

引用格式:白杰,王国宏,杨林.基于FRFT域峰值特性的压制干扰检测算法[J].电光与控制,2018,25(6):16-19. BAI J, WANG G H, YANG L. Detection algorithm of suppression interference based on peak characteristic of FRFT domain[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(6):16-19.

基于FRFT域峰值特性的压制干扰检测算法

白杰, 王国宏, 杨林
(海军航空大学, 山东烟台 264001)

摘要: 针对压制干扰的存在性检测问题,提出了一种适用于脉压雷达的基于FRFT域峰值特性的压制干扰检测算法。首先,从完整的雷达抗干扰系统角度考虑,提出了将压制干扰存在性检测与目标检测、干扰分类相结合的总体思路;其次,在充分分析FRFT域LFM信号和压制干扰信号峰值特性差异的基础上,选取回波信号在FRFT域的峰值阶次作为检测算法特征参数;然后,采用序贯判决算法对多段回波信号在FRFT域的峰值阶次进行判别,从而完成压制干扰的存在性检测。最后,通过仿真实验验证了算法的有效性。

关键词: 有源压制干扰; 分数阶傅里叶变换; 峰值特性; 存在性检测

中图分类号: V271.4; TN954+.1 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.06.004

Detection Algorithm of Suppression Interference Based on Peak Characteristic of FRFT Domain

BAI Jie, WANG Guo-hong, YANG Lin
(Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the existence detection problem of suppression interference, a suppression interference detection algorithm based on Fractional Fourier Transform (FRFT) domain peak characteristic is proposed for pulse-compression radar. First, from the perspective of complete radar anti-jamming system, the general idea of combining the existence detection of suppression interference with target detection and interference classification is put forward. Secondly, based on the analysis of the difference between the peak characteristics of the FRFT domain LFM signals and the suppression interference signals, the peak order of the echo signal in the FRFT domain is selected as the characteristic parameter. Then, the sequential decision algorithm is used to determine the peak order of the multi-stage echo signal in the FRFT domain, thus to complete the existence detection of suppression interference. Finally, the effectiveness of the proposed algorithm is verified by simulation experiments.

Key words: active suppression interference; fractional Fourier transform; peak characteristic; existence detection

0 引言

现代雷达所面临的电磁环境日益恶劣,针对雷达的电磁干扰技术迅速发展,特别是有源压制干扰的大量使用,极大制约了雷达作战效能的发挥^[1]。面对有源压制干扰,在复杂电磁环境下对压制干扰进行快速的存在性检测,成为抗干扰工作的必要前提。所以对

有源压制干扰检测技术的研究对雷达的实战和发展具有实际性的推动作用。

目前,国内外学者在雷达压制干扰存在性检测方面做了大量研究。文献[2]根据不同压制干扰信号在FRFT域的分形特性差异,通过门限判决的方法完成不同压制干扰类型的检测;文献[3]通过能量检测法、极化识别法和功率谱相关性理论对压制干扰信号进行检测;文献[4]从接收机结构出发,提出了通过提取噪声功率进行压制干扰检测的方法。上述文献通过提取不同参数较好地完成了压制干扰的存在性检测,但是,所提算法没有较好地将压制干扰的存在性检测与完整的雷达抗干扰系统相结合,导致干扰检测算法与抗干扰

收稿日期:2017-06-28

修回日期:2017-08-11

基金项目:国家自然科学基金(61372027, 61671462, 61501489);泰山学者攀登计划

作者简介:白杰(1993—),男,河北衡水人,硕士,研究方向为雷达抗干扰。

系统之间相互独立。

针对这个问题,在充分分析 LFM 信号以及压制干扰信号在 FRFT 域特征的基础上,提出了一种基于 FRFT 域峰值特性的压制干扰检测算法。

1 模型建立与分析

1.1 雷达回波信号模型建立

线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号作为一种重要的信号体制,具有较大的时宽带宽积,能够同时满足作用距离和距离分辨率的要求,从而被广泛应用于现代雷达系统,因此,选取线性调频信号作为雷达的信号形式进行研究。

假设在一段观测时间内目标的运动速度不变,则有源压制干扰环境下的回波信号表示为

$$x(t) = s_r(t) + J(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: $s_r(t) = s(t - \tau)e^{j\omega_d(t - \tau)}$ 表示目标回波信号, τ 表示回波时延, ω_d 表示多普勒角频率; $n(t)$ 表示背景噪声; $J(t)$ 表示射频噪声干扰、噪声调幅干扰和噪声调频干扰3种有源压制干扰中的一种。假设 $n(t)$ 服从高斯分布,且与 $J(t)$ 相互独立,雷达发射的 LFM 信号表示为

$$s(t) = \exp[-j(2\pi f_0 t + (kt^2/2))] \quad (2)$$

式中: f_0 表示线性调频信号的载频; k 表示调制斜率。

1.2 模型分析

由式(1)可以看出,当回波信号 $x(t)$ 中的压制干扰信号 $J(t)$ 较强时,回波信号的干扰特性较明显,此时根据不同干扰信号的特征差异进行分类识别^[5-6]的正确率较高,进而根据分类识别结果对压制干扰进行针对性抑制;而在干扰机功率不足、干扰方向未对准以及干扰距离较远的情况下,回波信号中的目标回波信号 $s_r(t)$ 较强,此时能够根据 LFM 信号的特征直接进行目标检测^[7-8],而不需要对压制干扰信号进行了解。但是,在实际战场环境下,雷达方对回波信号的信干比是未知的,因此需要通过压制干扰的存在性检测算法对回波信号信干比高低进行判断,以决定对回波信号进行目标检测还是进行压制干扰分类。所以本文对压制干扰检测参数的提取以现有目标检测算法和压制干扰分类识别算法为参考。

2 基于 FRFT 域特征的压制干扰检测算法

参考目前基于 FRFT 域的目标检测算法^[9-10]和干扰分类算法^[11],拟利用 LFM 信号与压制干扰信号在 FRFT 域的特征差异提取峰值阶次作为特征参数进行干扰检测。

2.1 信号 FRFT 域峰值特性分析

2.1.1 LFM 信号 FRFT 域的峰值特性分析
时域函数 $x(t)$ 的 p 阶 FRFT 变换^[12]表示为

$$X_p(u) = F^p[x(t)](u) = \int_{-\infty}^{\infty} K_p(u, t) x(t) dt \quad (3)$$

式中, $K_p(u, t)$ 为 FRFT 核函数,算式为

$$K_p(u, t) = \begin{cases} A_\alpha \exp[j\pi(u^2 \cot \alpha - 2ut \csc \alpha + t^2 \cot \alpha)] & \alpha \neq n\pi \\ \delta(t - u) & \alpha = 2n\pi \\ \delta(t + u) & \alpha = (2n \pm 1)\pi \end{cases} \quad (4)$$

其中, $A_\alpha = \sqrt{1 - j \cot \alpha}$, $\alpha = p\pi/2$, $p \in (-2, 2]$ 。

当变换角度 α 与 LFM 信号的调频率 k 正交,即 $\alpha = \arctan(-\frac{1}{2\pi k})$ 时,LFM 信号的 FRFT 表示为

$$|F_\alpha[s(t)]| = |A(t)A_\alpha \sigma(2\pi f_0 - u \csc \alpha)| \quad (5)$$

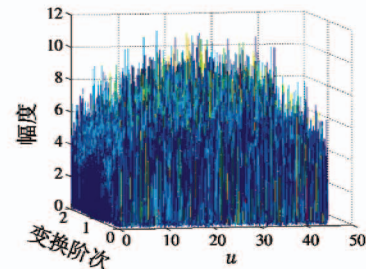
由式(5)可以看出,此时 LFM 信号在 u 域表现为冲激函数,具有明显的能量聚集特性,所以 LFM 信号在 FRFT 域的峰值点即为能量聚集点,峰值点所在变换阶次 p_z 表示为

$$p_z = \arctan\left(-\frac{1}{2\pi k}\right) \times \frac{2}{\pi} \quad (6)$$

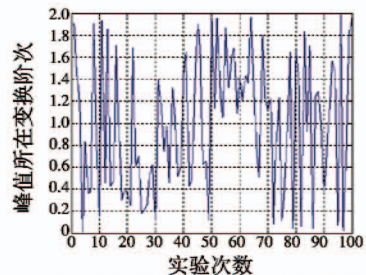
由式(6)可以看出,LFM 信号的调制斜率 k 满足 $k > 0$,所以 p_z 满足 $p_z > 1$ 。

2.1.2 压制干扰信号 FRFT 域的峰值特性分析

通过仿真实验得到不同压制干扰类型在 FRFT 域的峰值特性。图 1 表示射频噪声干扰、噪声调幅干扰和噪声调频干扰在 FRFT 域的谱分布以及峰值点所在变换阶次情况。



a 射频噪声干扰 FRFT 域谱分布



b 射频噪声干扰的峰值变换阶次

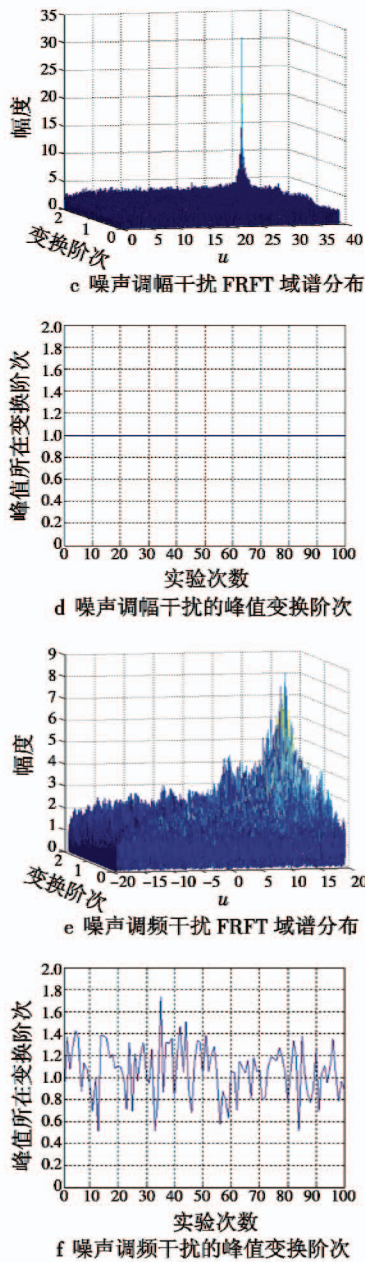


图 1 仿真实验结果
Fig. 1 Simulation result

由图 1a 和图 1b 可以看出,射频噪声干扰在 FRFT 域能量较均匀分布,其在 FRFT 域的峰值随机出现在任意变换阶次;由图 1c 和图 1d 可以看出,噪声调幅干扰在 FRFT 域具有较强的能量聚集特性,其峰值稳定出现在变换阶次 $p = 1$ 的位置;由图 1e 和图 1f 可以看出,噪声调频干扰在 FRFT 域具有局部能量聚集的特性,其峰值出现在一定的变换阶次范围内。

通过以上分析与实验可以看出,LFM 信号与压制干扰信号在 FRFT 域的峰值阶次具有较大差异,所以可以根据回波信号在 FRFT 域的峰值阶次进行压制干扰的存在性检测。

2.2 压制干扰序贯检测算法

根据 LFM 信号与压制干扰信号在 FRFT 域的峰值特性差异,采用序贯判决算法^[13]进行压制干扰的存在性检测:根据式(6)得到 LFM 信号在 FRFT 域的正交阶次 p_z ,取以 p_z 为中心的一小段区间为 $\delta(p_z)$ 。将一定观测时间内的回波信号分成 N 段,通过峰值搜索算法得到其在 FRFT 域的峰值阶次分别为 $p_j (j=1, 2, \dots, N)$,若 p_j 中,取值落在 $\delta(p_z)$ 区间内的个数 D 小于门限值 T ,则判断压制干扰存在,否则判定压制干扰不存在。算法流程如图 2 所示。

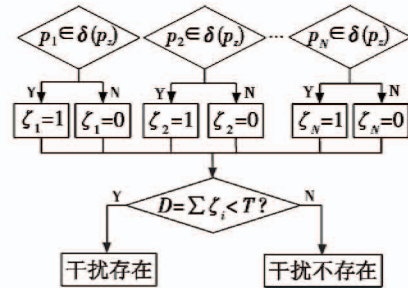


图 2 存在性检测算法

Fig. 2 The existence detection algorithm

3 仿真实验验证

3.1 仿真参数设置

LFM 信号调制斜率 $k = 4 \times 10^{10}$ Hz/s,时宽为 50 μ s,载频为 4 MHz;噪声采用高斯白噪声,方差 $\sigma_n^2 = 1$ 。压制干扰参数设置如表 1 所示。

表 1 干扰信号仿真参数表
Table 1 Interference signal parameters

干扰信号	信号参数				采样频率/ MHz
	中心频率/ MHz	调制 噪声	调制 系数	时间 宽度/ μ s	
射频干扰	4			50	20
调幅干扰	4	白噪声	0.5	50	20
调频干扰	4	白噪声	100	50	20

3.2 仿真验证与分析

3.2.1 射频噪声干扰的检测

图 3 表示射频噪声干扰的检测结果。

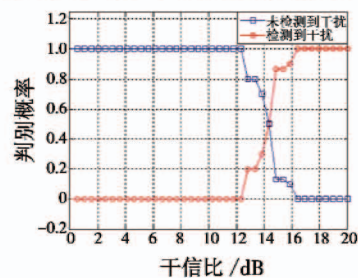


图 3 射频噪声干扰检测结果

Fig. 3 Detection results of radio frequency noise jamming

由图3可以看出,当干信比小于12.3 dB时,未检测到压制干扰的存在,此时LFM信号在FRFT域的能量聚集点即为回波信号的峰值点,可以直接进行目标检测;当干信比大于12.3 dB后,随着干信比的增高,干扰检测概率随之增大,并在干信比大于16.4 dB后达到100%,此时回波信号的压制干扰特征明显,能够保证干扰分类识别具有较高的正确率。

3.2.2 噪声调幅干扰的检测

图4表示噪声调幅干扰的检测结果,可以看出,当干信比小于9.7 dB时,未检测到压制干扰的存在,此时LFM信号在FRFT域的能量聚集点即为回波信号的峰值点,可以直接进行目标检测;当干信比大于9.7 dB后,随着干信比的增高,干扰检测概率随之增大,并在干信比大于10.7 dB后达到100%,此时回波信号的压制干扰特征明显,能够保证干扰分类识别具有较高的正确率。

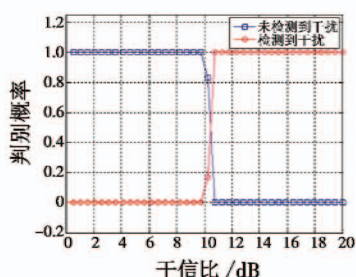


图4 噪声调幅干扰检测结果

Fig.4 Detection results of noise AM jamming

3.2.3 噪声调频干扰的检测

图5表示噪声调频干扰的检测结果,可以看出,当干信比小于9.2 dB时,未检测到压制干扰的存在,此时LFM信号在FRFT域的能量聚集点即为回波信号的峰值点,可以直接进行目标检测;当干信比大于9.2 dB后,随着干信比的增高,干扰检测概率随之增大,并在干信比大于14.8 dB后达到100%,此时回波信号的压制干扰特征明显,能够保证干扰分类识别具有较高的正确率。

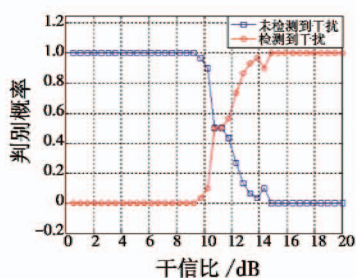


图5 噪声调频干扰检测结果

Fig.5 Detection results of noise FM jamming

4 结束语

从完整的雷达抗干扰系统角度考虑,通过提取回波信号在FRFT域的峰值阶次完成了有源压制干扰的检测,同时将压制干扰的存在性检测算法与现有的目标检测算法和干扰分类算法相结合,从而较好地解决了干扰检测算法与抗干扰系统之间相互独立的问题。

参考文献

- [1] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2012:122-123.
- [2] ZHU H, JIANG G, ZHANG H, et al. Existence detection of blanket jamming based on fractal characteristics in FRFT domain[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(5): 78-84.
- [3] 魏义飞. 对压制性干扰信号的检测与定位[D]. 西安:西安电子科技大学,2010.
- [4] 高腾, 金晓帆, 王李军. 一种基于典型卫星导航接收机基带处理流程的压制干扰检测方法[J]. 通信对抗, 2016(2): 23-26.
- [5] MA J, HUANG G, ZUO W, et al. Robust radar waveform recognition algorithm based on random projections and sparse classification[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2014, 8(4): 290-296.
- [6] TANG Z, ZHANG B, LI G Q. Radar active blanket jamming sorting based on resemblance coefficient cluster [C]//IEEE International Conference on Signal Processing, 2013:1-6.
- [7] JIN Y, DUAN P, JI H. Parameter estimation of LFM signals based on scaled ambiguity function[J]. Circuits Systems & Signal Processing, 2016, 35(12): 1-18.
- [8] DING Y, SUN L, ZHANG H, et al. A multi-component LFM signal parameters estimation method using STFT and Zoom-FRFT[C]//IEEE International Conference on Communication Software and Networks, 2016:112-117.
- [9] LIU D, LIU Y, CAI H, et al. Linear frequency-modulated continuous wave active sonar signal processing [C]//Oceans, IEEE, 2014:1-5.
- [10] 陈小龙, 关键, 刘宁波, 等. 基于FRFT的LFM信号自适应滤波算法及分析[J]. 现代雷达, 2010, 32(12): 48-53.
- [11] 袁兰杰, 王科攀, 高勇. 分数阶傅里叶变换(FRFT)用于调制方式识别[J]. 电子信息对抗技术, 2011, 26(4): 26-29.
- [12] 陶然, 邓兵, 王越, 等. 分数阶傅里叶变换及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2009:11-12.
- [13] YANG Y, WU Y, ZHANG H, et al. Improved sequential extraction method for determination of alkali and alkaline earth metals in Zhundong coals [J]. Fuel, 2016, 181: 951-957.