

文章编号: 1001-2486(2008)05-0090-04

基于分数阶傅立叶变换的 ARM 检测技术*

方前学^{1,3}, 王永良², 王首勇³

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 空军雷达学院 科研部, 湖北 武汉 430019; 3. 空军雷达学院 重点实验室, 湖北 武汉 430019)

摘要: 分数阶傅立叶变换(FRFT)是傅立叶变换的广义形式, 对线性调频(LFM)信号具有很好的能量积累作用。针对反辐射导弹(ARM)雷达回波信号的线性调频特性, 提出了一种基于 FRFT 的反辐射导弹检测方法, 并根据 ARM 信号的调频特性将 FRFT 局域化, 缩小了峰值搜索区域, 提高了检测效率。仿真实验表明该方法能够在高斯、非高斯分布杂波环境下有效地检测 ARM 信号。

关键词: 反辐射导弹(ARM)检测; 线性调频信号; 分数阶傅立叶变换(FRFT)

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** B

ARM Detection Technique Based on Fractional Fourier Transform

FANG Qian-xue^{1,3}, WANG Yong-liang², WANG Shou-yong³

(1. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Division of Scientific Research, Radar Institute, Wuhan 430019, China;

3. Key Laboratory, Radar Institute, Wuhan 430019, China)

Abstract: The fractional Fourier transform (FRFT) is a generalization of the Fourier transform. To the linear frequency modulation (LFM) signal, the FRFT is a good way for signal accumulation. Aiming at the linear frequency modulation characteristic of the anti-radiation missile (ARM) echo signal, an improved method for ARM detection based on FRFT is proposed. The areas of peak search were reduced and the detection efficiency was improved when the FRFT was localized. The simulation experiments show that the reliable detection of ARM signal can be achieved with this method under the Gauss or non-Gauss clutter environment.

Key words: anti-radiation missile (ARM) detection; linear frequency modulation (LFM) signal; fractional Fourier transform (FRFT)

现代战争中反辐射导弹(ARM)的广泛应用对机载预警(AEW)雷达构成了严重威胁, 提高雷达探测能力、延长告警时间是防御 ARM 的关键。一方面, ARM 的雷达截面积小($0.01 \sim 0.1 \text{ s}^2$), 回波功率小^[1](信杂比约 -6dB); 另一方面, 机载雷达平台处于运动状态且下视工作, 杂波分布范围广、变化快, 往往是偏离高斯分布的重拖尾杂波, 目前拟合非高斯杂波的模型很多, 如 Alpha 稳定分布、高斯混合分布等, 其中通过改变参数, 高斯混合分布模型几乎可以拟合任意单钟或者多钟型的非高斯分布杂波, 它在声纳、通讯及雷达信号处理等领域获得了广泛的应用^[2-4]。可见, 对 ARM 检测实质上是非高斯分布杂波背景下的小信号检测, 必须根据目标信号特性, 研究复杂分布杂波下 ARM 的检测方法。

反辐射导弹一般由载机发射, 经短时间(3~5s)加速后高速飞行攻击目标^[4], 在 ARM 加速飞行阶段, 其雷达回波呈现出典型的线性调频特性, 可以用时-频分析的方法检测 ARM。文献[5-8]提出基于短时傅立叶变换(STFT)、Wigner-hough 变换及 Radar-ambiguity 变换(RAT)的 ARM 检测方法, 其中对于有限长样本, STFT 无法有效积累信号能量; 而基于 WVD-Hough 变换或 RAT 的检测方法, 属于双线性变换, 存在多目标时会受到交叉项的影响, 而且要求在时-频二维平面搜索峰值, 运算量大。而分数阶傅立叶变换(FRFT: Fractional Fourier Transform)作为傅立叶变换的广义形式, 既具有傅立叶变换的线性变换

* 收稿日期: 2008-05-08

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 方前学(1978-), 男, 博士生。

特性,可借助 FFT 快速实现,又具有从时-频二维联合分析非平稳信号的特点,通过选择合适的变换阶数,对 LFM 信号具有很好的能量积累作用。本文在高斯混合分布杂波模型假设下,提出基于 FRFT 检测 ARM 的方法,并在雷达参数一定的条件下,根据 ARM 信号可能的调频范围将 FRFT 区域化,进一步缩小了在分数阶域的峰值检测区域和运算量,仿真结果表明基于 FRFT 检测 ARM 的方法能够有效地检测高斯、非高斯杂波中的 ARM 目标信号,且性能优于基于 RAT 检测 ARM 方法的性能。

1 分数阶傅立叶变换及其数值实现

分数阶傅立叶变换最早由 Namias^[9] 提出并应用于量子力学,后由 McBride 和 Kerr^[10] 进行了严格的数学论证,奠定了它作为一种线性变换的理论基础。信号 $x(t)$ 的 p 阶分数傅立叶变换定义为

$$X_p(u) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) K_p(t, u) dt = \begin{cases} \sqrt{\frac{1 - \text{j} \cot \alpha}{2}} e^{\text{j} \frac{t^2}{2} \cot \alpha} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{\text{j} \frac{u^2}{2} \cot \alpha} e^{-\text{j} u t \csc \alpha} dt & \alpha \neq n\pi \\ x(t) & \alpha = 2n\pi \\ x(-t) & \alpha = (2n+1)\pi \end{cases} \quad (1)$$

式中旋转角 $\alpha = p\pi/2$, p 为 FRFT 的阶数,且 $0 < |p| < 2$,从定义可知,当旋转角为 $\pi/2$ 时,FRFT 就是傅立叶变换;当旋转角为 2π 的整数倍时,FRFT 是信号本身;当旋转角不在以上两个位置,即 p 为分数时,FRFT 从时间域和频率域联合描述信号特征。FRFT 在某个分数阶域中对给定的 LFM 信号具有最好的聚集特性。有限长 LFM 信号在时-频面上为斜直线的背鳍形分布,而 FRFT 本质上是对信号的旋转变换,选择合适的旋转角对信号进行 FRFT,可使信号在某个特定的分数阶傅立叶变换域上出现明显的峰值,而杂波分布在整个平面上,不会出现能量聚集,利用此特点可实现 LFM 信号的检测与参数估计。

直接根据式(1)计算 FRFT 相当复杂,为此可以先对信号进行量纲归一化处理,即假定信号的时域表示定义在区间 $[-T/2, T/2]$ 内,频域表示定义在区间 $[-f_s/2, f_s/2]$ 内,定义时宽-带宽积 $N = T \cdot f_s$ 。引入尺度参数 $S = \sqrt{T/f_s}$,由此可得无量纲的尺度化坐标 $u = t/S$ 和 $v = f \cdot S$,此时时域和频域表示将分别定义在区间 $[-T/(2S), T/(2S)]$ 和 $[-S \cdot f_s/2, S \cdot f_s/2]$ 上,且两个区间长度都等于无量纲 $\Delta u = \sqrt{T \cdot f_s}$,即两个区间都为 $[-\Delta u/2, \Delta u/2]$,经过量纲归一化后,信号可以用样本间隔为 $\Delta u^{-1} = 1/\sqrt{N}$ 的 N 个样本表示,此时即将时间量纲 t 和频率量纲 f 转化为同一个无量纲 u 。

经量纲归一化后,令 $0.5 < |p| < 1.5$,得信号的 p 阶 FRFT 的数值计算表达式为^[11]

$$X_p \left(x \left(\frac{m}{2\Delta u} \right) \right) = \frac{A_\alpha}{2\Delta u} \sum_{n=-N}^N \exp \left\{ \text{j} \pi \left[\left(\frac{\gamma m^2}{2\Delta u} \right)^2 - \left(\frac{2\beta m n}{2\Delta u} \right)^2 + \left(\frac{\gamma n^2}{2\Delta u} \right)^2 \right] \right\} x \left(\frac{n}{2\Delta u} \right) \quad (2)$$

式中 $\gamma = \cot \alpha$, $\beta = \csc \alpha$, $A_\alpha = \sqrt{(1 - \text{j} \cot \alpha)/2\pi}$,无量纲 $\Delta u = \sqrt{T \cdot f_s}$, f_s 为采样频率, T 为信号采样时间, m 为离散化的 u 。

基于 FRFT 检测 LFM 信号的思路为:对待检测信号进行 FRFT、取模,在分数阶域 (p, u) 上进行峰值的过门限判决即可实现对目标信号进行检测及参数估计,即

$$\left\{ \hat{p}_0, \hat{u}_0 \right\} = \arg \max_{p, u} |X_p(x)| \quad (3)$$

经过量纲归一化处理后,与 LFM 信号的频率 f_d 、调频率 μ 对应的两个变量的估计值为

$$\hat{f}_{d0} = \hat{u}_0 \csc \left(\pi \hat{p}_0 / 2 \right), \quad \hat{\mu}_0 = -\cot \left(\pi \hat{p}_0 / 2 \right) \quad (4)$$

通过坐标转换,可得信号的初始频率、调频率估计值为

$$\hat{f}_d = \hat{f}_{d0} \sqrt{f_s/T}, \quad \hat{\mu} = \hat{\mu}_0 f_s/T \quad (5)$$

2 基于分数阶傅立叶变换检测 ARM

一般反辐射导弹径向飞行攻击目标,其初速度和加速度反映在雷达回波上为正多普勒频率和调频率,若 ARM 初速度为 v_0 ,加速度为 a ,则雷达回波信号的复包络为

$$x(n) = A \exp \left[\text{j} \left(2\pi f_d n + 2\pi \mu n^2 \right) + \varphi \right] + w(n), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

式中 A 为 ARM 信号幅度, $f_d = 2v_0/\lambda$ 为初始频率, λ 为雷达波长, $\mu = 2a/\lambda$ 为调频率, φ 为初相位. $w(n)$ 为雷达杂波. 在此用二阶零均值高斯混合分布模型拟合具有重拖尾分布的杂波. 服从该模型的杂波样本可看作是以概率 ε 从高斯分布 $N(0, \sigma_1^2)$ 中得到的样本与以概率 $(1-\varepsilon)$ 从高斯分布 $N(0, \sigma_2^2)$ 中得到的样本之和, 其概率密度函数为^[12]

$$p(w(n)/\varepsilon) = \frac{\varepsilon}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{w^2(n)}{2\sigma_1^2}\right] + \frac{(1-\varepsilon)}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left[-\frac{w^2(n)}{2\sigma_2^2}\right] \quad (7)$$

式中 ε 为混合系数, 满足 $0 \leq \varepsilon \leq 1$, 当 $\varepsilon = 1$ 时, 高斯混合分布退化成高斯分布 $N(0, \sigma_1^2)$.

将雷达回波信号量纲归一化处理, 由式(2)得 ARM 信号检测的判决表达式, 即若

$$\eta = \max_{p, u} |X_p(x)|^2 \geq \eta_0 \quad (8)$$

则判存在 ARM 目标. 由式(5)计算信号的初始频率和调频率, 则 ARM 目标的初速度和加速度估计值为

$$\hat{v}_0 = \hat{f}_d/2, \quad \hat{a} = \hat{\lambda}\mu/2 \quad (9)$$

图 1(a) 为 ARM 初速度 $v = 400\text{m/s}$, 加速度 $a = 200\text{m/s}^2$, 脉冲长度 $N = 128$, 信杂比 $SCR = -6\text{dB}$, 高斯混合分布杂波参数为 $[\varepsilon = 0.9, \sigma_1^2 = 1, \sigma_2^2 = 30]$ 时, 回波信号的 FRFT 结果. 图中峰值即为 ARM 目标信号, 要准确地估计 ARM 目标参数, 可以采用分级搜索法, 即以图 1(a) 峰值坐标位置对应的 p 值为中心, 减小 p 的步进间隔, 作进一步的 FRFT 变换, 如图 1(b) 所示, 再通过峰值坐标估计信号参数, 由图(b) 估计得 ARM 目标的初速度 $\hat{v}_0 = 398.4\text{m/s}$, 加速度 $\hat{a} = 196.7\text{m/s}^2$, 估计值与真实值基本相符, 解决了对 ARM 目标的参数估计问题.

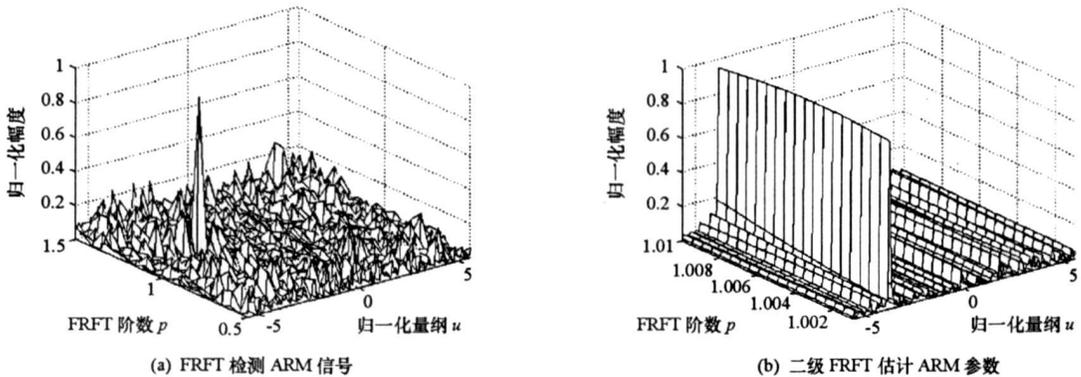


图 1 ARM+ 杂波信号的分数阶傅立叶变换结果

Fig. 1 FRFT of the ARM and clutter signal

为缩小基于 FRFT 检测 ARM 的峰值搜索区域, 降低运算量, 最有效的方法就是根据 ARM 信号可能的调频率范围, 缩小分数傅立叶变换的阶数 p 的取值区间. 若雷达波长 $\lambda = 0.2\text{m}$, 脉冲采样频率 $f_s = 6000\text{Hz}$, 则 FRFT 的阶数 p 与 ARM 加速度 a 的关系为

$$p = \frac{2 \cdot \arctan(4T/f_s)}{\pi} + 1 = \frac{2 \cdot \arctan(2aT/(\lambda f_s))}{\pi} + 1 \quad (10)$$

图 2 为不同 ARM 加速度取值对应的 FRFT 阶数区间变化, 由图可知, 雷达参数一定时, 即使 ARM 目标加速度变化范围很广 ($100 \sim 2000\text{m/s}^2$, 实际中加速度典型值为 200m/s^2), 导致 FRFT 的阶数变化也很小 ($1.0 \sim 1.1$), 所以只要取 $1.0 \leq p \leq 1.1$, 就可以实现对 ARM 信号的积累检测.

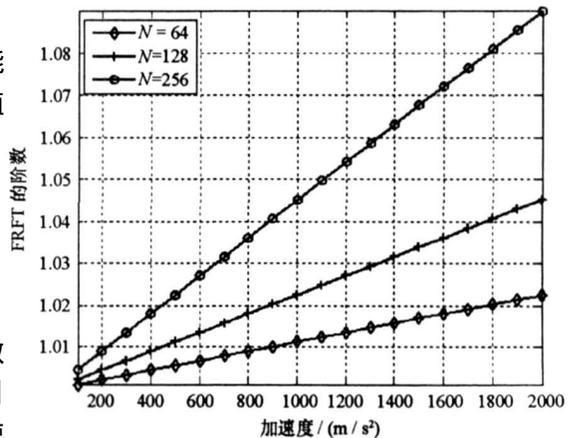


图 2 分数傅立叶变换的阶数与 ARM 加速度的关系

Fig. 2 Relationship between the orders of FRFT and the acceleration of ARM

3 检测性能仿真及分析

基于 FRFT 检测 ARM 信号的统计检测性能可通过蒙特卡罗仿真实验获得。当虚警概率为 $P_f = 10^{-5}$ 时,图 3(a)、图 3(b) 分别针对高斯分布、高斯混合分布模型杂波给出了基于 FRFT 检测 ARM 方法及基于 RAT 检测 ARM 方法的检测性能对比曲线,雷达参数、ARM 参数如上节所述。

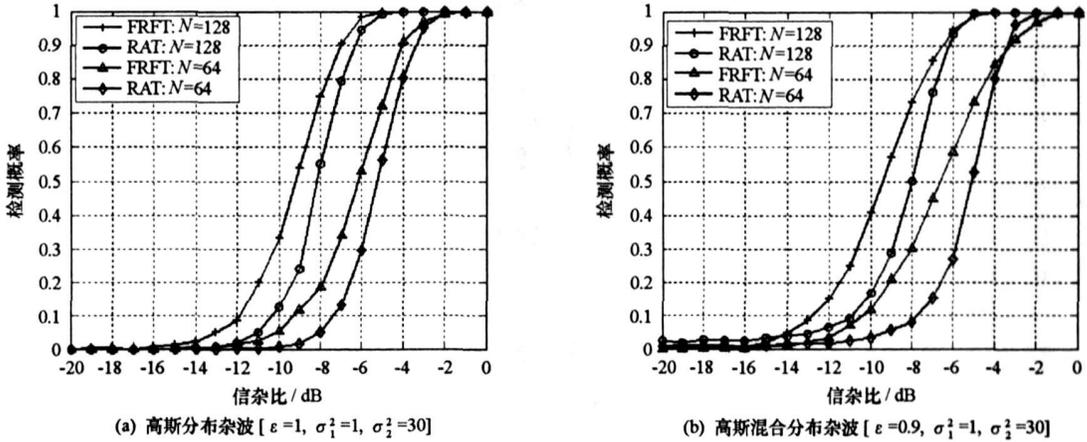


图 3 不同分布杂波下基于 FRFT 与基于 RAT 方法检测 ARM 的性能对比

Fig. 3 Performance contrast between the ways of FRFT and RAT under different clutter

仿真结果表明: (1) 基于 FRFT 检测 ARM 方法的性能优于基于 RAT 检测 ARM 方法的性能,这是因为当信杂比较低,特别是当杂波服从非高斯分布时,RAT 对信号的积累性能受到影响,而 FRFT 仍然可以有效实现目标信号积累;(2) 检测性能随样本数的减少而降低。在 $SCR = -6$ dB 处,当脉冲数 $N = 128$ 时,检测概率达 90% 以上;当 $N = 64$ 时,检测概率约为 60%,表明基于 FRFT 方法能够有效地从高斯、非高斯分布杂波中检测 ARM 信号。

4 结论

根据反辐射导弹雷达回波信号的线性调频特性,提出基于分数阶傅立叶变换检测反辐射导弹的方法。分数阶傅立叶变换是一种广义的傅立叶变换,具有从时-频二维平面联合分析非平稳信号的能力,对 ARM 回波信号有很好的能量聚集作用,能够实现复杂背景中 ARM 信号的有效检测及参数估计。针对 ARM 信号调频率特性,通过缩小变换区域,减少了运算量,为分数阶傅立叶变换应用于实时检测系统提供了一个参考途径。

参考文献:

- [1] 周晓峰,杨建军.反辐射导弹发展的新趋势及其对抗措施分析[J].飞航导弹,2006(4):3-6.
- [2] Atal BS, Hanauer S L. Speech Analysis and Synthesis by Linear Prediction of Speech Waves [J]. J. Acoust. Soc. Amer., 1971, 50(6): 637-655.
- [3] Duda R O, Hart P E. Pattern Classification and Scene Analysis [M]. New York: Wiley, 1973.
- [4] Zhao Y X. Gaussian Mixture Density Modeling of Non-Gaussian Source for Autoregressive Process [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(4): 894-903.
- [5] 周立松.反辐射导弹目标检测与告警技术的研究[D].西安:西安电子科技大学,1997.
- [6] 文树梁.基于时频分布的反辐射导弹检测技术[J].航天电子对抗,2005,21(1):6-11.
- [7] 张宏宽,陈建春,杨万海.基于 Radon-ambiguity 变换的反辐射导弹检测识别技术[J].西安电子科技大学学报,2004,31(3):446-449.
- [8] Wang M, Chan A K. Linear Frequency-modulated Signal Detection Using Radon-ambiguity Transform [J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1998, 46(3): 571-586.
- [9] Namias V. The Fractional Order Fourier Transform and its Application to Quantum Mechanics [J]. J. Inst. Math. App., 1980, 25: 241-265.
- [10] McBride A C, Keer F H. On Namias' Fractional Fourier Transform [J]. IMA. J. Appl. Math., 1987, 39: 159-171.
- [11] Ozaktas H M, Arikan O, et al. Digital Computations of the Fractional Fourier Transform [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1996, 44: 2141-2150.
- [12] Kay S M. Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume I: Estimation Theory [M]. Pearson Education, Inc., Publishing as Prentice Hall PRT, 1998.