

基于噪声估计的 FRFT-TDCS 门限设计方法*

孙 乐, 张衡阳, 魏 军, 刘 立

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 针对 FRFT-TDCS 采用传统门限设置方法时难以有效剔除多分量 LFM 干扰的问题, 提出了基于噪声估计的 FRFT-TDCS 门限设计方法。该方法在分析 FRFT 域内 LFM 干扰信号和噪声频谱分布特征的基础上, 通过干扰信号在 FRFT 域内能量聚焦的位置和展宽, 计算得到“干净”频谱的子载波集合, 并根据高斯白噪声幅度的统计特性以及系统性能要求自适应确定门限值。仿真结果表明, 对于单分量 LFM 干扰信号, 采用该方法在 $\lambda > 2.6$ 时, 均可以剔除干扰信号频谱; 对于多分量 LFM 干扰信号, 采用该方法在 $3 > \lambda > 2.2$ 时, 能够最大限度地剔除干扰信号频谱, 保留“干净”频谱。相比传统的硬门限设置方法, 该方法在多分量 LFM 干扰信号条件下的剔除效果具有明显优势, 可以达到更好的系统误比特率性能。

关键词 FRFT; TDCS; LFM 干扰; 门限

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.02.014

中图分类号 TN92 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)02-0083-06

A Threshold Design Method Based on Noise Estimation for FRFT-TDCS

SUN Le, ZHANG Hengyang, WEI Jun, LIU Li

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

Abstract: Aimed at the problem that it is difficult for FRFT-TDCS to get rid of multi-component LFM interference signals by the traditional TDCS threshold design methods, this paper proposes a threshold design method based on noise estimation for FRFT-TDCS. On the basis of analyzing the FRFT domain spectrum distribution characteristics of LFM interference signals and noise, the paper obtains a set of unoccupied spectrum subcarrier through the FRFT domain energy broadening and position of interference signals, and determines the system adaptable threshold according to the amplitude statistical properties of Gaussian white noise and the requirements of system performance. The simulation results show that the proposed method can eliminate the single component LFM interference signal spectrum while $\lambda > 2.6$, can eliminate the multi-component LFM interference signal spectrum, and can retain “clean” spectrum while $3 > \lambda > 2.2$. Compared with the traditional hard threshold setting method, the proposed method can achieve a better effect of interference eliminating and performance of BER under condition of multi-component LFM interference signals.

Key words: FRFT; TDCS; LFM interference; threshold

变换域通信系统(Transform Domain Communication System, TDCS)以其独特的抗干扰思想和

低截获(LPI)、低检测(LPD)性能引起了通信领域内的广泛关注^[1-8]。传统基于傅里叶变换的 TDCS

收稿日期: 2016-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(61202490); 航空科学基金(20150896010)

作者简介: 孙 乐(1991—), 男, 陕西澄城人, 硕士生, 主要从事变换域通信系统研究. E-mail: sunle202@163.com

引用格式: 孙乐, 张衡阳, 魏军, 等. 基于噪声估计的 FRFT-TDCS 门限设计方法*[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(2): 83-88. SUN Le, ZHANG Hengyang, WEI Jun, et al. A Threshold Design Method Based on Noise Estimation for FRFT-TDCS[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2017, 18(2): 83-88.

可以有效剔除平稳干扰信号,却难以对非平稳的 LFM 干扰进行处理。FRFT 由于其对 LFM 干扰良好的能量聚焦特性,逐渐被引入 TDCS,文献[9~12]对 FRFT-TDCS 进行了相关研究。

在幅度谱生成环节,FRFT-TDCS 是通过预设门限对干扰频谱进行剔除。目前,尚没有相关文献对 FRFT-TDCS 的门限设置进行研究,而是依然采用传统的 TDCS 门限设置方法^[13-17]。文献[13]以干扰信号最大频谱幅度的 40% 作为门限值对干扰频谱进行剔除,该方法门限设置简单,复杂度小,但其门限值固定不变,干扰剔除的效果较差。文献[14]提出了双门限的幅度谱生成方法,通过漏检概率和虚警概率推导得出双门限值,将双门限之间的频谱标记为 0.5,提高了系统吞吐量,但是该方法将双门限之间可能为干扰的频谱依然采用低功率接入,导致系统误码率增加;文献[15]通过推导系统误码率和门限值之间的关系,提出了一种以系统误码率最佳为标准的门限设置方法,该方法所设置的最佳门限是在干扰频谱确定的情况下通过一维搜索得出,但大多数情况下,我们并不知道某一频谱载波是否被干扰,这使得该方法的适用性受到了较大限制。上述方法均是在干扰频谱确定的基础上进行门限设置,而在 FRFT-TDCS 中,多分量 LFM 干扰信号在不同变换阶次下的干扰频谱幅度和位置均不同,采用传统 TDCS 门限设置方法很难得到有效剔除干扰频谱的门限值。

本文针对传统 TDCS 中门限设置对于 FRFT-TDCS 应对多分量 LFM 干扰时的缺陷,提出了基于噪声估计的 FRFT-TDCS 的门限设计方法。该方法通过 LFM 干扰信号在 FRFT 域的频谱分布特征,计算系统“干净”频谱的子载波集合并得到其统计特性,最终取 $\mu_\varphi + \lambda\sigma_\varphi$ 作为系统门限值。在不同变换阶次下该方法的门限设置均可以有效剔除多分量 LFM 干扰,具有良好的误比特率性能。

1 FRFT-TDCS 简介

FRFT-TDCS 是一个宽带通信系统,工作原理见图 1。

其工作思想可以概括为:在 FRFT 域剔除干扰频谱,利用“干净”频谱生成具有类噪声性能的基函数,并用其对信息位进行调制,以达到抗干扰、LPI、LPD 的目的。

记频谱子载波个数为 N ,并利用预设门限对载波进行干扰检测,将高于门限值的子载波设置为 0,低于门限值的子载波设置为 1,即:

$$\mathbf{A}_k = \begin{cases} 1, & X(k) < T \\ 0, & X(k) > T \end{cases} \quad (1)$$

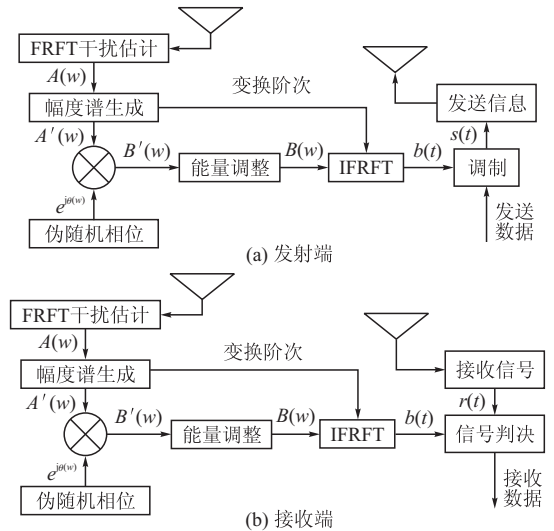


图 1 FRFT-TDCS 工作原理框图

Fig. 1 The principle diagram of FRFT-TDCS

FRFT-TDCS 时域基函数离散形式可表示为:

$$b(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} \mathbf{C} \mathbf{A}_k e^{j\theta_k} e^{j\pi\varphi_p} \quad (2)$$

式中: $C = \sqrt{N/N_A}$ 为能量调整因子; \mathbf{A}_k 为幅度谱向量; $e^{j\theta_k}$ 为伪随机相位; $e^{j\pi\varphi_p}$ 为 FRFT 变换核; $\varphi_p = \left(\frac{n}{2\Delta x}\right)^2 \cot\alpha - 2uc\text{sca}\left(\frac{n}{2\Delta x}\right) + u^2 \cot\alpha$, $\alpha = p\pi/2$ 。

2 信道特性分析

FRFT-TDCS 中,干扰信号和噪声是信道中影响系统性能的 2 个重要因素,本节将对干扰信号和噪声在 FRFT 域的频谱分布进行分析。

LFM 干扰是一种典型的非平稳干扰信号,其瞬时频率随时间呈线性变化,可表示为:

$$j(n) = ae^{j\pi k(n)^2 + j\pi f_0 n} \quad (3)$$

式中: k , f_0 , a 分别代表 LFM 干扰信号的调频率、初始频率和幅度;采样点数为 N 。其时频分布见图 2。

图 2 中粗实线代表 LFM 干扰信号的瞬时频率,设 LFM 信号采样时长为 T ,信号时频线与 t 轴的夹角为 β ,则 LFM 信号的时频线长度 ρ 可表示为:

$$\rho = T / |\cos\beta| \quad (4)$$

由 FRFT 的定义,不同变换阶次的 FRFT 可以理解坐标轴旋转不同的角度。当 FRFT 域旋转角度为 α ($\alpha = \pi p/2$) 时,LFM 信号时频线与 FRFT 域 u 轴的夹角为 $\theta = \beta - \alpha$,此时 LFM 干扰信号的 FRFT 域能量展宽和其中心位置分别表示为^[18]:

$$\rho_\alpha = \left| \frac{T \cos\theta}{\cos\beta} \right| \quad (5)$$

$$u_0 = f_0 \sin(\alpha) \quad (6)$$

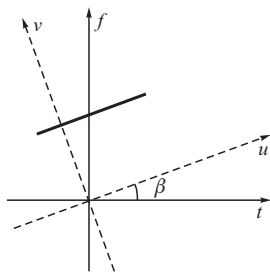


图 2 LFM 干扰信号时频分布图

Fig. 2 The time-frequency distribution of LFM interference signals

设 LFM 干扰信号调频率为 8 Hz/s, 初始频率为 5 Hz, 干扰信号和噪声的干噪比分别为 3 dB, 5 dB, 10 dB. LFM 干扰信号在 FRFT 域内不同变换阶次下的峰值见图 3, 不同变换阶次下噪声的幅度均值和方差见图 4.

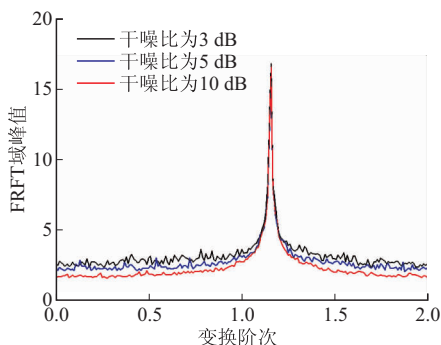
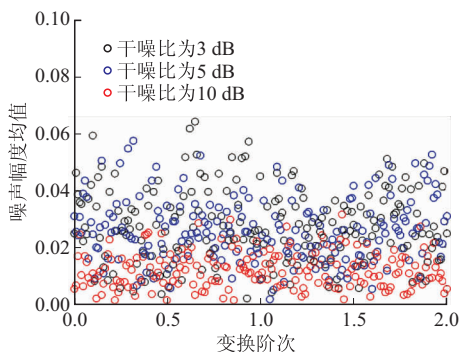
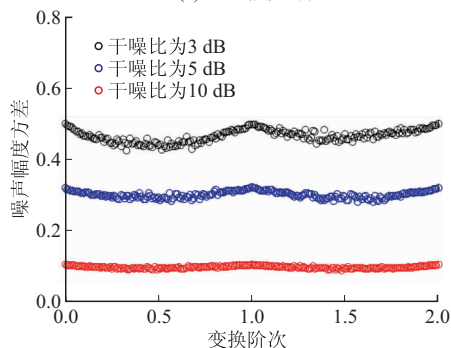


图 3 不同变换阶次下 LFM 干扰信号的 FRFT 域峰值
Fig. 3 The FRFT domain peak of LFM interference signals with different transform orders



(a) 噪声幅度均值



(b) 噪声幅度方差

图 4 不同变换阶次下噪声的幅度均值和方差

Fig. 4 The amplitude mean and variance of noise with different transform orders

由图 3, 图 4 可以看出, 在不同变换阶次下, LFM 干扰信号的 FRFT 域峰值呈现出明显变化, 在最优阶次时, 其值取得最大值, 远离最优阶次时, FRFT 域峰值呈下降趋势, 且趋于平稳。高斯白噪声的幅度均值和方差在不同变换阶次下均呈现平稳变化, 因此可以认为 FRFT 域内, 高斯白噪声的幅度不会随着变换阶次的变化而变化。随着噪声强度的增加, 高斯白噪声的幅度均值和方差均有小幅上升, 但在同一干噪比下, 噪声的 FRFT 域幅值明显低于干扰信号 FRFT 域幅值的最小值。

3 最优门限设计

由第 2 节分析可知, 传统 TDCS 通过干扰幅度设计门限的方法难以满足 FRFT-TDCS 准确剔除多分量 LFM 干扰的要求。而对于未受干扰的“干净”频谱, 高斯白噪声的频谱幅度不会随着变换阶次的变化而变化, 可以作为分离干扰频谱和“干净”频谱的有效参考, 本节提出了一种以噪声频谱幅度为参考的门限设置方法。

其门限设置流程如下:

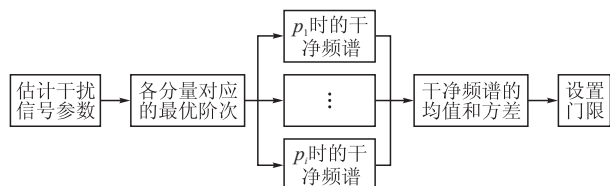


图 5 门限设置流程图

Fig. 5 The flow chart of threshold setting

采用文献[19]中的方法对电磁环境中的多分量 LFM 干扰信号参数进行估计, $j_1(n), j_2(n), \dots, j_i(n)$ 分别表示不同分量的 LFM 干扰信号, k_i, f_i 分别表示第 i 分量 LFM 干扰信号的调频率和初始频率。第 i 分量 LFM 干扰信号的最优阶次可计算为:

$$p_i = \frac{2}{\pi} \operatorname{arccot}(-k_i) \quad (7)$$

第 i 分量 LFM 干扰信号时频线与 FRFT 域 u 轴的夹角为:

$$\beta_i = \arctan(k_i) \quad (8)$$

变换阶次为 p_i 时, 第 j 分量 LFM 干扰信号的 FRFT 域能量展宽可表示为:

$$\rho_{j, p_i} = \left| \frac{T \cos(\beta_j - \pi p_i / 2)}{\cos \beta_j} \right| \quad (9)$$

能量展宽中心位置为:

$$u_{j, p_i} = f_j \sin(p_i \pi / 2) \quad (10)$$

通过采样频率 f_s 和采样点数 N , 可以确定变

换阶次为 p_i 时频谱中第 j 分量 LFM 干扰信号所干扰的子载波, 统称为 φ_{j,p_i} , 干扰的子载波个数为:

$$N_{j,p_i} = \frac{\rho_{j,p_i} N}{f_s} \quad (11)$$

记变换阶次为 p_i 时的“干净”频谱载波集合为 φ_{p_i} , 则其可以表示为系统中所有载波集合减去各个干扰分量所干扰的频谱载波集合, 即:

$$\varphi_{p_i} \in \Phi - \bigcup_j \varphi_{j,p_i} \quad (12)$$

式中: Φ 为系统中所有载波的集合; $\bigcup_j \varphi_{j,p_i}$ 表示所有干扰分量所干扰频谱载波的并集, “干净”频谱载波集合中元素的数量记为 K_{p_i} 。

按照同样的方法, 可以计算出每一干扰分量最优阶次下的“干净”频谱载波集合 φ_{p_j} 。“干净”频谱载波中, 不存在干扰信号, 仅受噪声的影响, 其幅度均值和方差可计算为:

$$\mu_\varphi = \frac{1}{\sum_i K_{p_i}} \sum_i \sum_{k=1}^{K_{p_i}} X(k, p_i) \quad (13)$$

$$\sigma_\varphi^2 = \frac{1}{\sum_i K_{p_i}} \sum_i \sum_{k=1}^{K_{p_i}} [X(k, p_i) - \mu_\varphi]^2 \quad (14)$$

可以理解为: “干净”频谱服从均值为 μ_φ , 方差为 σ_φ^2 的高斯分布。根据高斯分布的性质, 设置门限值为 $T = \mu_\varphi + \lambda \sigma_\varphi$ 。此时, 噪声幅值的概率分布与 λ 相关, 当 $\lambda = 1$ 时, 该幅值小于 T 的概率为 68.27%, 随着 λ 的增大, 该幅值小于 T 的概率不断增加, 当 $\lambda = 2.58$ 时, 该幅值小于 T 的概率达到 99.73%。在实际情况下, 系统可以根据干扰剔除的程度选择适当的 λ 。

4 性能仿真分析

4.1 门限设置分析

仿真参数设置: LFM 干扰信号的时间取值为 $[-2, 2]$, 采样频率 f_s 为 128 Hz, 采样点数为 512, FRFT 域坐标轴量纲归一化后 Δx 为 4 (与信号时长相同), 干噪比为 3 dB。

干扰信号为单分量 LFM 干扰时, 调频率 k 和初始频率 f_0 分别设置为 8 Hz/s, 5 Hz, 初始相位为 0 rad, 则 2 种门限设置方法对比见图 6。

图中硬门限是根据峰值 40% 所设置。可以看出, 对于单分量 LFM 干扰信号, 在最优阶次下干扰信号能量完全聚焦, 2 种门限设置方法均可以有效剔除干扰频谱。另外, 文中方法当 λ 取 2.2 时, 少量噪声频谱幅值高于门限, 将会被当作干扰频谱剔除。随着 λ 的增大, “干净”频谱被误剔除的概率不断减

小, 当 $\lambda > 2.6$ 时, 门限 T 均可以最大限度地剔除干扰频谱, 保留“干净”频谱。

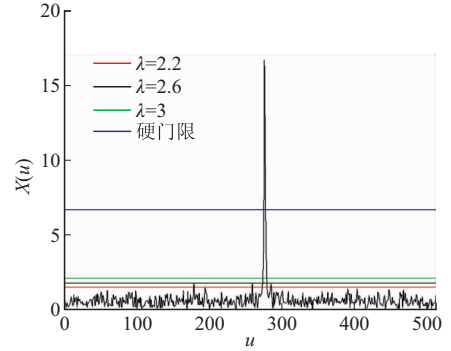
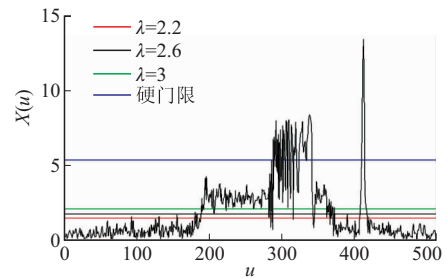
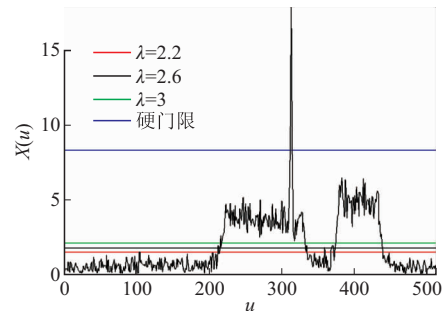


图 6 单分量 LFM 干扰信号门限设置对比
Fig. 6 The contrast of threshold setting of single component LFM interference signals

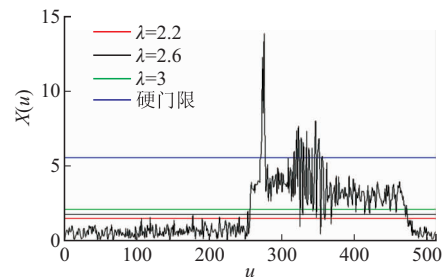
干扰信号为三分量 LFM 干扰时, 调频率 k 分别为 8 Hz/s, 12 Hz/s, 20 Hz/s, 初始频率 f_0 分别为 40 Hz, 15 Hz, 5 Hz, 初始相位均为 0 rad, 各分量对应的最优阶次可估计为 1.16, 1.23, 1.35, 则各分量最优阶次下的门限设置对比见图 7。



(a) 变换阶次为 1.6



(b) 变换阶次为 1.23



(c) 变换阶次为 1.35

图 7 三分量 LFM 干扰信号门限设置对比
Fig. 7 The contrast of threshold setting of 3-LFM interference signals

对于多分量 LFM 干扰信号,不同变换阶次下的频谱分布不同。采用传统 TDCS 中 40% 的硬门限方法时,大部分干扰信号频谱低于门限值,难以有效剔除干扰信号,造成漏检。而文中方法是根据噪声的统计特性设置门限,其门限值与干扰信号频谱分布无关,在不同变换阶次下均可以有效剔除干扰频谱。

另外,在上述仿真参数下, $\lambda \leq 2.2$,干扰频谱会得到有效剔除,但“干净”频谱被误剔除的概率会不断增加,这将导致基函数的频谱带宽不断减小,类噪声性能有所降低; $\lambda \geq 3$ 时,“干净”频谱会被完全保留,基函数频谱带宽和类噪声性能会不断增加,但是干扰频谱漏检的概率也在不断增加,这将导致系统误码率性能不断恶化。在实际应用中,我们可以根据干扰信号的强度,系统误码率、低检测性能的要求选择合适的 λ 。

4.2 误比特率性能分析

无干扰条件下,采用 CSK 调制时系统误比特率仅受噪声的影响,可表示为^[14]:

$$P_b = \frac{M}{2} Q \left(\sqrt{\frac{E_b \log_2^M}{N_0}} \right) \quad (15)$$

干扰条件下,若门限剔除后漏检的干扰频谱子载波个数为 L ,各子载波干扰功率为 $\sigma_{i,i}^2$, N_0 为噪声功率谱密度,则系统误比特率可表示为^[9]:

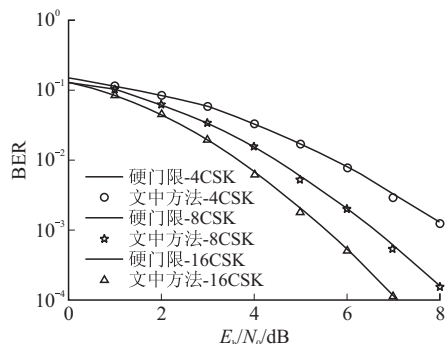
$$P_b = \frac{M}{2} Q \left[\sqrt{\frac{E_b \log_2^M}{N_0 + \sum_{i=1}^L \sigma_{i,i}^2}} \right] \quad (16)$$

可以看出,对于确定的调制方式和噪声功率, M 和 N_0 是恒定值,系统误比特率仅与漏检的干扰信号频谱子载波数量和功率有关, $\sum_{i=1}^L \sigma_{i,i}^2$ 越大,

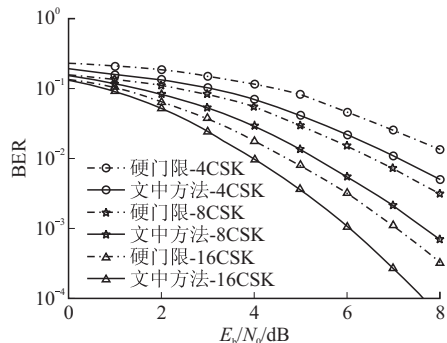
$\sqrt{\frac{E_b \log_2^M}{N_0 + \sum_{i=1}^L \sigma_{i,i}^2}}$ 越小,系统的误比特率就越大。

由图 8 可以看出,在 4.1 节仿真参数下,文中方法在 $\lambda = 2.6$ 时可以最大限度地剔除干扰频谱,保留“干净”频谱。 λ 取 2.6,采用 CSK 对基函数进行调制^[20],在各个分量最优阶次中,取可用频谱最多的变换阶次作为系统变换阶次,对文中方法在不同分量 LFM 干扰下的系统误比特率进行仿真,其系统误比特率对比见图 8。

可以看出,对于单分量 LFM 干扰信号,文中方法和传统硬门限方法在剔除干扰时的漏检概率相当,具有类似的误比特率性能。而对于三分量 LFM 干扰信号,文中方法具有更小的漏检概率,其误比特率性能明显优于传统硬门限方法。



(a) 单分量 LFM 干扰信号



(b) 三分量 LFM 干扰信号

图 8 系统误比特率性能对比

Fig. 8 The contrast of bit error rate

5 结语

文章提出了一种基于噪声估计的 FRFT-TDCS 门限设计方法,并指出了传统的 TDCS 门限设置方法在 FRFT-TDCS 应对多分量 LFM 干扰信号时的缺陷,详细介绍了基于噪声估计的 FRFT-TDCS 门限设计流程,对传统硬门限设置方法和文中方法的干扰剔除效果和误比特率进行了仿真对比。仿真结果表明:文中方法的门限设置是根据噪声的统计特性计算得出,与干扰信号的频谱分布无关。对于单分量 LFM 干扰信号, $\lambda \geq 2.6$ 时,文中方法和传统硬门限方法具有相似的干扰剔除效果和误比特率性能;而对于多分量 LFM 干扰信号,不同的 λ 使得干扰剔除的效果不同; $\lambda = 2.6$ 时,可以最大限度地剔除干扰频谱,保留“干净”频谱,相比传统硬门限设置方法,在漏检概率和误比特率性能方面具有明显优势。

参考文献 (References):

- [1] HU S, BI G A, GUAN Y L. TDCS-Based Cognitive Radio Networks with Multiuser Interference Avoidance [J]. Transactions on Communications, 2013, 61(12): 4828-4835.
- [2] WANG S, DA X Y, CHU Z Y, et al. Magnitude Weighting Selection: a Method for Peak-to-Average Power Ratio Reduction in transform Domain Commu-

- nication System [J]. IET Communications, 2015, 9(15): 1894-1901.
- [3] FUMAT G, CHARGE P ZOUBIR A, et al. Transform Domain Communication Systems from a Multidimensional Perspective, Impacts on Bit Error Rate and Spectrum Efficiency [J]. IET Communications, 2011, 5(4): 476-483.
- [4] 谢铁城, 达新宇, 褚振勇, 等. 基于神经网络的变换域通信系统接收技术[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014(2): 96-100.
XIE T C, DA X Y, CHU Z Y, et al. Neural Network Based Receiving Technology in Transform Domain Communication System [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2014(2): 96-100. (in Chinese)
- [5] HU S, WU G, XIAO Y, et al. Design of Low PAPR Fundamental Modulation Waveform for Transform Domain Communication System [J]. Wireless Personal Communications, 2013, 71(3): 2215-2229.
- [6] HU S, GUAN Y L, BI G A. Cluster-Based Transform Domain Communication Systems for High Spectrum Efficiency [J]. IET Communications, 2012, 6(16): 2734-2739.
- [7] HU S, BI G A, G Y L, et al. Spectrum Efficiency Transform Domain Communication Systems with Quadrature Cyclic Code Shift Keying [J]. IET Communications, 2013, 7(4): 382-390.
- [8] CHUAN H, JUN W, YANG Y L, et al. Addressing the Control Channel Design Problem: OFDM Based Transform Domain Communication System in Cognitive Radio [J]. Elsevier Computer Networks Journal, 2008, 52(4): 795-815.
- [9] WANG C D, ZHANG Z P, LI S Q. Interference Mitigating Based on Fractional Fourier Transform Domain Communication System [J]. Journal of Electronics (China), 2007, 24(2): 181-186.
- [10] SHI J, CHI Y G, SHA X J, et al. Fractional Fourier Domain Communication System (FrFDCS): Analytic, Modeling and Simulation Results [J]. Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering, 2009: 423-426.
- [11] SUN H X, LUO S, SHI Y W. Broadband Interference Suppression in Fractional Fourier Domain Communication System [C]// The 8th International Conference on Information, Communications, and Signal Processing, ICICS 2011. Singapore, 2011: 1-5.
- [12] YANG Z Y, TAO R, WANG Y, et al. A Novel Multi-Carrier Order Division Multi-Access Communication System Based on TDCS with Fractional Fourier Transform Scheme [J]. Wireless Personal Communications, 2014, 79(2): 1301-1320.
- [13] 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 Z Q. Designing, Modeling and Simulation research of Transform Domain Communication System [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003. (in Chinese)
- [14] 刘鑫, 贾敏, 李秀华, 等. 双门限频谱估计的变换域通信系统[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(7): 103-107.
LIU X, JIA M, LI X H, et al. Transform Domain Communication System Based on Double-Threshold Spectrum Estimation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(7): 103-107. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 张春海, 薛丽君, 张尔扬. 基于自适应多门限算法的变换域窄带干扰抑制[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(3): 461-464.
ZHANG C H, XUN L J, ZHANG E Y. Narrow-Band Interference Suppression in Transform Domain Based on Adaptive Multi-Threshold Algorithm [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(3): 461-464. (in Chinese)
- [17] 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]. Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2013, 14(4): 71-75. (in Chinese)
- [18] 徐会法, 刘峰. 线性调频信号分数阶频谱特征分析[J]. 信号处理, 2010, 26(12): 1896-1901.
XU H F, LIU F. Spectrum Characteristic Analysis of Linear Frequency-Modulated Signal in the Fractional Fourier Domain [J]. Signal Processing, 2010, 26(12): 1896-1901. (in Chinese)
- [19] QI L, TAO R, ZHOU S, et al. Detection and Parameter Estimation of Multicomponent LFM Signal Based on Fractional Fourier Transform [J]. Science China Information Sciences, 2004, 47(2): 184-198.
- [20] SUN H X, BI G A, GUAN Y L, et al. Performance Analysis of M-ary CSK Based Transform Domain Communication System [C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Circuits, Systems, Control, Signals, CSCS' 11. Prague, Czech Republic, 2011: 99-104.

(编辑:徐楠楠)