

小波变换域通信系统中连续均值剔除算法

徐兵政¹, 任清华^{1,2}, 孟庆微¹, 刘 洋¹

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077;

2. 中国电子科技集团公司航天信息应用技术重点实验室, 石家庄, 050081)

摘要 针对小波变换域通信系统与基于频域的变换域通信系统基函数生成方式不同而带来的难以有效剔除干扰的问题, 将向后连续均值剔除算法(CME)和向前连续均值剔除算法(FCME)引入小波变换域通信系统幅度谱成型模块。2 种算法将小波变换域分为干扰子带和噪声子带两部分, 利用连续迭代、逐次逼近的递归方法自适应地计算相应门限阈值, 从而对不同类型的干扰进行有效剔除, 无需对噪声功率进行估计。仿真结果表明: 在强干扰情况下, 2 种算法对系统误码率的改善具有明显优势, 并且在音频干扰的情况下, CME 算法抗干扰性能增益要优于 FCME 算法; 在窄带干扰的情况下, FCME 算法抗干扰性能增益要优于 CME 算法; 在线性调频干扰的情况下, 2 种算法抗干扰性能增益接近。

关键词 小波变换; 变换域通信系统; 连续均值剔除算法; 门限判决

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.04.016

中图分类号 TN925 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)04-0093-06

Research on Consecutive Mean Excision Algorithm in Wavelet Domain Communication System

XU Bingzheng¹, REN Qinghua^{1,2}, MENG Qingwei¹, LIU Yang¹

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. CETC Key Laboratory of Aerospace Information Applications, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Aimed at the problems that in wavelet domain communication system, the traditional generation method of basis function is different from Transform Domain Communication System based on frequency domain, and the traditional threshold decision algorithm is difficult to eliminate the interference effectively in wavelet domain communication system, Consecutive Mean Excision (CME) algorithm and Forward Consecutive Mean Excision(FCME) algorithm are introduced into amplitude spectrum shaping module of wavelet domain communication system. The two algorithms divide the wavelet transform domain into two parts, i. e. the interference sub-band and the noise sub-band. They utilize the recursive method of continuous iteration and successive approximation for calculating the threshold adaptively, effectively eliminating different types of interference without estimation of the noise power. The simulation results show that these two algorithms are prior to the traditional threshold algorithm under the condition of strong interference. And in the case of audio interference, the anti-interference performance of CME algorithm is superior

收稿日期: 2017-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(61401499); 航天信息应用技术重点实验室高校合作课题(KX162600022)

作者简介: 徐兵政(1993—), 男, 山东威海人, 硕士生, 主要从事军事航空通信、变换域通信系统研究。E-mail: xubzheng@sina.com

引用格式: 徐兵政, 任清华, 孟庆微, 等. 小波变换域通信系统中连续均值剔除算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(4): 93-98. XU Bingzheng, REN Qinghua, MENG Qingwei. Research on Consecutive Mean Excision Algorithm in Wavelet Domain Communication System[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(4): 93-98.

to FCME; in the case of narrowband interference, the anti-interference performance of FCME algorithm is better than that of CME; and in the case of linear frequency modulation jamming, the two algorithms behave close to each other.

Key words: wavelet transform; transform domain communication system; consecutive mean excision; threshold decision

变换域通信系统(Transform Domain Communication System, TDCS)是一种新型认知无线通信系统,它能够通过频谱感知获取空间电磁环境信息,找到频谱“空洞”,因而具备主动式抗干扰与隐蔽通信能力^[1-8]。随着电磁环境的日益复杂,以傅立叶变换为基准的传统 TDCS 难以有效应对非平稳干扰。小波变换是 20 世纪 80 年代中期迅速发展起来的时频分析方法,具有自动“聚焦”功能,可以有效针对非平稳干扰。但是由于小波变换的多分辨分析导致基函数生成方式与传统的 TDCS 不同^[9],从而导致门限判决算法有所改变。

由于基函数生成的差异,本文不再与传统 TDCS 的文献进行比较。文献[10]首次提出以噪声功率作为小波变换域通信系统(Wavelet Domain Communication System, WDCS)门限阈值确定的标准。文献[11]以 1.5 倍噪声平均功率作为门限阈值,但是事实上噪声的估计只是利用了噪声先验条件对含噪声信号进行最小均方误差意义上的估计,因此该方法实际应用性不强,并且 1.5 倍噪声功率容易造成干扰漏检,导致误码率恶化。向后连续均值剔除算法(Consecutive Mean Excision, CME)以及向前连续均值剔除算法(Forward Consecutive Mean Excision, FCME)是一种离群值信号检测的诊断方法,尽管它们计算简单,但是对干扰的检测非常有效,并且该方法无需对噪声进行任何估计^[12-17]。本文首次将 CME 算法和 FCME 算法引入 WDCS,对干扰进行定位剔除,从而达到误码率降低的效果。

1 小波变换域通信系统原理

1.1 小波变换理论

小波变换是一种时频分析工具,与傅立叶变换相比可以有效的分析瞬变的、非平稳的或者时变信号。经过离散小波变换后采样环境可以形象使用尺度坐标(与频率直接相关)和时间坐标表示。图 1 所示,离散小波变换将 $C_{j+1}(k)$ 通过递推滤波器组分为一个低通带和一个高通带,得到在低阶尺度 j 的尺度系数 $C_j(k)$ 和小波系数 $D_j(k)$ 。第 2 步将低通带分为低一级的低通带和一个高通带。以此类推,直到分解为指定的层数^[18]。

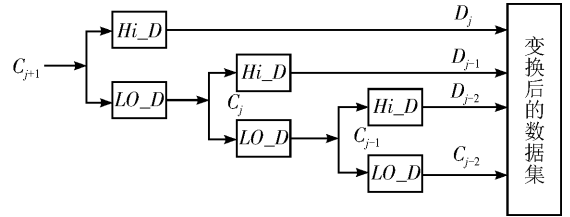


图 1 3 层小波分解树结构示意图

Fig. 1 Structure of three layer wavelet decomposition tree

1.2 变换域通信系统

如图 2 所示,首先将采样信号 $e(n)$ 通过离散小波变换进行环境谱估计得到小波系数 $C_\psi = \{C_{A_j}, C_{D_j}, \dots, C_{D_1}\}$, 此时分解层数为 j 对应的子带能量见式(1)。

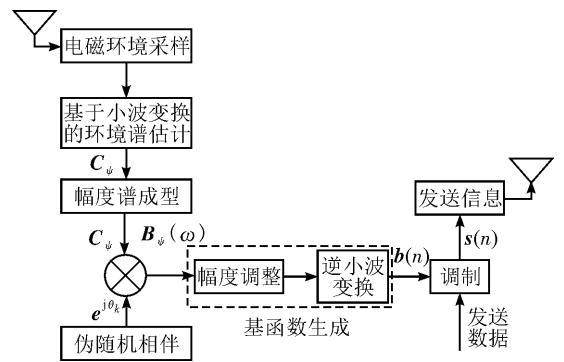


图 2 WDCS 发射机原理框图

Fig. 2 Working principle diagram of WDCS transmitter

$$WE_k = \frac{\sum_{n=1}^{N_k} |C_{\psi_k}(n)|^2}{N_k} \quad (1)$$

式中: C_{ψ_k} 表示第 k 个子带的小波系数, $k=1, 2, \dots, j$; N_k 表示第 k 个子带的长度。幅度谱成型技术是将能量大于门限 W_T 的子带所有的小波系数 C_{ψ_k} 设置为 0, 否则设置为 1。通过门限的比较, 得到有序列 0 和 1 组成的小波系数幅度谱 C'_ψ 。将得到的伪随机序列与 C'_ψ 相乘, 得到基函数 $B_\psi(\omega)$:

$$B_\psi(\omega) = C'_\psi(\omega) \cdot e^{i\theta_k} \quad (2)$$

对 $B_\psi(\omega)$ 进行幅度调整后, 通过小波逆变换得到时域上的基函数 $b(n)$, 经调制后通过天线发送出去。

2 CME/FCME 算法

2.1 CME 算法

CME 算法在 2002 年由 Henttu 和 Aromma 提

出,该算法认为接收信号全都是“纯净”的无干扰信号,通过多次迭代将噪声与干扰分离。将该算法用于 WDCS 需要将其改进,其原理可以简述为:

初始化:

$m = 1, J_m = \{\}, I_m = \{1, 2, \dots, N_{\text{node}}\}$, 根据式

(2) 求出第 k 个子带能量记为 $WE_k, S_m = \sum_{k \in I_m} WE_k,$

N_m 为集合 I_m 元素个数, N 子带的个数。

第 1 步: 根据以下准则求解集合 I_{m+1} 和 J_{m+1} :

$$I_{m+1} = \{k \in I_m \mid WE_k \leq T_p S_m / N_m\}$$

$$J_{m+1} = \{k \in I_m \mid WE_k > T_p S_m / N_m\}.$$

第 2 步: 计算 J_{m+1} 中子带数量记为 P 。

第 3 步: 当 $P=0$ 时或者迭代次数已经达到最大值, 仿真结束。

第 4 步: 如果未达到第 3 步条件, 更新 S, S_{m+1}

$$= S - \sum_{k \in J_{m+1}} WE_k.$$

第 5 步: $m = m + 1$, 并循环到第 1 步。

将每次循环中第 1 步中元素合并即: $J_{\text{result}} = J_1 \cup J_2 \cup \dots \cup J_m$, 就得到干扰的子带, 并将其剔除。

2.2 FCME 算法

FCME 算法是一种改进型的 CME 算法, 与 CME 不同的是, FCME 算法首先检测出接收信号中能量最小的一部分子带, 认为该子带是无干扰的。将该算法用于 WDCS 需要将其改进, 其原理如下:

第 1 步: 把子带 $S(n)$ 按照能量大小 WE_k 进行升序排序, 并将能量最低的子带设置为未受干扰, 并且计算均值 $E[S] = \frac{1}{N} \sum_{k \in I_m} WE_k$ 。将 $S(n)$ 中未被选中的其余子带记为 $S'(n)$ 。

第 2 步: 将集合 $S'(n)$ 中各个子带能量与均值 $E[S]$ 与门限系数 T_p 的积 $T_p \cdot E[S]$ 比较, 将低于门限值的子带加入集合 $S(n)$ 。

第 3 步: 重新更新 $E[S]$, 重复第 2 步, 直到 $S'(n)$ 中没有小于门限值的子带或者达到最大迭代次数。此时得到最终均值 $E[S]_{\text{result}}$, 而 $T_p \cdot E[S]_{\text{result}}$ 为最终判决门限 T 。

3 算法分析

3.1 门限参数分析

门限参数 T_p 根据无干扰条件下(理想条件)虚警概率推导得出。在没有干扰条件下, 归一化的噪声服从自由度为 2 的卡方分布。

自由度为 n 的卡方分布概率密度函数:

$$f(x) = \frac{1}{2^{n/2} \Gamma(n/2)} x^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}} \quad (3)$$

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (4)$$

$$\Gamma(n + \frac{1}{2}) = \frac{(2n-1)!!}{2^n} \sqrt{\pi} \quad (5)$$

$$\Gamma(n+1) = n! \quad (6)$$

自由度为 n 的卡方分布累积函数:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-x/2} \sum_{i=0}^{n/2-1} \frac{(x/2)^i}{i!}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

将门限 T_p 代入上式:

$$F(T_p) = 1 - e^{-T_p/2} \sum_{i=0}^{n/2-1} \frac{(T_p/2)^i}{i!} = 1 - P_f \quad (8)$$

根据式(8), 门限参数 T_p 使用了虚警概率准则对未知信号的干扰定位, 并且与噪声功率无关。在实际应用过程中虚警概率一般设为 0.01 ($T_p = 4.605$) 或者 0.001 ($T_p = 6.908$)。

3.2 算法性能分析

假设环境谱估计后子带总数量为 W_1 , 噪声的能量为 N , 干扰信号所占子带数为 W_2 ($W_1 > W_2$), 对应子带的能量为 S , 根据 CME 算法的步骤可知, 干扰子带被检测出来的条件为:

$$S + N > T_p \frac{NW_1 + JW_2}{W_1} \quad (9)$$

定义干扰子带与子带总数之比 $a = W_1/W_2$, 经过推导可以得到:

$$\frac{S}{N} > \frac{T_p - 1}{1 - T_p a} \quad (10)$$

根据式(10), 当干扰信号所占子带数非常少(即 $a \rightarrow 0$), 这时候干扰噪声之比 $\frac{S}{N} > T_p - 1$, 干扰可被检测出来, 因此 CME 算法对所占子带较少的干扰信号有很大的检测优势。

根据 FCME 算法步骤可知, 干扰子带被检测出来的条件为:

$$S + N > T_p N \Rightarrow \frac{S}{N} T_p - 1 \quad (11)$$

根据式(11)可知, 理论上 FCME 算法对干扰信号所占子带数量无关。但是在实际应用中随着干扰子带数量增加, FCME 算法性能仍然会下降, 这是因为随着干扰带宽的增大, 算法对噪声水平的估计影响就越大。

4 仿真分析

本次仿真中主要针对常见的音频干扰、窄带干扰和线性调频 (Linear Frequency Modulation, LFM) 干扰, 采样频率 $f_s = 512$ MHz, 采样间隔 $T_s =$

0.002 s,基函数长度为 512,调制方式为 BCSK;仿真参数见表 1,对应门限因子为 6.908,对 3 种类型干扰分别判别 1 000 次,以逼近检测概率值;所传输信息序列为长度 1 000 的随机序列,迭代次数为 1 000 次;不同干扰在 3 种门限判决算法下的检测概率 P_d 在图 3~5 中表示。不同干扰在 3 种门限判决算法下的随干信比 J/E 的误码率变化曲线在图 6(a)~(f)中表示。

表 1 干扰信号参数

Tab. 1 The parameters of jamming signals

干扰类型	干扰参数	
单音干扰	干扰频点	150 MHz
多音干扰	干扰频点	50,100,⋯,250 MHz
10%窄带干扰	覆盖带宽	250~300 MHz
40%窄带干扰	覆盖带宽	200~400 MHz
线性调频干扰 (单分量)	初始频率	150 MHz
	调频率	250
线性调频干扰 (多分量)	初始频率	50,250,450 MHz,
	调频率	100,200,300

图 3 所示,单音干扰情况下,传统门限算法在信噪比达到 -27 dB 时,检测概率为 1,与传统门限算法相比,FCME 算法改善约 7 dB,CME 算法改善约 10 dB;多音干扰情况下,传统门限算法在信噪比达到 -19 dB 时,检测概率为 1,FCME 算法改善约 6 dB,CME 算法改善约 8 dB。说明 CME 算法对音频干扰检测性能相比其他 2 种算法更加优越。

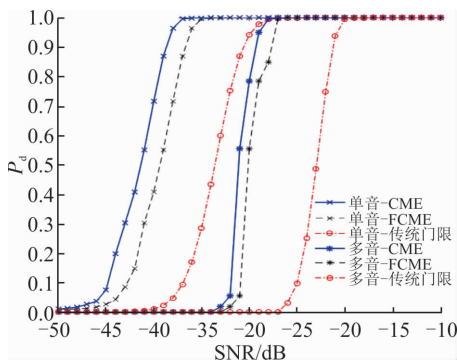


图 3 音频干扰

Fig. 3 Audio interference

图 4 中在 10%窄带干扰情况下,虽然检测概率为 1 时,3 种门限算法信噪比接近,但是相比于传统门限算法,CME 算法整体改善平均约 3 dB,FCME 算法整体改善平均约 5 dB;40%窄带干扰情况下,传统门限算法在信噪比达到 1 dB,检测概率为 1,虽然 CME 算法和 FCME 算法都在信噪比为 -5 dB 时,检测概率为 1,但是整体来看 FCME 算法比 CME 算法检测性能更加优异。说明 FCME 算法对

窄带干扰尤其是所占频带较大的窄带干扰检测性能相比其它 2 种算法更加优越。

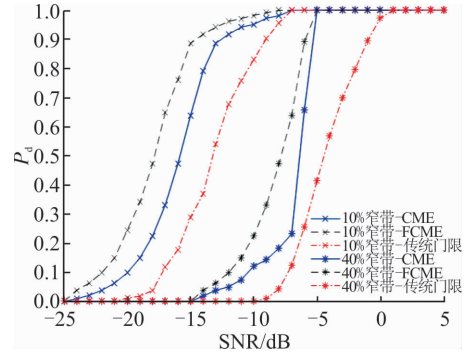


图 4 窄带干扰

Fig. 4 Narrowband interference

图 5 中在单分量 LFM 干扰情况下,2 种算法在信噪比达到 -11 dB 时,检测概率接近为 1,比传统门限算法改善约 7 dB;多分量 LFM 干扰情况下,2 种算法在信噪比达到 -5 dB 时,检测概率接近为 1,比传统门限算法改善约 6 dB。可见,对于非平稳的 LFM 干扰,CME 算法与 FCME 算法检测性能非常相似。

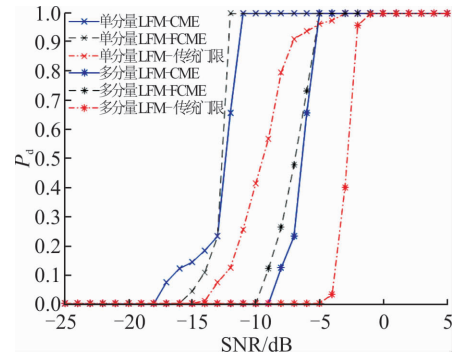


图 5 LFM 干扰

Fig. 5 Linear frequency modulation jamming

WDCS 是一种主动避开干扰的通信方式,随着干信比的增大,一旦干扰能量超过系统本身干扰容限,会导致系统通信性能急剧恶化^[19-21]。

在干扰条件下,基于 BCSK 调制的 TDCS 系统误比特率可表示为:

$$P_e = Q \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0 + \sum_{i=1}^L \sigma_{i,i}^2}} \right) \quad (12)$$

式中: $\sigma_{i,i}^2$ 为干扰功率(L 为门限剔除后漏检的干扰频谱子载波个数); N_0 为噪声能量; E_b 为信号的能量。因此系统的抗干扰增益与漏检概率 P_m 成反比,与检测概率 P_d ($P_d = 1 - P_m$) 成正比。因此干扰剔除越干净,系统的抗干扰增益越强,在误码率仿真中,利用传统门限算法与 CME 算法、FCME 算法做在不同干扰情况下比较,仿真结果见图 6(a)~(f),

在干信比较低时,3种门限算法性能相仿,这是因为 WDCS 本身具有的一定的干扰剔除能力和扩频增益足以应对能量较低的干扰,但是随着干信比不断增加,传统门限算法在不同干扰情况下逐渐达到系统干扰容限,2种算法对音频干扰、窄带干扰、LFM 干扰均有较好的抗干扰增益。但是在强情况下,CME 算法更加适音频干扰的剔除,FCME 算法对窄带干扰的剔除要优于 CME 算法。在非平稳 LFM 干扰的条件下,2种算法性能非常接近,因此针对非平稳干扰的门限剔除算法仍需要改进。

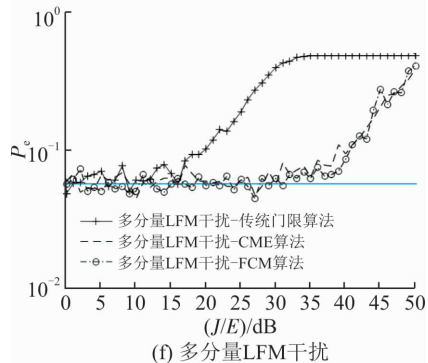
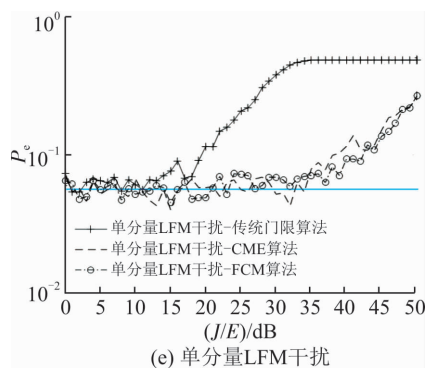
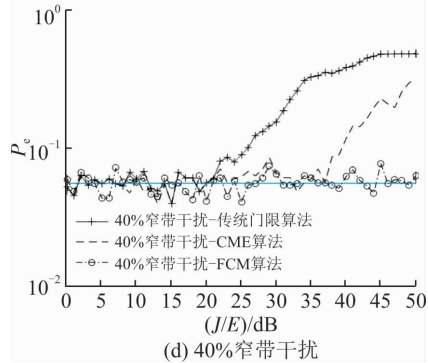
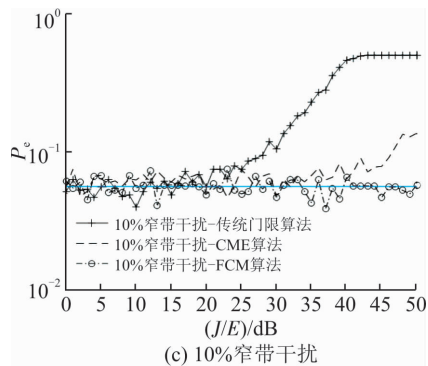
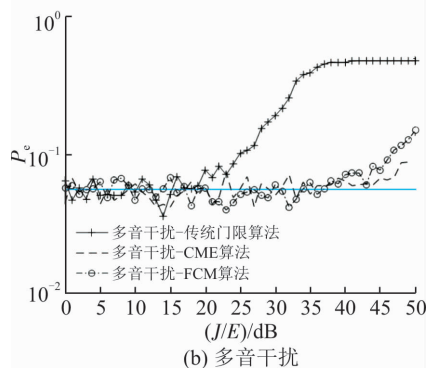
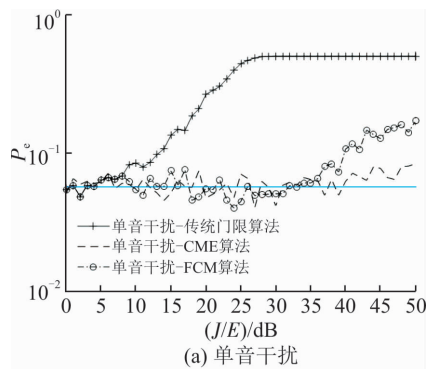


图 6 不同干扰在 3 种门限判决算法下的误码率

Fig. 6 Bit error rate of different interferences in three threshold decision algorithms

5 结语

基于迭代思想的 CME 和 FCME 算法是简单有效的干扰定位方法。本文将 2 种算法引入 WDCS, 经仿真验证,可以有效应对多种干扰,并且 CME 算法更加适合简单的音频干扰,而 FCME 算法则适合窄带干扰,尤其 40%窄带干扰提升尤为明显。可以有效降低针对多种干扰下 WDCS 的误码率,具有一定理论和实用性。

参考文献(References):

[1] JIN C, HU S, HUANG Y, et al. On Transform Domain Communication Systems under Spectrum Sensing Mismatch: A Deterministic Analysis: [J]. Sensors, 2017, 17(7):1594.

[2] CHANG C, HUAN H, XU J R, et al. Multidimensional Parallel Combinatory Transform Domain Communication System[J]. International Journal of Communication Systems, 2017, 30(11): 3249.

[3] 王桂胜,任清华,姜志刚,等. 基于信号特征空间的 TDCS 干扰分类识别[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(9): 1950-1958.

WANG G S, REN Q H, SU Y Z, et al. Jamming Classification and Recognition in Transform Domain Communication System based on Signal Feature Space[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(9):

- 1950-1958. (in Chinese)
- [4] ZHI X, HAO H, XIAO Y. Peak-to-Average Power Ratio Analysis and Reduction in Transform Domain Communication System[C]//IEEE International Conference on Signal Processing, 2017:1191-1195.
- [5] 刘立, 张衡阳, 毛玉泉, 等. 变换域通信系统抗干扰编码幅度谱成型算法[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(2):91-96.
LIU L, ZHANG H Y, MAO Y Q, et al. A Shaping Algorithm of Coded Amplitude Spectrum for Anti-Interference in Transform Domain Communication System[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(2):91-96. (in Chinese)
- [6] ROMERO L, BOSANOVA M, MATTAVELLI G, et al. TDCS Increases Cortical Excitability: Direct Evidence from TMS-EEG [J]. Cortex, 2014, 58(6):99-111.
- [7] 苏玉泽, 任清华, 韩莹, 等. TDCS的压缩感知稀疏信道估计方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2015, 16(3):56-60.
SU Y Z, REN Q H, HAN Y, et al. A Compressed Sensing Sparse Channel Estimation Method for TDCS [J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2016(3):56-60. (in Chinese)
- [8] 李楠, 任清华, 苏玉泽. 基于改进型 Logistic 混沌序列的 SPC-TDCS 多址接入研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(3):45-50.
LI N, REN Q H, SU Y Z. Research on Multiple Accesses of SPC-TDCS Based on Modified Logistic Chaotic Sequence[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2016, 17(3):45-50. (in Chinese)
- [9] SHARMA M, GUPTA R. Basis Function and PN Phase Generation in TDCS and WDCS towards Dynamic Spectrum Access[C]//Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies. IEEE, 2015:364-368.
- [10] KLEIN R W. Wavelet Domain Communication System (WDCS): Design, Model, Simulation, and Analysis [Z]. Wavelet Domain Communication System Design Model Simulation & Analysis, 2001.
- [11] 孙海欣. 基于动态谱接入的变换域通信系统及其关键技术研究[D]. 吉林:吉林大学, 2012.
SUN H X. Study on Dynamic Spectrum Access Based Transform Domain Communication System and Related Key Technologies[D]. Jilin: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [12] 莫小鹏. 扩谱通信中的自适应窄带干扰抑制算法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2014.
MO X P, The Research on Adaptive Narrowband Interference Suppression Algorithm in Spread Spectrum Communications[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [13] VARTIAINEN J, LEHTOMAKI J, SAARNISAARI H, et al. Limits of Detection for the Consecutive Mean Excision Algorithms[C]// Proceedings of the Fifth International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks & Communications, IEEE, 2010:1-5.
- [14] VARTIAINEN J, SAARNISAARI H, JUNTTI M. Analysis of the Consecutive Mean Excision Algorithms [J]. Journal of Electrical & Computer Engineering, 2010(3):44.
- [15] 吕再兴. 通信对抗中的干扰检测算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2011.
LYU Z X. Research on Interference Detection Algorithm in Communication Countermeasures[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [16] LEHTOMÄKI J J, VUOHTONIEMI R, UMEBAYASHI K, et al. Energy Detection Based Estimation of Channel Occupancy Rate with Adaptive Noise Estimation[J]. IEICE Transactions on Communications, 2012, 95(4):1076-1084.
- [17] HUO S, NIE J, WANG F. Block-Flow Noise Power Estimation Algorithm for Pulsed Interference Detection of GNSS receivers[J]. Electronics Letters, 2015, 51(19):1522-1524.
- [18] SIDNEYBURRUS, RAMESH A, GOPINATH, HAIT G, et al. Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
- [19] 谢铁城, 达新宇, 褚振勇, 等. 变换域通信系统基函数的最佳门限设计[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(10):2204-2207.
XIE T C, DA X Y, CHU Z Y, et al. Optimum threshold Design of Basis Functions for Transform Domain Communication System[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(10):2204-2207. (in Chinese)
- [20] 王杰, 毛玉泉, 张衡阳, 等. 基于 Otsu 准则的 TDCS 自适应判决门限算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2013, 14(4):71-75.
WANG J, MAO Y Q, ZHANG H Y, et al. TDCS Adaptive Threshold Selection Algorithm Based on Otsu Guidelines[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2013, 14(4):71-75. (in Chinese)
- [21] 王传丹, 张忠培, 李少谦. 变换域通信系统中干扰信号的逐次消除[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(10):2439-2441.
WANG C D, ZHANG Z P, LI S Q. Interferences Mitigation One by One in Transform Domain Communication System[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(10):2439-2441. (in Chinese)