

# 脉冲噪声下基于压缩变换函数的LFM信号参数估计

金艳 陈鹏辉\* 姬红兵

(西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)

**摘要:** 针对现有线性调频(LFM)信号参数估计方法在脉冲噪声下性能退化甚至完全失效的问题, 该文提出一种脉冲噪声下估计LFM信号参数的新方法。该文构造了一种新的压缩变换(CT)函数, 分析了该函数在零点附近的近线性, 推导了任意随机变量经该函数变换后的2阶矩有界, 证明了函数变换前后LFM信号的初始频率和调频斜率信息不变。将经过函数变换后的信号进行分数阶傅里叶变换(FrFT), 根据FrFT域中峰值坐标和信号参数的关系, 寻找变换域中的峰值点, 实现信号参数的估计。仿真实验表明, 该方法可有效抑制脉冲噪声且能准确估计出信号的参数信息, 实现简单, 不需要噪声的先验信息, 具有良好的稳健性。

**关键词:** 脉冲噪声; 压缩变换函数; 分数阶傅里叶变换; 参数估计

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)02-0277-07

DOI: 10.11999/JEIT200342

## Parameter Estimation of LFM Signals Based on Compress Transform Function in Impulsive Noise

JIN Yan CHEN Penghui JI Hongbing

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that existing parameter estimation algorithms of Linear Frequency Modulation (LFM) signals undergo performance degradation or even become invalid in impulsive noise environment, a new method for estimating LFM signal parameters in impulsive noise is proposed in this paper. The paper constructs a new Compress Transform (CT) function, analyzes the approximate linearity of the function near the zero point, derives that the second-order moments are bounded after the proposed transformation for any random variable, and proves that the initial frequency and frequency modulation slope information of an LFM signal are unchanged after the transformation. According to the relationship between the peak coordinates and the signal parameters in the FrFT domain, the peak point in the transform domain is located and the signal parameters estimates can be obtained. Simulation results show that the proposed method can effectively suppress the impulse noise and accurately estimate the parameter information of the signal. This method is simple and robust. Moreover, it does not require the prior information of the impulsive noise.

**Key words:** Impulsive noise; Compress Transform (CT) function; Fractional Fourier Transform (FrFT); Parameter estimation

### 1 引言

线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号是一种典型的非平稳信号<sup>[1]</sup>,由于其被截获概率低、作用距离远和分辨率高等特点在声呐、雷达、通信等领域获得广泛应用<sup>[2]</sup>。LFM信号高精度的瞬时频率和初始频率估计在水下目标探测、雷

达探测以及地质探测等方面扮演着重要角色。

最大似然(Maximum Likelihood, ML)估计法在实现LFM信号的检测和参数估计中占有重要地位,这类方法估计精度高,但计算复杂,不利于信号实时处理。小波变换(Wavelet Transform, WT)是信号分析与处理的重要工具,文献<sup>[3]</sup>研究了小波变换在LFM信号参数检测和估计中的应用,提出了基于连续小波变换的LFM信号参数检测方法。但小波基的选取较为复杂且小波变换的实时性能差<sup>[4]</sup>。文献<sup>[5]</sup>提出了一种基于分数阶傅里叶变换(FrFT)的信号检测和参数估计方法。对LFM信号做不同阶数的FrFT, LFM信号的能量聚集性会随着阶数

收稿日期: 2020-04-30; 改回日期: 2020-09-22; 网络出版: 2020-11-17

\*通信作者: 陈鹏辉 1036843180@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61871301)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61871301)

的不同而改变,通过搜索FrFT域上的峰值即可实现信号的检测和参数估计。

上述方法都是在高斯噪声环境下进行信号的参数估计,在强脉冲噪声环境下则性能下降甚至失效。对于此类非高斯脉冲噪声, $\alpha$ 稳定分布噪声模型能够更好地描述。 $\alpha$ 稳定分布<sup>[6,7]</sup>具有更厚的拖尾和显著的脉冲特性<sup>[8]</sup>,更符合具有尖峰脉冲特性的噪声。但 $\alpha$ 稳定分布噪声不存在有限的2阶及高阶统计量,因而传统的信号参数估计方法在脉冲噪声环境下性能严重退化。文献<sup>[9]</sup>提出一种基于M估计<sup>[10]</sup>的稳健滤波方法,构建了Myriad<sup>[11]</sup>滤波器滤除脉冲噪声。该方法可有效抑制噪声,但滤波器权值的确定需采用迭代算法,在实际应用中其计算复杂度较高。文献<sup>[12]</sup>提出的基于分数低阶统计量(Fractional Lower Order Statistics, FLOS)的方法得到了广泛应用,研究者在此基础上提出了基于分数低阶协方差算法<sup>[13]</sup>。但这种方法需要脉冲噪声的先验信息,且其阶数的选取缺乏理论支撑。

针对上述问题,本文提出一种基于压缩变换函数的信号参数估计方法。本文构造了一种非线性压缩变换函数,证明了函数变换前后LFM信号的初始频率和调频斜率信息不变。将经过函数变换后的信号进行FrFT,根据推导出的FrFT域中峰值坐标和信号参数的关系,寻找变换域中的峰值点,实现信号参数的估计。该方法实现简单,在强脉冲噪声环境下也具有较好的性能,且不需要噪声的先验信息。

## 2 $\alpha$ 脉冲噪声模型

$\alpha$ 稳定分布没有统一的概率密度表达式,通常采用特征函数对其进行描述

$$\varphi(t) = \exp \{jat - \gamma|t|^\alpha [1 + j\beta \operatorname{sgn}(t)\omega(t, \alpha)]\} \quad (1)$$

其中

$$\omega(t, \alpha) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \lg |t|, & \alpha = 1 \\ \tan \frac{\alpha\pi}{2}, & \alpha \neq 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\operatorname{sgn}(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ 0, & t = 0 \\ -1, & t < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$\operatorname{sgn}(t)$ 是符号函数。 $\alpha$ 是特征指数,取值范围是 $0 < \alpha < 2$ ,该参数决定了 $\alpha$ 稳定分布的脉冲强度, $\alpha$ 值越小,脉冲性就越强。 $\beta$ 是对称参数,决定了 $\alpha$ 稳定分布的斜度, $\beta = 0$ 时为对称 $\alpha$ 稳定分布(Symmetric  $\alpha$ -Stable, SaS)。 $\gamma$ 是分散系数,体现了样本的分散程度。 $a$ 是位置参数,当对称 $\alpha$ 稳定分布满足 $a = 0, \gamma = 1$ 时称为标准 $\alpha$ 稳定分布。本文采用SaS为噪声模型。由于 $\alpha$ 稳定分布没有2阶及2阶

以上的统计量,不存在方差,因此采用广义信噪比<sup>[14]</sup>(Generalized Signal-to-Noise Ratio, GSNR)代替信噪比,GSNR的定义为

$$\text{GSNR} = 10 \lg (\sigma_s^2 / \gamma_v) \text{ (dB)} \quad (4)$$

其中, $\sigma_s^2$ 表示信号的方差, $\gamma_v$ 是噪声的分散系数。

## 3 压缩变换函数

在 $\alpha$ 稳定分布噪声背景下,传统的信号参数估计方法不再适用。为此,本文构造了压缩变换函数,使 $\alpha$ 稳定分布噪声中的信号经过该函数变换后具有有限的2阶及高阶统计量,同时信号的相位参数信息不发生改变。所构造的函数为

$$f[x(n)] = \frac{x(n)}{\exp\left(\frac{|x(n)|}{\sigma}\right)} \quad (5)$$

其中 $\sigma > 0$ 是尺度变换参数。

图1所示为式(5)中 $f(x)$ 函数对应的曲线图。由图1可以看出,所构造函数是奇对称的且具有非线性特性。该函数在零点附近近似线性,其中参数 $\sigma$ 决定了近似线性区间的大小, $\sigma$ 越大,近似线性区间也越大。若参数 $\sigma$ 取值过大,则相当于对信号做线性变换,无法抑制大幅值脉冲。当 $\sigma$ 过小时,可抑制噪声的大幅值脉冲,但也会对信号产生过压缩,致使丢失信号的参数信息。此外,随着参数 $\sigma$ 的减小,函数的中心点到函数极小值之间的距离减小,表明该函数对异常值处理的能力增强,对脉冲噪声具有更强的稳健性。

图2所示是GSNR = -2 dB噪声环境下,对LFM信号进行200次蒙特卡洛实验所得到的信号估计误差和参数关系曲线图。由图可知,当 $\alpha = 0.5$ 时,参数 $\sigma \in [0.5, 2.5]$ 可有效估计信号参数;当 $\alpha = 1.0$ 时,参数 $\sigma \in [1.0, 4.5]$ 可有效估计信号参数;当 $\alpha = 1.5$ 时,参数 $\sigma \in [1.0, 6.0]$ 可有效估计信号参数;当 $\alpha = 2.0$ 时,参数 $\sigma \in [1.0, 8.0]$ 可有效估计信号参数;经多次仿真实验,压缩函数中参数 $\sigma$ 取值为2可抑制大幅值脉冲且信号的参数估计效果较好。

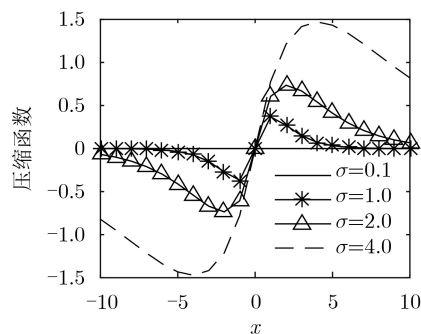


图1 不同尺度变换参数对应的压缩变换函数波形

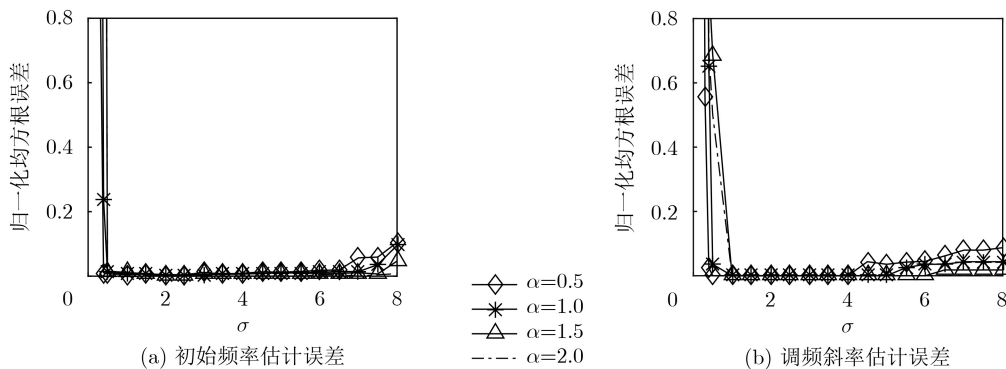


图2 不同尺度变换参数下信号估计误差

FLOS方法已被证明选择合适的阶数时可有效抑制 $\alpha$ 稳定分布噪声<sup>[12,15]</sup>，使含噪信号具有有限的2阶矩，从而后续可采用常规2阶统计量方法完成信号参数的估计。相比于分数低阶函数 $g(x) = x^{<m>}$ ，压缩变换函数 $f(x)$ 若在近似线性区间具有更缓慢的上升趋势，且 $f(|x|)$ 的函数值小于 $g(|x|)$ 的函数值，则 $f(x)$ 能够更有效抑制大幅值脉冲噪声。本文提出以下命题并加以证明。

**命题1** 相互独立的随机变量 $x, y$ 服从参数为 $\alpha$ 的SaS稳定分布( $0 < \alpha < 2$ )，所对应的压缩变换函数值分别为 $W = f(x), V = f(y)$ ，则当有大幅值脉冲出现时 $W, V$ 满足 $|E(WV)| \leq |E(x^{<m>}y^{<m>})|$ ，其中， $0 < m < \frac{\alpha}{2}$ ， $x^{<m>} = x \cdot \frac{|x|^m}{|x|} = \text{sgn}(x) \cdot |x|^m$ 。

**证明** 设 $x, y$ 的联合概率密度函数为 $f_{XY}(x, y)$ ，由式(5)可得

$$|E(WV)| = \left| E \left( \frac{x}{\exp\left(\frac{|x|}{\sigma}\right)} \cdot \frac{y}{\exp\left(\frac{|y|}{\sigma}\right)} \right) \right|$$

$$= \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{xy}{\exp\left(\frac{|x|+|y|}{\sigma}\right)} \cdot f_{XY}(x, y) dx dy \right| \quad (6)$$

$$|E(x^{<m>}y^{<m>})| = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot \frac{|x|^m}{|x|} \cdot y \cdot \frac{|y|^m}{|y|} \cdot f_{XY}(x, y) dx dy \right| \quad (7)$$

由于联合概率密度函数 $f_{XY}(x, y) \geq 0$ ，所以只需证明在 $-\infty < x, y < +\infty$ 时

$$|\omega(x, y)| = \left| \frac{xy}{\exp\left(\frac{|x|+|y|}{\sigma}\right)} \right| \leq \left| x \cdot \frac{|x|^m}{|x|} \cdot y \cdot \frac{|y|^m}{|y|} \right|$$

$$= \left| \frac{xy}{|xy|^{1-m}} \right| = |v(x, y)| \quad (8)$$

因为 $0 < m < \frac{\alpha}{2}$ ，所以 $0 < 1 - m < 1$ 。可以看出，函数 $\omega(x, y)$ 和 $v(x, y)$ 具有式(9)和式(10)的对称性

$$\omega(-x, y) = \omega(x, -y) = -\omega(x, y),$$

$$\omega(x, y) = \omega(-x, -y) \quad (9)$$

$$v(-x, y) = v(x, -y) = -v(x, y),$$

$$v(x, y) = v(-x, -y) \quad (10)$$

所以只要证明 $0 \leq x, y < +\infty$ 时不等式成立即可，当 $0 \leq x, y < +\infty$ 时原不等式可化为

$$\frac{xy}{\exp\left(\frac{x+y}{\sigma}\right)} \leq \frac{xy}{(xy)^{1-m}} \quad (11)$$

当 $x = y = 0$ 等号成立，当 $0 < x, y < +\infty$ 时，不等式等价于证明

$$\frac{(xy)^{1-m}}{\exp\left(\frac{x+y}{\sigma}\right)} < 1 \quad (12)$$

由均值不等式可知，当 $0 < x, y < +\infty$ 时 $x + y \geq 2(xy)^{\frac{1}{2}}$ ，当且仅当 $x = y$ 时成立。可以得到

$$\frac{(xy)^{1-m}}{\exp\left(\frac{x+y}{\sigma}\right)} < \frac{xy}{\exp\left[\frac{2}{\sigma}(xy)^{\frac{1}{2}}\right]} < 1 \quad (13)$$

命题成立。同时，当 $x = y$ 时 $|E(WV)| = |E(W^2)| < 1$ ，即随机变量 $x$ 经过压缩变换后2阶矩有界。因此，相比于分数低阶统计量方法，压缩函数对信号的大幅值异常脉冲抑制能力更强。

**命题2** LFM信号 $s(t)$ 经过压缩变换后，幅值发生变化，相位信息不变。

**证明** 设LFM信号 $s(t) = A \exp(j2\pi ft + j\pi kt^2)$ ， $A$ 为信号幅度， $f$ 为信号初始频率， $k$ 是调频斜率。

$$f[s(t)] = \frac{s(t)}{\exp\left(\frac{|s(t)|}{\sigma}\right)} = \frac{A \exp(j2\pi ft + j\pi kt^2)}{\exp\left(\frac{|A \exp(j2\pi ft + j\pi kt^2)|}{\sigma}\right)}$$

$$= \frac{A}{\exp\left(\frac{A}{\sigma}\right)} \exp(j2\pi ft + j\pi kt^2) \quad (14)$$

由式(14)可知命题2得证。即经过变换后信号 $s(t)$ 仅幅值发生变化,信号的初始频率 $f$ 和调频斜率 $k$ 并未发生改变。

## 4 基于CT的参数估计方法

### 4.1 LFM信号的参数表示

FrFT是傅里叶变换的一种广义化形式<sup>[16]</sup>。FrFT可以看作将信号由时间轴逆时针旋转任意角度到 $u$ 轴上的表示<sup>[17]</sup>。连续信号 $x(t)$ 的FrFT定义为

$$X_{\varphi}(u) = F^p[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)K_{\varphi}(t, u)dt \quad (15)$$

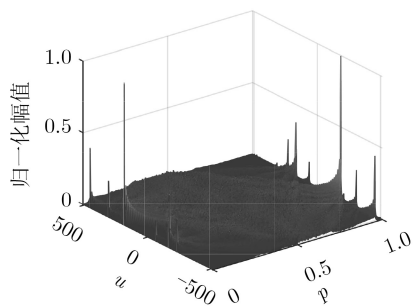
其中,  $\varphi$ 为旋转角度,  $p$ 为阶数, 且 $\varphi = p\pi/2$ ,  $F^p[\cdot]$ 代表阶次为 $p$ 的FrFT运算,  $K_{\varphi}(t, u)$ 为核函数<sup>[18]</sup>。

将LFM信号 $s(t) = \exp(j2\pi f_0 t + j\pi k_0 t^2)$ 代入式(15)中, 可得LFM信号的FrFT为

$$\begin{aligned} S_{\varphi}(u) &= \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)K_{\varphi}(t, u)dt \\ &= \sqrt{\frac{1-j\cot\varphi}{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(j2\pi f_0 t + j\pi k_0 t^2) \\ &\quad \cdot \exp\left(j\frac{t^2+u^2}{2}\cot\varphi - jtu\csc\varphi\right) dt \\ &= Q \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(jt(2\pi f_0 - u\csc\varphi) \right. \\ &\quad \left. + \frac{jt^2}{2}(2\pi k_0 + \cot\varphi)\right) dt \end{aligned} \quad (16)$$

式中,  $Q = \sqrt{\frac{1-j\cot\varphi}{2\pi}} \exp(j\frac{u^2\cot\varphi}{2})$ 。可以看出, 当 $\cot\varphi = \cot\varphi_0 = -2\pi k_0$ 时LFM信号在FrFT域中有最佳的能量聚集特性。式(16)可进一步写成

$$S_{\varphi}(u) = Q \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[jt(2\pi f_0 - u\csc\varphi_0)]dt \quad (17)$$



(a)  $x(t)$ 的FrFT

由式(17)可见, 当 $2\pi f_0 - u\csc\varphi_0 = 0$ 时, LFM信号在FrFT域中有能量聚集。

综上, 当 $2\pi f_0 = u\csc\varphi_0$ ,  $-2\pi k_0 = \cot\varphi_0$ 时, LFM信号在FrFT域形成一个峰值, 根据峰值坐标 $(p_0, u_0)$ 可以得到LFM信号参数的估计。LFM信号参数表示为

$$\left. \begin{aligned} k_0 &= -\frac{\cot\varphi_0}{2\pi} \\ f_0 &= \frac{u_0\csc\varphi_0}{2\pi} \\ \varphi_0 &= \frac{p_0\pi}{2} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

由命题2可知, LFM信号经过压缩变换后, 初始频率和调频斜率信息不发生改变。

### 4.2 参数估计方法

信号 $x(t)$ 是脉冲噪声环境下的LFM信号, 即

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (19)$$

$s(t)$ 为LFM信号,  $n(t)$ 是 $\alpha$ 稳定分布脉冲噪声。 $x_{CT}(t)$ 是信号 $x(t)$ 经过压缩变换后得到的信号, 即

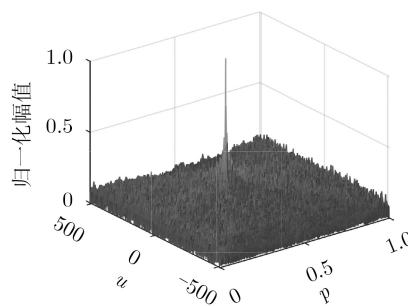
$$x_{CT}(t) = \frac{x(t)}{\exp\left(\frac{|x(t)|}{\sigma}\right)} \quad (20)$$

如图3(a)所示, 在GSNR = 2 dB的脉冲噪声环境下, 信号 $x(t)$ 的FrFT域中有多个峰值, 无法得到信号参数的估计。图3(b)是信号 $x(t)$ 经过压缩变换函数后 $x_{CT}(t)$ 的FrFT, 图中只有1个峰值点, 则根据式(18)由峰值坐标便可得到信号的初始频率和调频斜率。

对于信号 $x(t)$ , 经过压缩变换函数后, 脉冲噪声被抑制, 通过计算 $x_{CT}(t)$ 不同阶次的FrFT, 可以得到以 $p, u$ 为坐标轴的3维图, 寻找3维图中的峰值点坐标 $(p, u)$ , 根据 $p$ 与 $\varphi$ 的关系结合式(18)就可求得LFM信号的初始频率和调频斜率。

## 5 仿真实验与结果分析

本文仿真采用的LFM信号参数为: 初始频率



(b)  $x_{CT}(t)$ 的FrFT

图3 脉冲噪声环境下信号的FrFT

$f_0 = 150$  Hz, 调频斜率 $k_0 = 100$  Hz/s, 采样频率 $f_s = 1024$  Hz, 采样点数 $N = 1024$ 。噪声环境为加性标准SaS分布噪声。

### 5.1 方法性能比较

如图4所示, 在 $\alpha = 0.8$ , GSNR = -2 dB的对称 $\alpha$ 稳定分布噪声下, 分别采用本文方法CT-FrFT和基于分数低阶统计量方法FLOS-FrFT以及基于Myriad滤波器的方法MY-FrFT对含噪信号进行处理并对比。

图4(a)是没有噪声干扰时LFM信号的FrFT3维图, 可以看出, 图中有1个明显的峰值, 根据峰值坐标便可得到信号的初始频率和调频斜率。图4(b)是脉冲噪声下LFM信号的FrFT3维图, 由图可知, 由于脉冲噪声的存在, 图中有多个峰值点, 所以无法得到信号的参数信息。图4(c)采用分数低阶方法

FLOS-FrFT( $m = 0.2$ )得到的FrFT3维图, 由图可知, 此时噪声已被抑制, 虽然仍残余干扰, 但最大峰值点与图4(a)一致, 进而可得到信号参数信息。图4(d)是采用基于Myriad滤波器方法MY-FrFT所对应的FrFT3维图, 图中存在多个峰值, 无法确定最大峰值点是否为信号参数对应的峰值点, 所以不能对信号参数进行估计。图4(e)是采用本文CT-FrFT方法得到的信号FrFT3维图, 由图可以看出脉冲噪声被抑制, 且只存在1个清晰的峰值, 与图4(a)相比, 其幅值降低, 但坐标值并未发生变化, 从上文推导分析可知此时信号的参数信息并未发生改变, 仍可得到信号的中心频率和调频斜率。综上, CT-FrFT方法具有良好的脉冲噪声抑制效果, 且性能优于分数低阶统计量FLOS-FrFT和MY-FrFT两种方法。

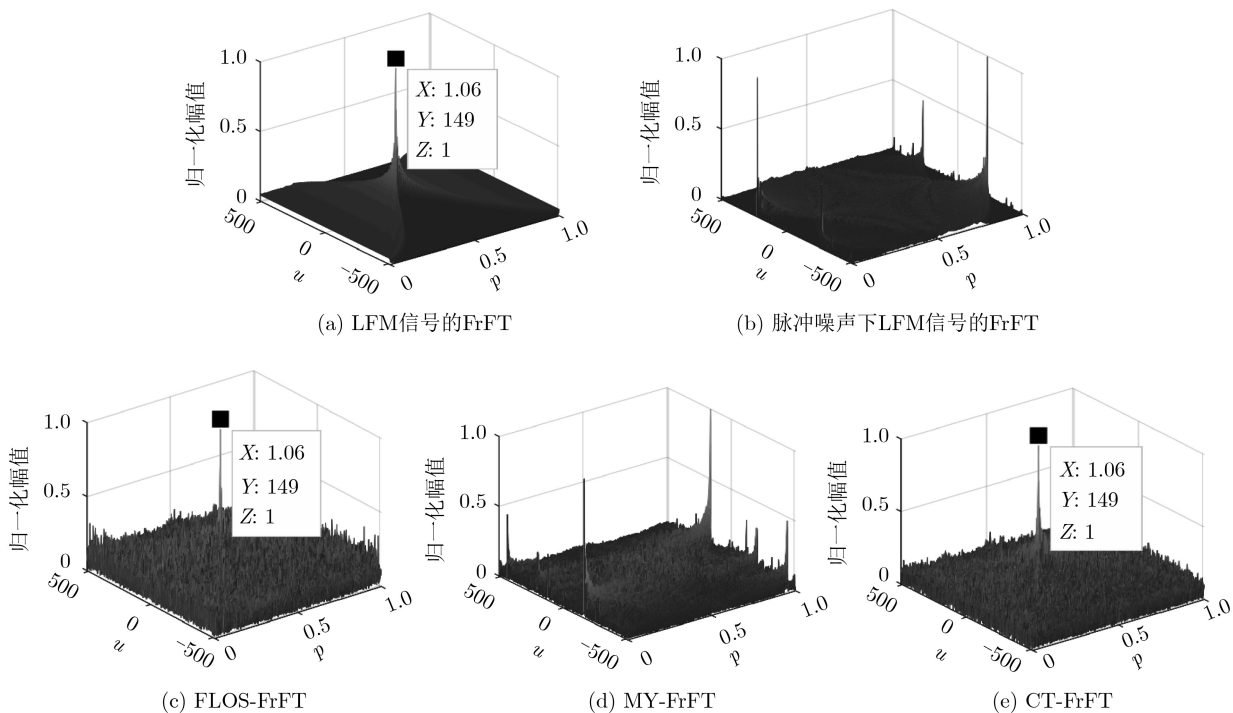


图4 不同方法下信号的FrFT

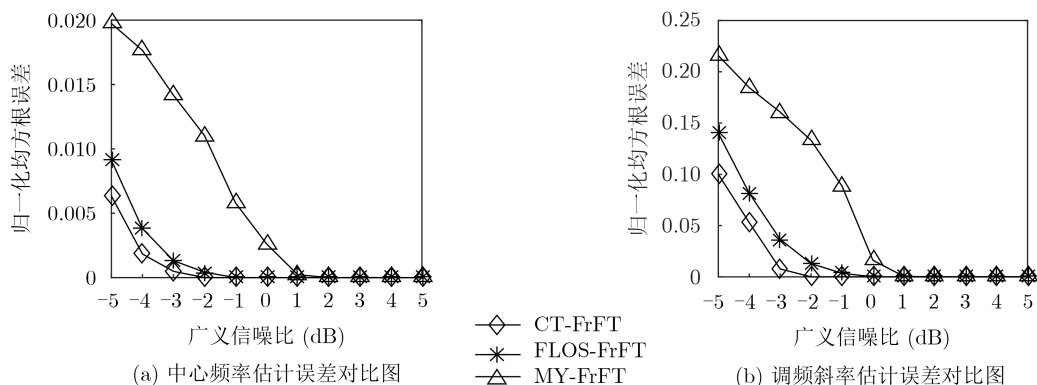


图5  $\alpha = 0.8$  LFM信号参数估计误差图

## 5.2 参数估计及性能分析

本文采用归一化均方根误差(Normalized Root Mean Square Error, NRMSE)来评价 $\alpha$ 稳定分布噪声下不同抑噪方法的性能。在不同的广义信噪比下,经过200次蒙特卡洛实验,所得结果如图5和图6所示。

由图5可知,MY-FrFT方法在 $\alpha = 0.8$ 的 $\alpha$ 稳定分布噪声情况下,在 $\text{GSNR} \geq 1$  dB时可以估计出LFM信号的参数。FLOS-FrFT方法在 $\alpha = 0.8$ 的脉冲噪声环境下,当 $\text{GSNR} \geq -1$  dB时可以实现对LFM信号的参数的估计,当小于 $-1$  dB时估计性能下降。CT-FrFT方法在 $\text{GSNR} \geq -2$  dB时可以实现对LFM信号中心频率和调频斜率的估计。

由图6可知,在 $\alpha = 1.5$ 的 $\alpha$ 稳定分布噪声情况下,MY-FrFT方法在 $\text{GSNR} \geq -1$  dB时可以实现对LFM信号的参数的准确估计;FLOS-FrFT方法当 $\text{GSNR} \geq -2$  dB时可以实现对LFM信号的参数的准确估计;CT-FrFT方法在 $\text{GSNR} \geq -4$  dB时可以实现对LFM信号的中心频率和调频斜率的准确估计。

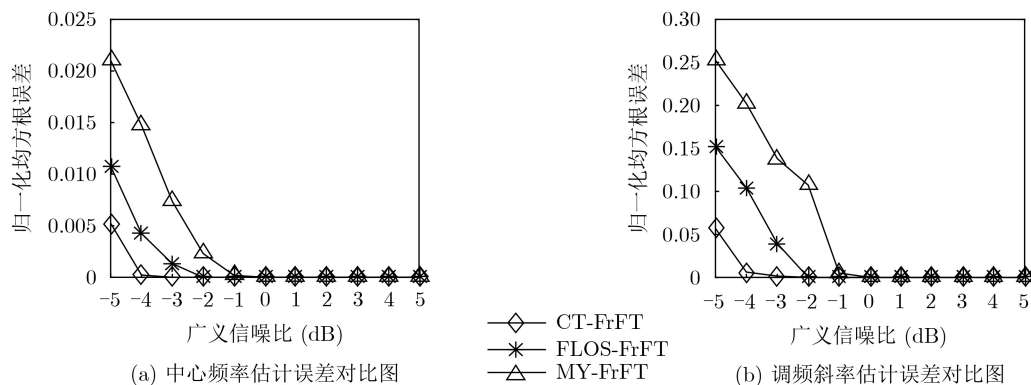


图6  $\alpha = 1.5$  LFM信号参数估计误差图

## 参考文献

- [1] ARCE G R and HASAN S R. Elimination of interference terms of the discrete Wigner distribution using nonlinear filtering[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, 48(8): 2321–2331. doi: 10.1109/78.852013.
- [2] 刘冰凡, 陈伯孝. 基于OFDM-LFM信号的MIMO雷达通信一体化信号共享设计研究[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(4): 801–808. doi: 10.11999/JEIT180547.  
LIU Bingfan and CHEN Baixiao. Integration of MIMO radar and communication with OFDM-LFM signals[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 801–808. doi: 10.11999/JEIT180547.
- [3] 陈浩, 张晔, 王立国. 基于CWT的线性调频信号参数检测方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, 36(5): 674–676. doi: 10.3321/j.issn:0367-6234.2004.05.031.  
CHEN Hao, ZHANG Ye, and WANG Ligu. Parameter

比较图5和图6可知,采用CT-FrFT方法可以在低广义信噪比下,强脉冲噪声环境中实现信号中心频率和调频斜率的估计,随着脉冲强度的增大,所采用几种参数估计方法的性能均下降,但CT-FrFT方法的性能始终优于其它方法。

## 6 结论

针对传统的LFM信号参数估计方法在脉冲噪声环境下性能退化的问题,本文提出了一种可在 $\alpha$ 脉冲噪声环境下有效估计信号参数的新方法。该方法从抑制大幅值脉冲噪声,保留信号相位信息的角度出发,构建了一种新的压缩变换函数,并理论推导和证明了含噪信号经过压缩变换后具有有限的2阶及高阶统计量。通过对含有脉冲噪声的信号进行压缩变换处理,然后进行分数阶傅里叶变换,即可完成信号的参数估计。仿真结果表明,本文方法与基于分数低阶统计量、Myriad滤波器等方法相比,能够更好地抑制不同脉冲强度下的噪声,进而实现信号参数估计,且性能更优。

detection method for linear frequency modulation signal based on continuous wavelet transform[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2004, 36(5): 674–676. doi: 10.3321/j.issn:0367-6234.2004.05.031.

- [4] 李林, 王林, 韩红霞, 等. 自适应时频同步压缩算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(2): 438–444. doi: 10.11999/JEIT190146.

LI Lin, WANG Lin, HAN Hongxia, et al. Research on the adaptive synchrosqueezing algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(2): 438–444. doi: 10.11999/JEIT190146.

- [5] 黄响, 唐世阳, 张林让, 等. 一种基于高效FrFT的LFM信号检测与参数估计快速算法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(12): 2905–2911. doi: 10.11999/JEIT170467.

HUANG Xiang, TANG Shiyang, ZHANG Linrang, et al. A fast algorithm of LFM signal detection and parameter

- estimation based on efficient FrFT[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(12): 2905–2911. doi: [10.11999/JEIT170467](https://doi.org/10.11999/JEIT170467).
- [6] TALEBI S P and MANDIC D P. Distributed particle filtering of  $\alpha$ -stable signals[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2017, 24(12): 1862–1866. doi: [10.1109/LSP.2017.2761182](https://doi.org/10.1109/LSP.2017.2761182).
- [7] ZHANG Jinfeng, QIU Tianshuang, WANG Peng, *et al.* A novel cauchy score function based DOA estimation method under alpha-stable noise environments[J]. *Signal Processing*, 2017, 138: 98–105. doi: [10.1016/j.sigpro.2017.03.014](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2017.03.014).
- [8] 代振, 王平波, 卫红凯. 非高斯背景下基于Sigmoid函数的信号检测[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(12): 2945–2950. doi: [10.11999/JEIT190012](https://doi.org/10.11999/JEIT190012).  
DAI Zhen, WANG Pingbo, and WEI Hongkai. Signal detection based on Sigmoid function in Non-Gaussian noise[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(12): 2945–2950. doi: [10.11999/JEIT190012](https://doi.org/10.11999/JEIT190012).
- [9] GOH B M K and LIM H S. Sequential algorithms for sample myriad and weighted myriad filter[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(11): 6047–6052. doi: [10.1109/TSP.2012.2208959](https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2208959).
- [10] RUPPERT D. Robust statistics: The approach based on influence functions[J]. *Technometrics*, 1987, 29(2): 240–241. doi: [10.1080/00401706.1987.10488218](https://doi.org/10.1080/00401706.1987.10488218).
- [11] KALLURI S and ARCE G R. Adaptive weighted myriad filter algorithms for robust signal processing in  $\alpha$ -stable noise environments[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, 46(2): 322–334. doi: [10.1109/78.655418](https://doi.org/10.1109/78.655418).
- [12] LI Li, QIU Tianshuang, and SHI Xiaofei. Parameter estimation based on fractional power spectrum density in bistatic MIMO radar system under impulsive noise environment[J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2016, 35(9): 3266–3283. doi: [10.1007/s00034-015-0203-5](https://doi.org/10.1007/s00034-015-0203-5).
- [13] CHEN Yangquan, SUN Rongtao, ZHOU Anhong, *et al.* Fractional order signal processing of electrochemical noises[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2008, 14(9/10): 1443–1456. doi: [10.1177/1077546307087438](https://doi.org/10.1177/1077546307087438).
- [14] JIN Yan and LIU Jie. Parameter estimation of frequency hopping signals based on the Robust S-transform algorithms in alpha stable noise environment[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2016, 70(5): 611–616. doi: [10.1016/j.aeue.2016.01.019](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2016.01.019).
- [15] MA Xinyu and NIKIAS C L. Joint estimation of time delay and frequency delay in impulsive noise using fractional lower order statistics[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(11): 2669–2687. doi: [10.1109/78.542175](https://doi.org/10.1109/78.542175).
- [16] 韩雨婷. Alpha稳定分布噪声下线性调频信号的参数估计[D]. [硕士论文], 西安电子科技大学, 2018.  
HAN Yuting. Parameter estimation of LFM signal in alpha stable noise[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2018.
- [17] TAO Ran, ZHANG Feng, and WANG Yue. Fractional power spectrum[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(9): 4199–4206. doi: [10.1109/TSP.2008.925579](https://doi.org/10.1109/TSP.2008.925579).
- [18] LI Li and QIU Tianshuang. A robust parameter estimation of LFM signal based on sigmoid transform under the alpha stable distribution noise[J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2019, 38(7): 3170–3186. doi: [10.1007/s00034-018-1008-0](https://doi.org/10.1007/s00034-018-1008-0).

金 艳: 女, 1978年生, 副教授, 博士, 主要研究方向为现代信号处理、非高斯信号处理、信号检测与估计等。

陈鹏辉: 男, 1995年生, 硕士生, 主要研究方向为非高斯噪声下信号处理方法。

姬红兵: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光电信号处理、微弱信号检测与识别、医学影像处理等。

责任编辑: 陈 倩