

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

郭 莹,邱天爽,张艳丽

(大连理工大学电子与信息工程学院,辽宁大连 116024)

摘要: 由于 稳定分布噪声会降低基于二阶循环统计量的传统方法的性能,本文基于分数低阶统计量理论提出 p 阶循环相关的概念并给出相应性质及证明,在此基础上对已有的循环模糊函数进行了广义化. 计算机仿真表明,这种广义的循环模糊函数能够在高斯和 稳定分布噪声条件下有效地联合估计时延和多普勒频移,其性能不仅优于基于二阶循环相关的 CCA(循环模糊函数)法,也优于 FLOAF(分数低阶模糊函数)法,是韧性的、具有更广泛应用意义的方法.

关键词: 对称 稳定分布; 多普勒频移; 分数低阶统计量; 模糊函数

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 09-1680-05

A Robust Joint Estimation of Time Delay and Doppler Shift in Stable Distributed Noise Environment

GUO Ying, QIU Tian-shuang, ZHANG Yan-li

(School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Cyclostationarity is an important statistical property of many signals, which has just been considered so far under Gaussian noise. In this paper, the degradation of the cyclic property is evaluated in the presence of stable distributed noises. A novel definition of the p th order cyclic correlation is proposed and the cyclic ambiguity function referred to as PCCA (p th order Cyclic Cross-Ambiguity) is developed. Simulation results demonstrate the efficiency of the proposed method in the joint estimation of time delay and Doppler shift under stable and Gaussian noise condition. It is a more robust and significant method and its performance is superior to CCA (Cyclic Cross-Ambiguity) and FLOAF (Fractional Lower Order Ambiguity Function).

Key words: S S; Doppler shift; fractional lower order moments; ambiguity function

1 引言

在通信、遥测、雷达和声纳系统中,许多信号都是一类特殊的非平稳信号,它们的平稳特性表现为循环平稳性,即其二阶或高阶统计量呈现周期性. 继 Gardner 提出谱相关理论后,循环平稳信号的分析和处理已经在许多领域中获得了广泛的应用^[1~5],包括时延估计、信号检测、系统辨识等. 但是长期以来囿于理论发展的限制,这些方法都局限于高斯噪声假设. 而现实世界的许多随机噪声,如某些无线电信道噪声、城区环境噪声、大气噪声等都存在显著的尖峰,难以用高斯分布建模,因此有必要选择一种更适当的模型进行描述. 自 1925 年 Levy 提出稳定分布概念以来,理论和实验都证明它是一种更具普遍性的噪声模型,可以描述各种不同脉冲程度的噪声^[6]. 但值得注意的是,稳定分布的二阶矩和高阶矩是不存在的,而 Gardner 等人提出的循环相关的概念实质正是一种二阶或高阶的统计运算,因此 稳定分布噪声条件下

的基于传统循环相关函数的方法必然会退化甚至失效.

时延估计是通信、目标定位等许多系统中的一个重要问题,也是循环信号处理中一个重要的实际应用,许多循环时延估计方法因感兴趣信号(SOI)与干扰信号和噪声具有不同的循环频率而具有很好的信号选择性,可以有效地抑制干扰和噪声对估计参数的影响. 许多学者提出的方法都假设时延在观测时间内是恒定不变的,但是实际应用中反射源与接收信号的传感器之间的相对运动往往不能忽略,这种相对运动所带来的时延变化对于窄带系统可以等效为多普勒频移. Huang 等人研究了多普勒频移给循环相关函数带来的影响,指出信号之间的这种频差会引起循环频率的改变,无法使用循环相关函数和循环谱来抑制干扰和噪声,他提出了循环模糊函数(CCA: Cyclic Cross-Ambiguity)的概念^[7]. 但是这个概念仍是在高斯噪声假设下提出的,而没有考虑脉冲噪声的影响. 本文采用 稳定分布作为背景噪声模型,结合分

数低阶统计量理论提出 p 阶循环相关函数并给出了相应性质及证明,然后将其与循环模糊函数结合,广义化了 Huang 等人的 CCA. 仿真表明,本文的时延和多普勒频移联合估计算法优于分数低阶模糊函数 (HLOAF) 方法^[8,9]和基于二阶循环相关的循环模糊函数法.

2 信号噪声模型

设 $s(t)$ 是感兴趣信号 (SOI), 传感器接收到的信号分别为

$$x(t) = s(t) + w_1(t) \quad (1)$$

$$y(t) = s(t - D)e^{-j2\pi f_d t} + w_2(t) \quad (2)$$

其中, D 和 f_d 分别是回波信号相对于参考信号的时间延迟和多普勒频移. 为讨论方便,假设 $w_1(t)$ 、 $w_2(t)$ 是加性 p 阶平稳的 SS 噪声信号.

SS 是对称的稳定分布,它具有两个极为重要的特性. (1) 广义中心极限定理:如果独立同分布的随机变量和的极限存在,那么这个和的极限是一个 SS . (2) 稳定性:独立同分布的 SS 变量的线性组合仍然是 SS 的. 在一般情况下, SS 的概率密度函数不存在封闭表达式,通常用其特征函数来描述:

$$\phi(\omega) = e^{-|\omega|^\alpha} \quad (3)$$

其中, α 为特征指数 ($0 < \alpha < 2$), 控制着随机过程的脉冲程度, α 愈小脉冲性愈强; σ 为分散系数,表征稳定分布随机变量可能取值的离散程度,类似于高斯分布的方差. 高斯分布 ($\alpha = 2$), 柯西分布 ($\alpha = 1$) 以及皮尔逊 (Pearson) 分布 ($\alpha = 1/2$) 都是 SS 中的一些特例,也是具有闭合概率密度函数表达形式的有限几种稳定分布. 本文后面的讨论,都是针对 $0 < \alpha < 2$ 的 SS 进行的. $0 < \alpha < 2$ 的 SS 称为低阶稳定分布,它与高斯分布的主要区别是: (1) SS 某些时刻的样本值远远地高出其均值. (2) 该分布不具有 p 及以上各阶统计量,正是这个原因使得传统的基于高斯噪声假设的许多算法失效. 分数低阶统计量 (HLOS) 理论是研究稳定分布的有力工具,可以借助其进行脉冲噪声环境下的各种算法研究.

3 p 阶循环函数及时延和多普勒频移的联合估计

3.1 p 阶循环函数

循环平稳信号 $s(t)$ 在感兴趣的时间区间 $[-T, T]$ 上的循环自相关函数的定义为:

$$R_s(\tau) = \lim_T \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t + \tau/2) s^*(t - \tau/2) e^{-j2\pi f \tau} dt \quad (4)$$

是循环频率 (为与稳定分布中的特征指数 α 相区别,本文用 f 表示循环频率).

对于时间有限信号,可以去掉式 (4) 的极限运算,用下式进行估计:

$$R_s(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t + \tau/2) s^*(t - \tau/2) e^{-j2\pi f \tau} dt \quad (5)$$

若信号 $s(t)$ 被与其独立的分数低阶 SS 噪声污染,即 $x(t) = s(t) + n(t)$, 那么

$$\begin{aligned} E(R_x(\tau)) &= E\left\{ \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-j2\pi f \tau} dt \right\} \\ &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} E[x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2)] e^{-j2\pi f \tau} dt \\ &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} E[s(t + \tau/2) s^*(t - \tau/2)] e^{-j2\pi f \tau} dt \\ &\quad + \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} E[n(t + \tau/2) n^*(t - \tau/2)] e^{-j2\pi f \tau} dt \end{aligned} \quad (6)$$

由于分数低阶 SS 过程不具有 p 阶及以上各阶统计量^[7], 即 $E[n(t + \tau/2) n^*(t - \tau/2)] = 0$, 故

$$E(R_x(\tau)) = R_s(\tau)$$

也就是说,当 SOI 中混有 $\alpha < 2$ 的 SS 噪声时,传统的二阶循环相关方法不再适用,因此很有必要对带噪声信号的脉冲性进行抑制. 结合 FLOM 理论^[7-9], 本文给出 p 阶循环相关的估计式:

$$R_{x,p}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t + \tau/2) [x^*(t - \tau/2)]^{p-1} e^{-j2\pi f \tau} dt, \quad 1 < p < \infty \quad (7)$$

当 $p=2$ 时, p 阶循环相关退化为二阶循环相关,即二阶循环相关是 p 阶循环相关的特例. 根据 FLOM 理论的性质很容易验证 $E(R_{x,p}(\tau))$ 有限.

性质 对于无噪信号 $x(t)$ 及其任一延迟信号 $x(t) = x(t - D)$, 有:

$$R_{x,p}(\tau) = R_{x,p}(\tau) e^{-j2\pi f D} \quad (8)$$

$$R_{x,p}(\tau) = R_{x,p}(\tau - D) e^{-j2\pi f D} \quad (9)$$

证明 (1) 设 $t = t - D$, 则 $t = t + D$, 故:

$$\begin{aligned} R_{x,p}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t + \tau/2 - D) [x^*(t - \tau/2 - D)]^{p-1} e^{-j2\pi f \tau} dt \\ &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t + \tau/2) [x^*(t - \tau/2)]^{p-1} e^{-j2\pi f (\tau + D)} dt \\ &= R_{x,p}(\tau) e^{-j2\pi f D} \end{aligned}$$

(2) 设 $t = t - D/2$, 则 $t = t + D/2$, 故:

$$\begin{aligned} R_{x,p}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x[t - D/2 + (\tau - D)/2] [x^*(t - \tau/2)]^{p-1} e^{-j2\pi f \tau} dt \\ &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^*[t + (\tau - D)/2] [x(t - (\tau - D)/2)]^{p-1} e^{-j2\pi f (\tau + D/2)} dt \\ &= R_{x,p}(\tau - D) e^{-j2\pi f D} \end{aligned}$$

证毕.

3.2 p 阶循环模糊函数

模糊函数是解决时延与多普勒频移联合估计的主

要手段.基本方法是将一路信号进行频移后与另一路信号进行相关,是一种二阶统计运算.其解决脉冲噪声或周期干扰条件下的时延估计问题的能力是有限的.Ma 等人^[8,9]提出了分数低阶模糊函数(FLOAF)的方法,其基本思想是用 FLOM 理论对传统的二阶模糊函数进行广义化,以达到抑制脉冲噪声,准确估值的目的,该法不能抑制周期干扰.Huang 等人提出了循环模糊函数(CCA)的概念,该法能够在高斯噪声和周期干扰下,给出准确估值,但没有考虑脉冲噪声的影响.分数低阶模糊函数 $A_{x_1x_2}^{(p)}$ 和循环模糊函数 $C_{yx}(u, f)$ 的定义分别为:

$$A_{x_1x_2}^{(p)} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_1(t + \tau/2) x_2(t - \tau/2)^{p-1} e^{j2f\tau} d\tau \quad (10)$$

$$C_{yx}(u, f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau + u) [R_{yx}^*(\tau - u)]^* e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (11)$$

本文结合前面定义的 p 阶循环相关,将脉冲噪声和周期干扰同时考虑,给出 p 阶循环模糊函数(PCCA)的定义式:

$$C_{yx,p}(u, f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{x,p}(\tau + u) [R_{yx,p}^*(\tau - u)]^* e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (12)$$

它是对传统的 CCA 算法的广义化,当 $p=2$ 时,PCCA 退化为 CCA,即 CCA 是 PCCA 的一个特例.可以看成是将信号 $y(t)$ 频移 $-f$ 后与 $x(t)$ 做 p 阶循环相关,然后再与 $x(t)$ 的 p 阶循环相关作相关运算.在同时存在脉冲噪声和周期干扰时的时延 D 和多普勒频移 f_d 可由下式得到:

$$(\hat{D}, \hat{f}_d) = \arg \max_{u, f} |C_{yx,p}(u, f)| \quad (13)$$

4 仿真实验

本文使用“广义信噪比”(GSNR, Generalized Signal-to-Noise Ratio)来描述 S S 过程的信噪比^[6]: $GSNR = 10 \log_{10}(\frac{2}{\sigma_s^2})$, ($\sigma_s^2 > 0$) 表示 S S 噪声的分散系数, $\frac{2}{\sigma_s^2}$ 表示信号功率. SOI 为载波 $f_c = 0.5f_s$, 波特率 $a_d = 0.2f_s$ 的 BPSK, 循环频率选为 $\omega_c = a_d$, 归一化时延真值为 16. PCCA 算法中 $p = 1.2$.

实验 1 S S 噪声($\sigma_s^2 = 1.5$)条件下 PCCA 与 CCA 算

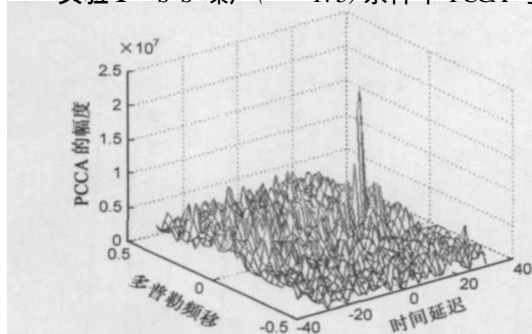


图 1 S S 噪声条件的 PCCA 的三维图

法的比较.

多普勒频移为 $0.03125f_s$, GSNR 为 0dB. 从图 1 ~ 4 可以看到,基于二阶循环相关的 CCA 算法失效了,不能准确地估计出多普勒频移和时延,而 PCCA 法却性能好.

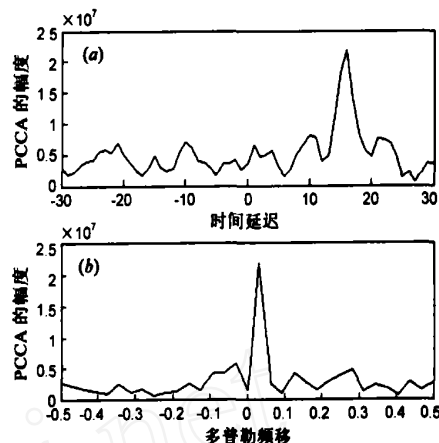


图 2 S S 噪声条件下, (a) $f=0.03125f_s$ 时, PCCA 的时间轴截面; (b) $D=16T_s$, PCCA 的循环频率轴截面

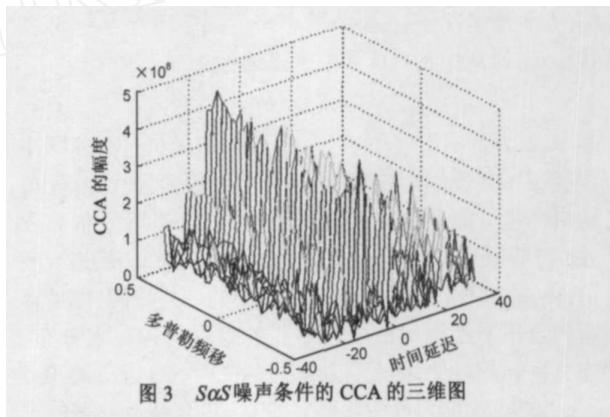


图 3 S S 噪声条件的 CCA 的三维图

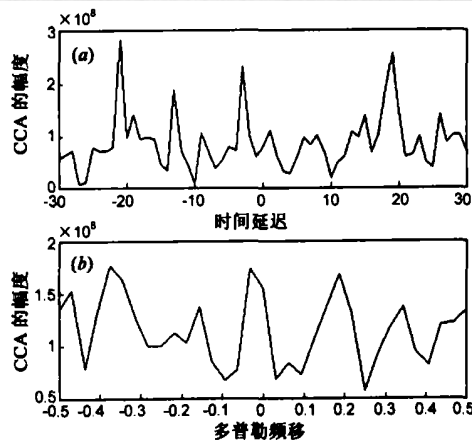


图 4 S S 噪声条件下, (a) $f=0.03125f_s$ 时, CCA 的时间轴截面; (b) $D=16T_s$ 时, CCA 的循环频率轴截面

实验 2 高斯噪声($\sigma_s^2 = 2$)条件下 PCCA 与 CCA 算法的比较.

其他实验条件同实验 1. 从图 5 ~ 8 可知,高斯噪声下,二种算法都能给出准确的估值.

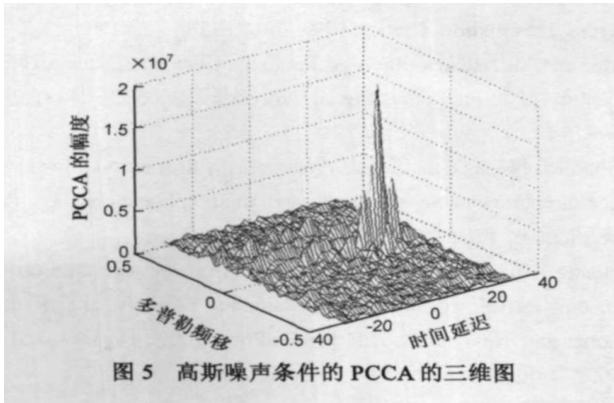


图 5 高斯噪声条件的 PCCA 的三维图

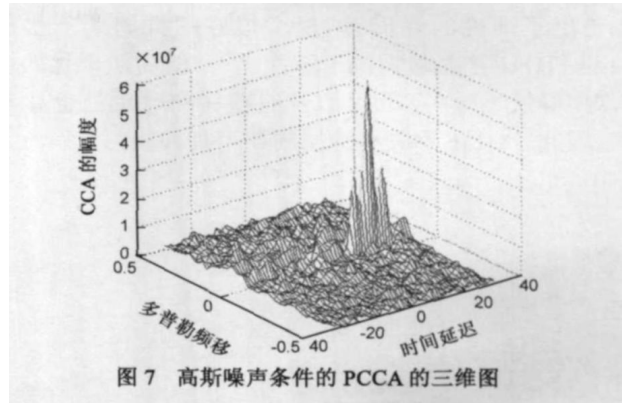


图 7 高斯噪声条件的 PCCA 的三维图

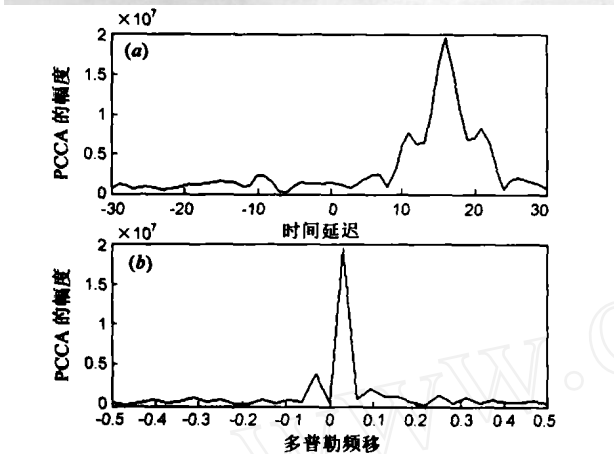


图 6 高斯噪声条件下, (a) $f=0.03125f_s$ 时, PCCA 的时间轴截面; (b) $D=16T$ 时, PCCA 的循环频率轴截面

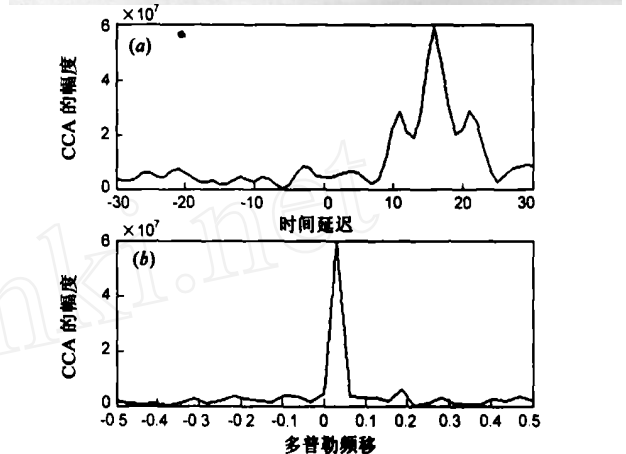


图 8 高斯噪声条件下, (a) $f=0.03125f_s$ 时, CCA 的时间轴截面; (b) $D=16T$ 时, CCA 的循环频率轴截面

实验 3 S/S 噪声 ($S=1.5$) 条件下, 本文的 PCCA 算法与 FLOAF (分数低阶模糊函数) 的比较.

本实验的目的在于说明与 FLOAF 法相比, 本文的 PCCA 算法具有很好的抗周期干扰能力. 为便于观察, 设多普勒频移为 $0.3125f_s$ 、干扰信号也为 BPSK, 其载频 $f_{c_2} = f_{c_1}$, 波特率 $a_{d_2} = 0.0625f_s$, 信干比为 0dB, 干扰时延为 10, 其他条件与实验 1、2 均相同. 图 9、10 和图 11、12 分别示出了无周期干扰和有周期干扰情形下两种算法的比较. 由图 9、10 可以看到, 不存在周期干扰时这两算法都可以抑制脉冲噪声, 得到准确的多普勒频移和时延估值, 但当周期干扰存在时 (如图 11、12 所示), PCCA

方法不仅抑制了脉冲噪声, 而且消除了周期干扰的影响

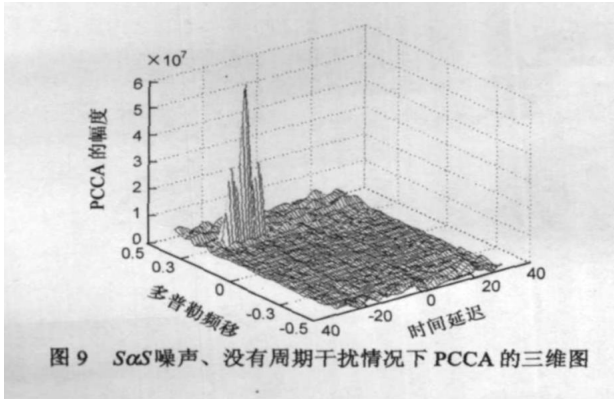


图 9 SaS 噪声、没有周期干扰情况下 PCCA 的三维图

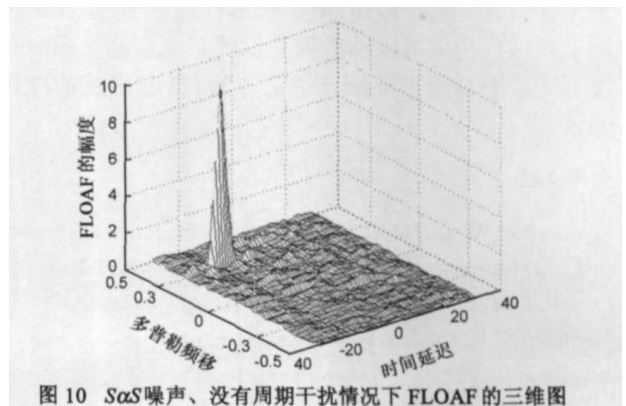


图 10 SaS 噪声、没有周期干扰情况下 FLOAF 的三维图

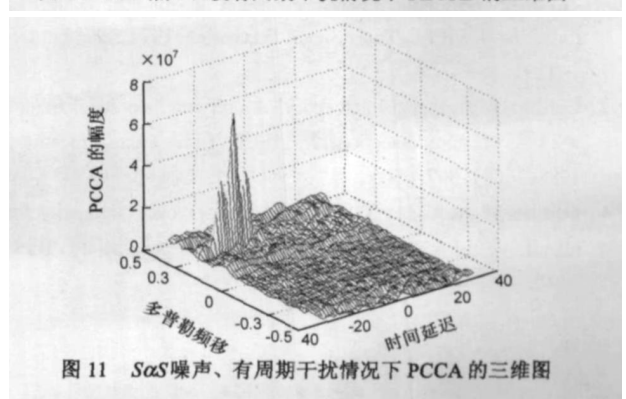


图 11 SaS 噪声、有周期干扰情况下 PCCA 的三维图

响,给出了准确的峰值,显现了很好的抗周期干扰能力;而 FLOAF 法虽然抑制了脉冲噪声,但周期干扰的存在却使峰值不唯一(干扰信号的频移和时延处也存在峰).因此,FLOAF 不具有抑制周期干扰的能力.

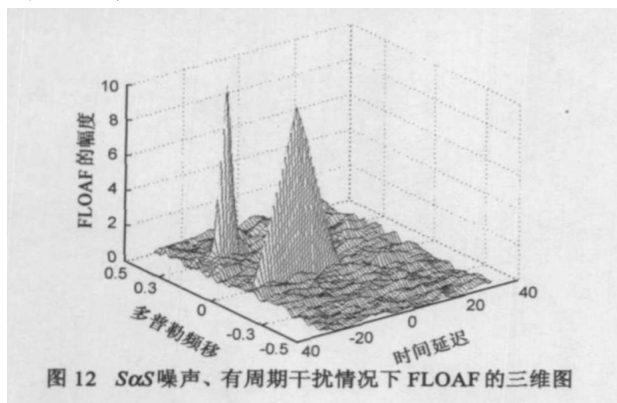


图 12 $S\alpha S$ 噪声、有周期干扰情况下 FLOAF 的三维图

5 结论

循环统计量是一种研究具有循环平稳特性的非平稳随机信号的有效工具.本文以 稳定分布作为噪声模型,考虑了非高斯噪声对传统的二阶循环统计量的影响,结合分数低阶统计量给出了 p 阶循环相关的定义及相应的性质、证明,并基于新定义广义化了已有的循环模糊函数,仿真实验表明本文提出的这种新的函数方法可以有效消除 稳定分布噪声对参数估计的影响,同时适用于 稳定分布和高斯分布噪声下的时延和多普勒频移联合估计,是一种韧性的方法.本文提出的 p 阶循环相关可以推广到其他的 稳定分布噪声环境下的基于二阶循环统计量的算法,具有广泛的应用前景.

参考文献:

- [1] Gardner W A, Chen C K. Interference tolerant timed difference of arrival estimation for modulated signals[J]. IEEE Trans ASSP, 1988, 36(9): 1358 - 1395.
- [2] Chen C K, Gardner W A. Signal-selective time-difference-of-arrival estimation for passive location man-made signal sources in highly corruptive environments, part 1: algorithms and performance[J]. IEEE Trans Signal Processing, 1992, 40(5): 1185 - 1197.
- [3] Gardner W A. Signal Interception: A unifying theoretical framework for feature detection[J]. IEEE Trans Communication, 1988, 36(8): 897 - 906.
- [4] Gardner W A, Archer T L. Exploitation for cyclostationarity for identifying the volterra kernels of nonlinear system[J]. IEEE Trans Information Theory, 1993, 39(2): 538 - 542.
- [5] Gardner W A, Napolitano A, Paura L. Cyclostationarity: Half a century of research[J]. Signal Processing, 2006, 86(4): 639 - 697.
- [6] Shao M, Nikias C L. Signal Processing with fractional lower order moments: stable processes and their applications[J]. Proceedings of IEEE, 1993, 81(7): 986 - 1010.
- [7] Huang Z T, et al. Joint estimation of Doppler and time-difference-of-arrival exploiting cyclostationary property[J]. Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings, 2002, 149(4): 161 - 165.
- [8] Ma X, Nikias C L. Joint estimation of time delay and frequency delay in impulsive noise using fractional lower order statistics[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1996, 44(11): 2669 - 2687.
- [9] 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 navigation, 1996, 143(6): 358 - 365.

作者简介:



郭莹女, 1975 年生于辽宁铁岭, 大连理工大学博士生. 主要研究方向为非高斯信号处理. E-mail: lovelygy2002@yahoo.com.cn



邱天爽男, 1954 年生于江苏海门, 博士, 大连理工大学电子与信息工程学院教授, 博士生导师, IEEE 会员, 信号处理学会委员. 主要研究方向为数字信号处理理论、生物医学信号处理、非平稳与非高斯信号处理等. E-mail: qqtsh@dlut.edu.cn



张艳丽女, 1981 年生于辽宁大连, 大连理工大学硕士研究生. 主要研究方向非高斯信号处理. E-mail: gigizinc@163.com