

# 一种基于多循环频率的韧性时延与多普勒频移联合估计算法

刘 洋<sup>1,2</sup>, 邱天爽<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学电子信息与电气工程学部, 辽宁大连 116024; 2. 内蒙古大学电子信息工程学院, 内蒙古呼和浩特 010021)

**摘 要:** 本文提出了一种基于分数低阶循环模糊函数的多循环频率时延与多普勒频移联合估计算法. 该方法将分数低阶矩与循环平稳特性相结合, 能够在 S $\alpha$ S (Symmetric  $\alpha$  Stable) 脉冲噪声条件下检测信号的循环平稳特性. 算法充分利用了信号的循环频率信息, 具备较强的抑制干扰能力. 仿真结果表明, 在脉冲噪声和干扰环境中本文提出的算法均能稳定工作, 估计性能优于基于二阶循环模糊函数和  $p$  阶循环模糊函数的算法, 是一种韧性的时延与多普勒频移联合估计算法.

**关键词:** 循环平稳特性; 对称  $\alpha$  稳定分布噪声; 模糊函数; 时间延迟; 多普勒频移

**中图分类号:** TN911.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2011) 10-2311-06

## A Robust Method for Joint Time Delay and Doppler Estimation Based on Multi-Cycle Frequencies

LIU Yang<sup>1,2</sup>, QIU Tian-shuang<sup>1</sup>

(1. Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. College of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University, Huhhot, Inner Mongolia 010021, China)

**Abstract:** A new method for joint time delay and Doppler shift estimation based on the fractional lower-order cyclic cross ambiguity function (FCCA) and multi-cycle frequencies is proposed. The relationship among fractional lower-order cyclic correlation, second-order cyclic correlation and  $p$ th-order cyclic correlation is analyzed. By using fractional lower-order cyclic statistics and exploiting cyclostationarity property of more than one cycle frequency, the new algorithm share the signal selectivity and is highly tolerant to S $\alpha$ S noise and interfering signals. The performances of different methods in various environments are tested in simulations. Simulation results indicate that the proposed algorithm outperforms the methods which is based on the conventional cyclic cross ambiguity function (CCA) and  $p$ th-order cyclic cross ambiguity function (PCCA) respectively.

**Key words:** cyclostationarity; symmetric  $\alpha$  stable distribution (S $\alpha$ S); ambiguity function; time delay; Doppler shift

## 1 引言

时延与多普勒频移估计是目标跟踪与定位的重要手段, 在雷达、声纳、无线通信等领域有着广泛应用<sup>[1,2]</sup>. 模糊函数是实现时延与多普勒频移联合估计的一种有效工具, 文献[3]详细分析了模糊函数的性质和处理方法. 此后, 学者们相继提出了基于二阶统计量、高阶统计量、分数低阶统计量的模糊函数和相应的时延与多普勒频移联合估计方法<sup>[4-7]</sup>, 提高了算法对不同类型噪声的抑制能力. 然而, 在实际应用中, 接收信号中不仅含有噪声, 还含有不同类型的干扰, 其中与源信号频谱重叠的干扰信号会严重影响算法的性能. 针对雷达、声

纳和通信系统中使用的许多信号为循环平稳信号的情况<sup>[8]</sup>, Huang 提出了循环模糊函数 (CCA) 的概念和基于多循环频率 CCA 的时延与多普勒频移联合估计算法<sup>[9,10]</sup>. 这种方法利用了信号的循环平稳特性, 能够同时抑制高斯噪声和干扰信号, 提高了时延与多普勒频移联合估计的性能<sup>[10,11]</sup>.

多循环频率 CCA 算法是在高斯噪声背景条件下提出的, 需要利用信号的二阶循环统计量. 但是, 雷达、声纳等系统的实际噪声中含有大量脉冲成分, 如低频大气噪声、水声噪声以及一些环境噪声等. 研究表明这些噪声更适合用 S $\alpha$ S 稳定分布模型来表示<sup>[6,12]</sup>. S $\alpha$ S 稳定分布过程不存在有限的二阶矩 ( $\alpha = 2$  除外), 在脉冲噪声

条件下基于二阶循环统计量的 CCA 算法必然出现性能退化甚至失效. 文献[13]针对这一问题提出了基于  $p$  阶循环模糊函数(PCCA)的算法,在一定程度上能够抑制脉冲噪声. 但是,由于  $p$  阶循环相关函数不能完全抑制脉冲噪声对信号的影响,该方法存在一定局限性. 而且,该方法是基于单循环频率的估计算法,因而对信号的谱相关信息利用不足. 为了更加有效地对脉冲噪声和干扰进行抑制,提高时延与多普勒频移估计精度,本文提出分数低阶循环模糊函数和基于多循环频率分数低阶循环模糊函数的时延与多普勒频移联合估计方法. 仿真结果表明,本文提出的算法在不同类型噪声和干扰环境下均能稳定工作,性能优于多循环频率 CCA 算法和基于 PCCA 的时延与多普勒频移联合估计算法.

## 2 分数低阶循环统计量

设  $s(t)$  为感兴趣信号(SOI),  $n(t)$  和  $m(t)$  为不感兴趣信号(SNOI)包括干扰和噪声,则时延与多普勒频移估计的信号模型可以表示为:

$$x(t) = r_1 s(t) + n(t) \quad (1)$$

$$y(t) = r_2 s(t - D) e^{j2\pi f_d t} + m(t) \quad (2)$$

其中,  $D$  和  $f_d$  分别为时延和多普勒频移,  $r_1$  和  $r_2$  为信号的相对幅度衰减.  $n(t)$  和  $m(t)$  中的干扰信号与 SOI 具有不同的循环频率,噪声是相互独立的加性噪声. 为了便于分析,假设  $s(t)$  与  $n(t)$  和  $m(t)$  是统计独立的.

循环相关函数是循环平稳信号分析和处理的一个重要理论工具,信号  $x(t)$  的循环自相关函数定义为<sup>[8]</sup>:

$$R_x^\epsilon(\tau) \triangleq \langle x(t + \tau/2) x(t - \tau/2) e^{-j2\pi\epsilon t} \rangle \quad (3)$$

$\epsilon$  代表 SOI 的循环频率,  $\langle \cdot \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} (1/T) \int_{-T/2}^{T/2} (\cdot) dt$  表示时间平均. 由于 SoS 过程只存在小于特征指数  $\alpha$  的矩,若  $p \geq \alpha$ , 则  $E[|X|^p] = \infty$ . 如果信号  $x(t)$  中含有  $\alpha < 2$  的 SoS 噪声,将导致二阶循环相关函数发散  $R_x^\epsilon(\tau) \triangleq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} E[x(t + \tau/2) x(t - \tau/2)] e^{-j2\pi\epsilon t} dt = \infty$ . 因此,在脉冲噪声环境中二阶循环统计量不再适用,传统循环平稳信号处理方法会出现性能退化.

研究表明,在脉冲噪声环境中应用分数低阶统计量的信号处理方法是抑制脉冲噪声干扰的有效技术手段<sup>[7,12]</sup>. 将分数低阶矩理论(FLOM)与循环统计量相结合,可以定义两种分数低阶循环统计量,  $p$  阶循环相关函数<sup>[13]</sup>

$$R_x^{\epsilon,p}(\tau) \triangleq \langle x(t + \tau/2) [x(t - \tau/2)]^{(p-1)} e^{-j2\pi\epsilon t} \rangle \quad (4)$$

和分数低阶循环相关函数

$$R_{xy}^{\epsilon,F}(\tau) \triangleq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} E \{ [x(t + \tau/2)]^{(a)} \cdot [x(t - \tau/2)]^{(b)} \} e^{-j2\pi\epsilon t} dt$$

$$\triangleq \langle [x(t + \tau/2)]^{(a)} [x(t - \tau/2)]^{(b)} e^{-j2\pi\epsilon t} \rangle \quad (5)$$

其中,  $1 < p < \alpha$ ,  $0 \leq a < \alpha/2$ ,  $0 \leq b < \alpha/2$ . 对于任意复随机变量  $z$ , 非线性运算  $z^{(k)}$  满足  $z^{(k)} = |z|^{k-1} z$  ( $0 \leq k \leq 2$ ), 用极坐标表示为  $(r e^{j\theta})^{(k)} = r^k e^{j\theta}$  ( $0 \leq k \leq 2$ ). 显然,与  $z$  相比  $z^{(k)}$  只是改变了  $z$  的幅度信息,而没有改变信号的周期,所以  $z^{(k)}$  与  $z$  具有相同的循环频率. 根据 FLOM 理论,当参数  $p$ ,  $a$  和  $b$  分别满足式(4)和(5)成立的条件时,有

$$E \{ x(t + \tau/2) [x(t - \tau/2)]^{(p-1)} \} < \infty$$

$$\text{和 } E \{ [x(t + \tau/2)]^{(a)} [x(t - \tau/2)]^{(b)} \} < \infty$$

因此,即使信号  $x(t)$  中含有 SoS 分布脉冲噪声,与二阶循环相关函数相比  $p$  阶循环相关函数和分数低阶循环相关函数仍然适用.

对比式(4)和(5)不难发现,在  $p$  阶循环相关函数定义中通过对信号  $x(t - \tau/2)$  做非线性运算抑制了其中的脉冲噪声. 然而,定义式(4)没有对信号  $x(t + \tau/2)$  做任何处理.  $x(t + \tau/2)$  中的脉冲成分没有得到抑制. 相反,在分数低阶循环相关函数的定义式(5)中,参加运算的信号  $x(t + \tau/2)$  和  $x(t - \tau/2)$  同时进行非线性运算,两个信号中的脉冲成分均得到了有效抑制. 因此,与二阶循环相关函数相比,  $p$  阶循环相关能够在一定程度上抑制脉冲噪声. 但是,在相同脉冲噪声条件下,分数低阶循环相关函数比  $p$  阶循环相关函数具有更强的噪声抑制能力.

## 3 时延与多普勒频移联合估计算法

传统循环模糊函数和  $p$  阶循环模糊函数不能有效地抑制脉冲噪声对信号的影响,具有一定的局限性. 为此,本文定义一种分数低阶循环模糊函数(FCCA),信号  $y(t)$  和  $x(t)$  的 FCCA 定义为

$$C_{yx}^{\epsilon,F}(\tau, f) \triangleq \int R_{yx}^{\epsilon+f,F}(u) [R_x^{\epsilon,F}(u - \tau)]^* e^{-j\pi f u} du \quad (6)$$

FCCA 利用分数低阶循环相关函数检测信号的循环平稳特性,可以提高循环模糊函数对脉冲噪声的抑制能力. 通常,循环平稳信号的循环频率不是唯一的,将多个单循环频率估计子等权相加可以显著提高估计子的性能<sup>[10]</sup>. 为了充分利用信号的谱相关信息克服单循环频率算法的缺陷,本文进一步将分数低阶循环模糊函数和多频率算法相结合. 定义多循环频率分数低阶循环模糊函数

$$C_{yx}^F(\tau, f) \triangleq \sum_{\epsilon \in A} w_i C_{yx}^{\epsilon,F}(\tau, f) \quad (7)$$

其中,  $A$  是信号  $s(t)$  的循环频率集合,满足  $\epsilon_i \in A$ ;  $w_i$  是权系数,且  $|w_i| = 1$ .

根据 FLOS 理论,对于服从 SaS 过程的随机变量  $\zeta$  和  $\eta$ ,其分数低阶矩  $E(\zeta\eta^{\langle k-1 \rangle}) = \langle \zeta, \eta \rangle_k$  具有以下性质<sup>[6]</sup>:(1)对于任意变量  $\zeta_1$  和  $\zeta_2$ ,  $\langle a_1\zeta_1 + a_2\zeta_2, \eta \rangle_k = a_1\langle \zeta_1, \eta \rangle_k + a_2\langle \zeta_2, \eta \rangle_k$ ; (2)如果  $\zeta$  和  $\eta$  独立,  $\langle \zeta, \eta \rangle_k = 0$ ; (3)对于任意变量  $\eta_1$  和  $\eta_2$ ,  $\langle \zeta, b_1\eta_1 + b_2\eta_2 \rangle_k = b_1^{\langle k-1 \rangle}\langle \zeta, \eta_1 \rangle_k + b_2^{\langle k-1 \rangle}\langle \zeta, \eta_2 \rangle_k$ . 利用分数低阶统计量的这些性质和信号间的独立条件

$$E\{[x(t+\tau/2)]^{\langle a \rangle}[x(t-\tau/2)]^{\langle b \rangle}\} = r_1^{\langle a \rangle} r_1^{\langle b \rangle} E\{[s(t+\tau/2)]^{\langle a \rangle}[s(t-\tau/2)]^{\langle b \rangle}\} + E\{[n(t+\tau/2)]^{\langle a \rangle}[n(t-\tau/2)]^{\langle b \rangle}\} \quad (8)$$

$$E\{[y(t+\tau/2)]^{\langle a \rangle}[x(t-\tau/2)]^{\langle b \rangle}\} = r_1^{\langle b \rangle} r_2^{\langle a \rangle} E\{[s(t-D+\tau/2)e^{j2\pi f_d(t+\tau/2)}]^{\langle a \rangle}[s(t-\tau/2)]^{\langle b \rangle}\} + r_2^{\langle a \rangle} E\{[m(t+\tau/2)]^{\langle a \rangle}[n(t-\tau/2)]^{\langle b \rangle}\} \quad (9)$$

将式(8)和(9)代入分数低阶循环相关定义式(5),由于干扰与 SOI 具有不同的循环频率,而噪声不具有循环平稳特性,所以

$$R_x^{\epsilon, F}(\tau) = r_1^{\langle a \rangle} r_1^{\langle b \rangle} R_s^{\epsilon, F}(\tau) \quad (10)$$

$$R_{yx}^{\epsilon, F}(\tau) = r_1^{\langle b \rangle} r_2^{\langle a \rangle} e^{j\pi f_d \tau} e^{-j\pi(\epsilon+f_d)D} R_s^{\epsilon, F}(\tau-D) \quad (11)$$

将式(10)和(11)的结果代入式(7),则

$$C_{yx}^F(\tau, f) = \sum_{\epsilon \in A} w_i \int r_1^{\langle b \rangle} r_2^{\langle a \rangle} e^{j\pi f u} e^{-j\pi(\epsilon+f-f_d)D} R_s^{\epsilon, F}(u-D) \times [r_1^{\langle a \rangle} r_1^{\langle b \rangle} R_s^{\epsilon, F}(u-\tau)]^* e^{-j\pi f u} du \quad (12)$$

利用 Schwarz 不等式,又  $|z^{\langle a \rangle}| = |z|^a$

$$|C_{yx}^F(\tau, f)| \leq |r_1|^{a+2b} |r_2|^a \sum_{\epsilon \in A} \left| \int |R_s^{\epsilon, F}(u)|^2 du \right| \quad (13)$$

当且仅当  $\tau = D, f = f_d$  时,式(13)中的等号成立.

在式(12)中,如果令  $\tau = D$  且  $f = f_d$

$$C_{yx}^F(D, f_d) = r_1^{\langle a \rangle} r_1^{\langle b \rangle} r_1^{\langle b \rangle} r_2^{\langle a \rangle} \sum_{\epsilon \in A} w_i e^{-j\pi \epsilon D} \int |R_s^{\epsilon, F}(u-D)|^2 du \quad (14)$$

显然,当  $w_i = e^{j\pi \epsilon D}$  时

$$|C_{yx}^F(D, f_d)| = |r_1|^{a+2b} |r_2|^a \sum_{\epsilon \in A} \int |R_s^{\epsilon, F}(u-D)|^2 du$$

$$= \max(|C_{yx}^F(\tau, f)|) \quad (15)$$

即当  $\tau = D, f = f_d$  且  $w_i = e^{j\pi \epsilon D}$  时,  $|C_{yx}^F(\tau, f)|$  取得极大值.因此,多循环频率 FCCA 算法时延与多普勒频移的估计式为

$$(\hat{D}, \hat{f}_d) = \arg \max_{\tau, f} \{|C_{yx}^F(\tau, f)|\} \quad (16)$$

对比观察式(3)~(6)不难发现,如果  $a = b = 1$ ,分数低阶循环模糊函数(FCCA)转化为二阶循环模糊函数(CCA)<sup>[9]</sup>;当  $a = 1$  且  $b = p - 1$  时, FCCA 退化为  $p$  阶循环相关函数(PCCA)<sup>[13]</sup>.因此,通过调整参数 FCCA 可以实现不同的功能,能够适应多种类型噪声( $\alpha$  稳定分布噪声、高斯噪声、脉冲与高斯混合噪声等)和干扰环境.实际应用中,为了提高算法的性能,可以首先估计背景噪声的特征指数  $\alpha$ ,根据噪声的统计特征选择参数  $a$  和  $b$ .此外,权系数  $w_i$  的值通常是未知的,可以将其初始值设为 1,然后根据估计结果进行迭代调整<sup>[11]</sup>.

## 4 仿真实验

本节我们通过计算机仿真实验来比较不同噪声和干扰环境下,基于多循环频率 CCA,基于 PCCA 和本文提出的基于多循环频率 FCCA 的时延与多普勒频移联合估计算法性能.信号  $s(t)$  是载波  $f_c = 0.25f_s$ , 键控率  $\epsilon_k = 0.0625f_s$  的 BPSK (Binary Phase Shift Keying) 信号.仿真中 Monte-Carlo 实验的次数为 1000.由于 SaS 分布( $\alpha < 2$ )没有有限的二阶矩,故本文使用广义信噪(GSNR, Generalized Signal-to-Noise Ratio) 作为脉冲噪声信噪比的度量,  $\text{GSNR} = 10 \log_{10}(\sigma_s^2/\gamma_n)$ ,  $\sigma_s^2$  为信号功率,  $\gamma_n$  是 SaS 噪声的分散系数.

### 4.1 循环模糊函数的仿真分析

信号  $s(t)$  的时延和多普勒频移分别为  $D = 20T_s$  和  $f_d = 50\text{Hz}$ .噪声是脉冲噪声( $\alpha = 1.8$ )和高斯噪声组成的混合噪声,高斯噪声信噪比和脉冲噪声广义信噪比均为 0dB.多循环频率算法使用的循环频率为 0,  $\epsilon_k$  和  $2\epsilon_k$ .图 1 为三种算法循环模糊函数的幅度图.图 1 的结果表明,虽然多循环频率 CCA 算法可以有效的抑制高斯噪

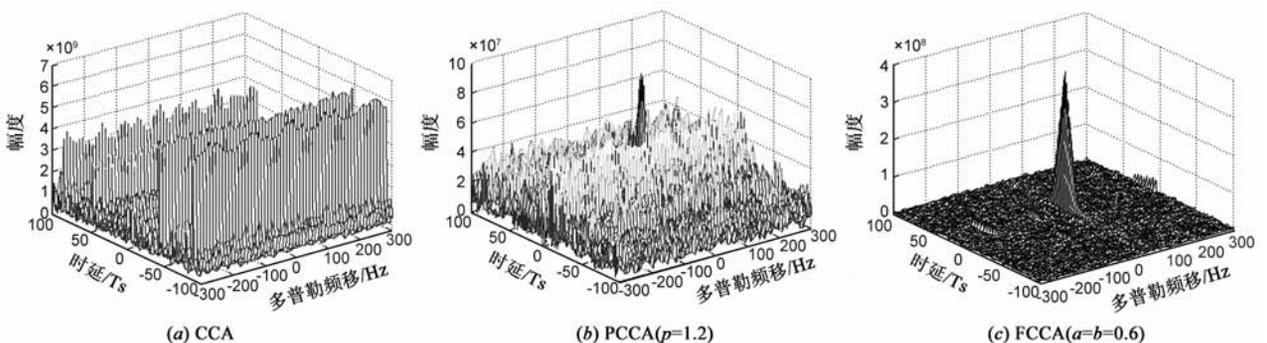


图1 SaS与高斯混合噪声条件下三种算法循环模糊函数的幅度图

声对信号的影响<sup>[9,11]</sup>,但是,在 S&S 和高斯混合噪声条件下该算法完全失效,无法分辨有效的峰值. PCCA 算法的估计效果要好于 CCA 算法,但是峰值受到明显的干扰. 三种方法中多循环频率 FCCA 对混合噪声的抑制效果是最好的,在  $\tau = 20T_s, f = 50\text{Hz}$  处峰值明显. 图 2 为高斯噪声信噪比为 0dB 条件下,多普勒频移估计精度随广义信噪比的变化情况. 仿真结果表明, FCCA 的性能要好于 CCA 和 PCCA 算法,是一种稳健的算法. 并且,三种算法多循环估计子的性能要好于相应单循环估计子,充分利用信号的循环平稳特性能够提高估计精度.

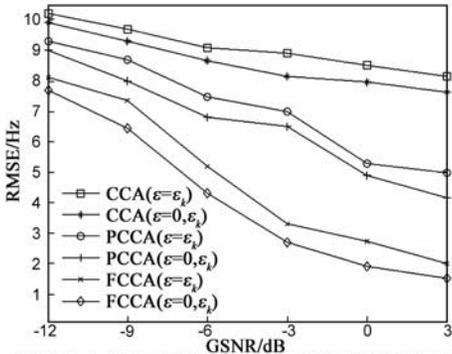


图 2 混合噪声背景下不同算法多普勒频移估计性能比较

### 4.2 多普勒频移估计的仿真分析

信号  $s(t)$  的多普勒频移  $f_d = 20\text{Hz}$ , 时延值为 0. 干扰信号是与  $s(t)$  载波相同, 带宽为  $B = 0.1875f_s$  的 AM (Amplitude Modulation) 信号, 多普勒频移为  $f_{d_i} = 30\text{Hz}$ , 图 3~4 是相应算法在  $\alpha$  为 2 和 1.2, 信干比和广义信噪比

均为 0dB 条件下独立 10 次试验的多普勒频移估计结果. 由图 3~4 的结果可知, 在高斯噪声 ( $\alpha = 2$ ) 条件下, 三种算法均能得到准确的估计结果, 并且多循环频率 CCA 算法略好于其他两种方法. 但是, 在  $\alpha = 1.2$  这一较强脉冲噪声条件下, 多循环频率 CCA 和 PCCA 算法性能退化严重, 不能准确的估计出多普勒频移. 本文提出的多循环 FCCA 算法明显好于对比的另外两种算法, 很好地抑制了脉冲噪声影响, 在较强脉冲噪声环境中仍然能够得到准确的估计结果.

### 4.3 时间延迟估计的仿真分析

实验 1 信号  $s(t)$  的时延  $D = 48T_s$ , 多普勒频移为 0. 干扰信号由五个具有不同载波和带宽的 AM 信号组成<sup>[11]</sup>, 载波分别为  $f_1 = 0.156f_s, f_2 = 0.203f_s, f_3 = 0.266f_s, f_4 = 0.313f_s, f_5 = 0.375f_s$ ; 带宽为  $B_1 = 0.04f_s, B_2 = 0.05f_s, B_3 = 0.045f_s, B_4 = 0.04f_s, B_5 = 0.08f_s$ ; 相应的时延为  $\tau_1 = 28T_s, \tau_2 = 68T_s, \tau_3 = 78T_s, \tau_4 = 38T_s, \tau_5 = 58T_s$ . 干扰信号的信干比均为 0dB, 脉冲噪声的特征指数为  $\alpha = 1.8$ , 广义信噪比为 0dB. 图 5 是本文提出的多循环频率 FCCA 算法利用不同循环频率的时延估计结果. 循环频率为  $\epsilon_k$  时, FCCA 算法在  $\tau = 46T_s$  和  $\tau = 48T_s$  出现了两个无法分辨的峰值. 循环频率为  $2f_c$  时, FCCA 算法虽然得到了正确的估计结果, 但是峰值并不十分明显. 三循环频率 FCCA 算法估计效果好于两个单循环频率算法, 在  $\tau = 48T_s$  具有明显的峰值, 得到了准确的时延估计结果.

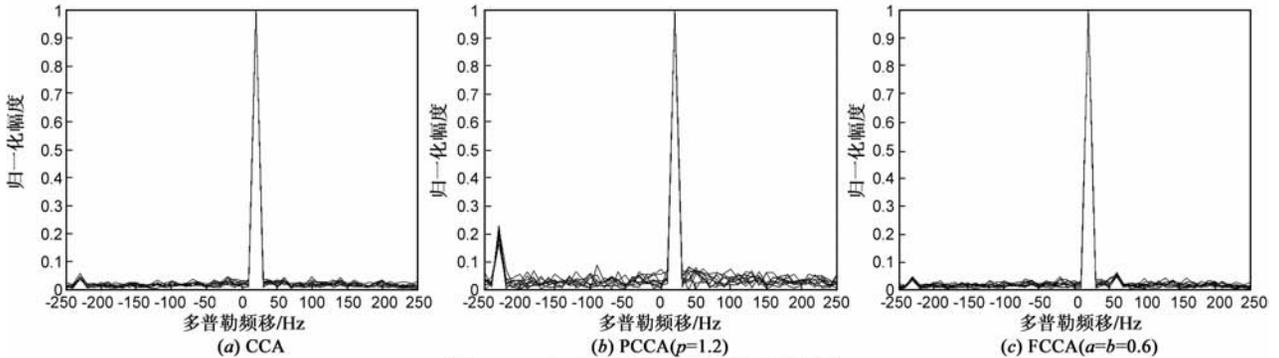


图 3  $\alpha=2$  时不同算法多普勒频移估计结果

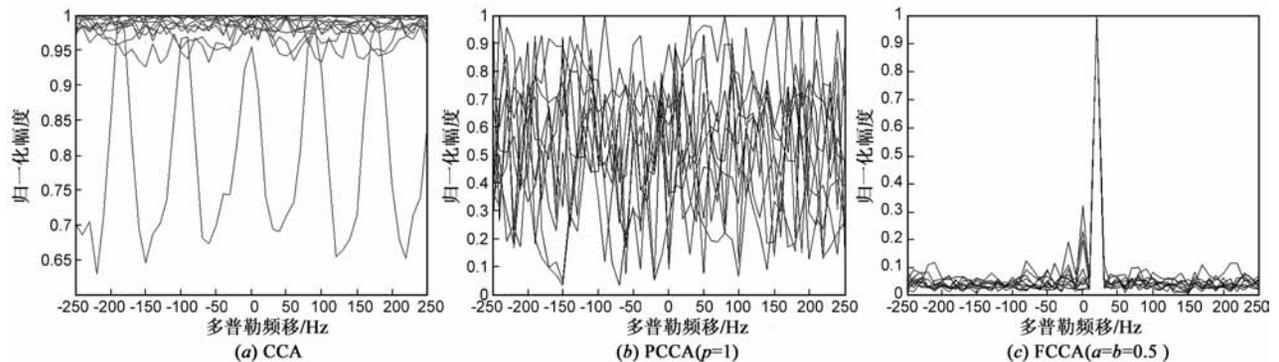


图 4  $\alpha=1.2$  时不同算法多普勒频移估计结果

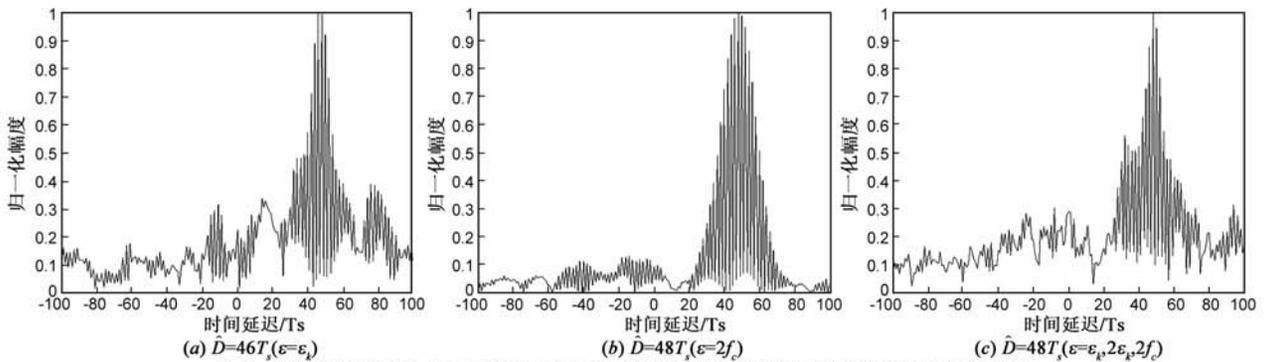


图5 脉冲噪声和多个AM干扰信号条件下基于不同循环频率FCCA算法的时延估计结果

**实验 2** 干扰信号是载波  $f_1 = 0.21875f_s$ , 键控率  $\epsilon_1 = 0.1f_s$ , 时延  $\tau_1 = 58T_s$  的 BPSK 信号. 图 6 给出了  $\alpha = 1.5$  和  $\alpha = 1.7$  两种条件下, 不同算法的时延估计均方误差随广义信噪比的变化关系. 从图 6 可以看出, SaS 噪声的脉冲强度是影响参数估计精度的一个重要因素. 在相同广义信噪比条件下, 不同算法在  $\alpha = 1.7$  的估计结果均好于  $\alpha = 1.5$  时的结果. 在相同  $\alpha$  条件下, FCCA 算法估计性能优于 CCA 和 PCCA 算法, 而 PCCA 算法优于 CCA. 并且, 基于双循环频率 FCCA 算法估计性能好于相应单循环频率算法, 而三循环频率 FCCA 的性能优于双循环频率 FCCA. 因此, 多循环频率估计子提高了算法对脉冲噪声和干扰信号的抑制能力.

### 5 结论

本文提出了一种基于分数低阶循环模糊函数的多循环频率时延与多普勒频移联合估计方法. 首先分析了二阶循环相关函数,  $p$  阶循环相关函数和分数低阶循环相关函数的特点. 然后, 定义了分数低阶循环模糊函数, 提高了循环模糊函数抑制脉冲噪声能力. 进一步将单循环频率分数低阶循环模糊函数等权相加, 提出了多循环频率分数低阶时延与多普勒频移联合估计算法. 该方法充分利用了信号的循环频率特征信息和分数低阶循环相关函数的优点, 能够较好地抑制干扰信号和脉冲噪声对参数估计的影响. 仿真结果表明, 本文提出的方法在不同干扰和噪声环境下均能稳定工作, 对脉冲噪声和干扰信号的抑制效果明显好于原有算法, 是一种韧性的时延与多普勒频移估计算法.

### 参考文献

- [1] Ho K C, Lu X N, Kovavisaruch L. Source location using TDOA and FDOA measurements in the presence of receiver location errors: Analysis and solution[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(2): 684 – 696.
- [2] Ulman R J, Gerantiotis E. Motion detection using TDOA and FDOA measurements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(2): 759 – 764.
- [3] Seymour S. Algorithms for ambiguity function processing[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1981, 29(3): 588 – 599.
- [4] Yao G X, Liu Z W, Xu Y G. TDOA/FDOA joint estimation in a correlated noise environment[A]. IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Proceedings [C]. Beijing: Chinese Institute of Electronics, 2005. 831 – 834.
- [5] Shin D C, Nikias C L. Estimation of frequency-delay of arrival (FDOA) using fourth-order statistics in unknown correlated Gaussian noise source[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(10): 2771 – 2780.

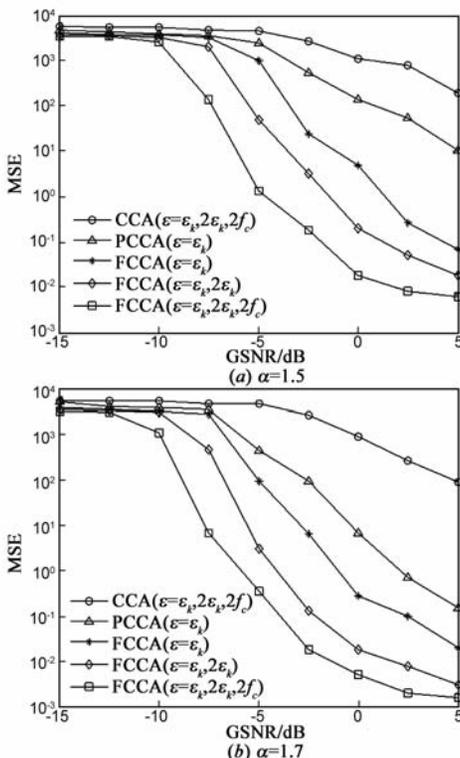


图6 不同算法时延估计均方误差统计随广义信噪比变化

- [6] Tsihrintzis G A, Tureli U, Nikias C L. Fractional lower-order statistics-based ambiguity functions for differential delay Doppler estimation [J]. IEE Proceedings, Radar, Sonar and Navigator, 1996, 143(6): 358 - 365.
- [7] Ma X Y, 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.
- [8] Gardner W A, Napolitano A, Paura L. Cyclostationarity: Half a century of research[J]. Signal Processing, 2006, 86(4): 639 - 697.
- [9] Huang Z T, Zhou Y Y, Jiang W L. Joint estimation of Doppler and time-difference-of-arrival exploiting cyclostationary property[J]. IEE Proceedings, Part F: Radar and Signal Processing, 2002, 149(4): 161 - 165.
- [10] 黄知涛, 姜文利, 周一宇. 多循环频率时延估计方法及性能分析[J]. 电子学报, 2004, 32(1): 102 - 108.  
Huang Z T, Jiang W L, Zhou Y Y. Multi-cycle time-delay estimator and its performance analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(1): 102 - 108. (in Chinese)
- [11] Huang Z T, Zhou Y Y, Jiang W L. TDOA and Doppler estimation for cyclostationary signals based on multi-cycle frequencies[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(4): 1251 - 1264.
- [12] 何劲, 刘中. 脉冲噪声环境中鲁棒的自适应波束形成方法[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 464 - 468.  
He J, Liu Z. Robust adaptive beamforming method in impul-

sive noise[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3): 464 - 468. (in Chinese)

- [13] 郭莹, 邱天爽, 张艳丽. 脉冲噪声环境下一种韧性的时延与多普勒频移联合估计法[J]. 电子学报, 2007, 35(9): 1680 - 1684.  
Guo Y, Qiu T Z, Zhang Y L. A robust joint estimation of time delay and Doppler shift in stable distributed noise environment [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(9): 1680 - 1684. (in Chinese)

#### 作者简介



刘洋 1981年2月出生于内蒙古通辽。讲师, 现为大连理工大学在读博士研究生。研究方向为通信信号处理、非平稳非高斯信号处理。  
E-mail: yangliuimu@gmail.com



邱天爽 男, 1954年生于江苏海门。IEEE会员, 信号处理学会委员, 现为大连理工大学教授、博士生导师。主要研究方向为非平稳非高斯信号处理、生物医学信号处理。曾获教育部中国高校科学技术二等奖等多项科技奖励。  
E-mail: qitush@dut.edu.cn

(上接第 2310 页)

- [3] 刘剑锋. 目标与地物光散射特性的 BRDF 模化技术[R]. 西安: 西安电子科技大学硕士学位论文, 2005.
- [4] 曹运华, 吴振森, 张涵璐, 等. 基于粗糙样片光谱 BRDF 的空间目标可见光散射研究[J]. 光子学报, 2008, 37(11): 2264 - 2268.
- [5] 陈荣利, 韩乐, 车驰骋, 等. 非自发光空间目标的可见光探测技术研究[J]. 光子学报, 2005, 34(9): 1438 - 1440.
- [6] Shen Y. J, Zhang Z. M, Tsai B. K, et al. Bidirectional reflectance distribution function of rough silicon wafers [J]. International Journal Thermophysics, 2001, 22(4): 1311 - 1326.
- [7] Nicodemus F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity[J]. Applied Optics, 1970, 9(6): 1474 - 1475.
- [8] 王安祥, 张涵璐, 吴振森, 等. 目标表面可见光谱 BRDF 的实验测量及优化建模[J]. 光学技术, 2008, 34(5): 1002 - 1582.
- [9] Richard G P, Thomas A G. Polarimetric BRDF in the micro-

facet model: theory and measurements [A]. Proceedings of the 2000 Meeting of the Military Sensing Symposia Specialty Group on Passive Sensors[C], 2000, 1: 169 - 181.

- [10] 冯巍巍, 魏庆农, 汪世美, 等. 涂层表面偏振双向反射分布函数的模型研究[J]. 光学学报, 2008, 28(2): 290 - 294.
- [11] David S. F, Cliff A. Polarized surface scattering expressed in terms of a bidirectional reflectance distribution function matrix [J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1995, 34(6): 1646 - 1650.
- [12] Dan D. V, B, Thomas B. Modeling earth albedo for satellite in earth orbit[R]. AIAA 2005 - 6465, 2005.
- [13] Cunningham F. G. Power input to a small flat plate from a diffusely radiation sphere with application to earth satellites [R], TN D - 710, NASA, 1970.
- [14] 吴佳泽, 郑昌文, 胡晓惠, 等. 散景效果的真实感绘制[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(5): 746 - 752.