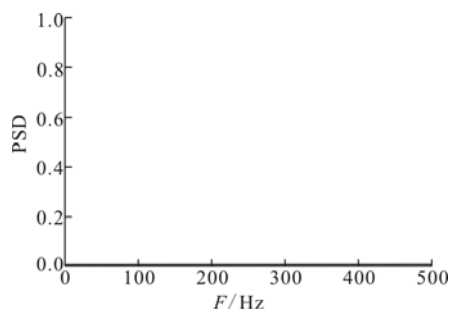


图6 多音高噪声-固定门限 BF 幅度谱

Fig. 6 The BF amplitude spectrum of fixed threshold with multiple interference and high noise

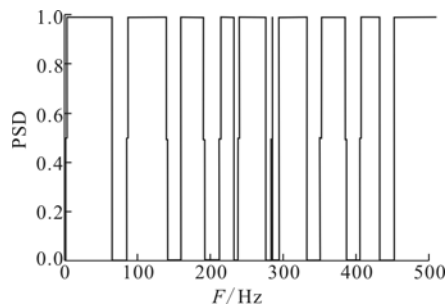


图7 多音高噪声-自适应门限 BF 幅度谱

Fig. 7 The BF amplitude spectrum of adaptive threshold with multiple interference and high noise

由图8可以看出,在低背景噪声情况下,2种门限判决方法都具有良好的通信性能,虽然自适应门限方法剔除了部分干净频段,但是对系统误码率影响并不大;当背景噪声升高时,由图9可以看出,基于固定门限判决方法的通信系统已经失效,其误码率曲线表现为一条居高不下的直线,而基于本文自适应门限判决的通信系统仍然具有理想的误码率表现,其误码率性能与理论值仍然吻合得很好。

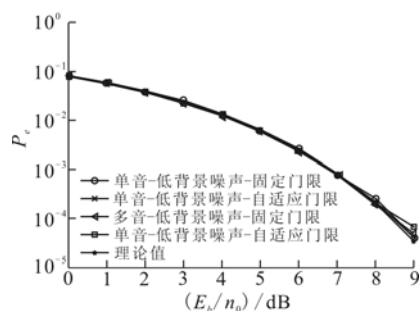


图8 低噪声-不同干扰-不同门限法的误码率

Fig. 8 The bit error rate in low noise with different interference and different method of threshold

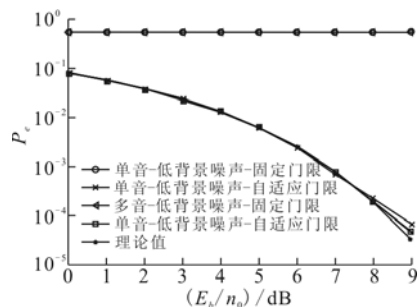


图9 高噪声-不同干扰-不同门限法的误码率

Fig. 9 The bit error rate in high noise with different interference and different method of threshold

4 结语

变换域通信系统是良好的抗干扰性能完全取决于其基本调制波形即基函数生成过程中对干扰的剔除,所以研究一种自动而高效的门限值选择算法对

提高 TDCS 抗干扰性能有着重要的作用。本文所提的基于 Otsu 准则的 TDCS 自适应判决门限算法能够根据背景噪声的变化而自动搜索门限值,大大提高了 TDCS 的自适应性和主动抗干扰能力。最后通过仿真验证了所提方法的可行性和有效性,其在军事通信中将具有重要的参考价值。

参考文献(References):

- [1] 史军,迟永刚,张乃通. 变换域通信系统:原理、技术与发展趋势[J]. 南京邮电大学学报:自然科学版, 2009,29(2): 87-94.
SHI Jun, CHI Yonggang, ZHANG Naitong. Principle, technology and tendency of transform domain communication system [J]. Journal of Nanjing university of posts and telecommunications; natural science edition, 2009,29(2): 87-94. (in Chinese)
- [2] Zhou R L, Han Q, Cooper Reginald, et al. A software defined radio based adaptive interference avoidance TDCS cognitive radio [C]//IEEE international conference on communication. Cape Town, South Africa: IEEE press, 2010: 1-5.
- [3] Han Chuan, Wang Jun, Yang Yaling, et al. Addressing the control channel design problem: OFDM-based transform domain communication system in cognitive radio [J]. Computer networks, 2008, 52: 795-815.
- [4] Roberts M L, Temple M A, Mills R F, et al. Interference suppression characterization for spectrally modulated, spectrally encoded signals [J]. IEE electronic letters, 2006, 42(19): 1103-1104.
- [5] 任清华,李正刚. 变换域通信系统及抗干扰性能仿真[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2009, 10(4): 86-90.
REN Qinghua, LI Zhenggang. Transform domain communication system and its performance simulation of interference suppression [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2009, 10(4): 86-90. (in Chinese)
- [6] 芮国胜,苗俊,杨霄. 变换域通信系统的分形门限研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(13): 4077-4083.
RUI Guosheng, MIAO Jun, YANG Xiao. Research on fractal threshold for TDCS [J]. Journal of system simulation, 2009, 21(13): 4077-4079. (in Chinese)
- [7] Tamayo Alfred A. Applying frequency domain equalization to code-division multiple access and transform domain communications systems [D]. Ohio: Air force institute of technology, 2008.
- [8] 何智青. 变换域通信系统设计、建模与仿真研究[D]. 西安:西北工业大学, 2003.
HE Zhiqing. The transform domain communication system design, modeling and simulation [D]. Xi'an: Northwestern polytechnical university, 2003. (in Chinese)
- [9] German E H. Transform domain signal processing study final report [R]. US F30602-86-C-0133, DTIC: ADB132635, 1988.
- [10] 王传丹,张忠培,李少谦. 一种新的基函数产生方法与性能分析[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(4): 648-652.
WANG Chuandan, ZHANG Zhongpei, LI Shaoqian. A new method of basis function generation and Its performance analysis [J]. Journal of university of electronic science and technology of China, 2006, 35(4): 648-652. (in Chinese)
- [11] 龙李军. 变换域通信系统及其应用研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009.
LONG Lijun. The transform domain communication system and its applied research [D]. Chongqing: Chongqing university, 2009. (in Chinese)
- [12] 许向阳,宋恩民,金良海. Otsu 准则的阈值性质分析[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2716-2719.
XU Xiangyang, SONG Enmin, JIN Lianghai. Characteristic analysis of threshold based on Otsu criterion [J]. Acta electronica & sinica, 2009, 37(12): 2716-2719. (in Chinese)
- [13] 胡斌,宫宁生. 一种改进的 Otsu 阈值分割算法[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(12): 153-155.
HU Bin, GONG Ningsheng. An improved Otsu's thresholding segmentation method [J]. Microelectronics & computer, 2009, 26(12): 153-155. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)