

# 基于循环相关熵谱的时频混叠信号载波频率估计方法

邱天爽<sup>1</sup>, 陈兴<sup>1</sup>, 马济通<sup>1</sup>, 李景春<sup>2</sup>, 李蓉<sup>2</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. 国家无线电监测中心, 北京 100037)

**摘 要:** 针对 Alpha 稳定分布噪声环境下时频混叠 BPSK 信号载频估计的性能退化问题, 提出了基于循环相关熵谱的时频混叠 BPSK 信号载频估计方法, 推导了 BPSK 信号在 0 频率处循环相关熵谱幅度切面上循环频率与载波频率之间的关系, 并将此关系应用于载波频率估计中。这种基于循环相关熵谱载频估计方法, 能够抑制脉冲噪声的影响, 具有较好的估计性能, 仿真实验证明了算法的有效性与顽健性。

**关键词:** Alpha 稳定分布; 循环相关熵; 时频混叠; 载频估计

**中图分类号:** TN911.7

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2018091

## Carrier frequency estimation method of time-frequency overlapped signals based on cyclic correntropy spectrum

QIU Tianshuang<sup>1</sup>, CHEN Xing<sup>1</sup>, MA Jitong<sup>1</sup>, LI Jingchun<sup>2</sup>, LI Rong<sup>2</sup>

1. Faculty of EIEE, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

2. The State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China

**Abstract:** According to the performance degradation problem of the carrier frequency estimation method of time-frequency overlapped BPSK signals in Alpha-stable distribution noise, a novel carrier frequency estimation algorithm of the time-frequency overlapped BPSK signals based on the cyclic correntropy spectrum was proposed. The relationship between cyclic frequency and carrier frequency on the zero frequency section of the cyclic correntropy spectrum was deduced, which could be utilized for carrier frequency estimation. The proposed method can suppress the impulse noise and has better estimation performance than that of the contrastive methods. Simulation results are presented to demonstrate the effectiveness and robustness of the proposed method.

**Key words:** Alpha-stable distribution, cyclic correntropy, time-frequency overlapped, carrier frequency estimation

### 1 引言

随着通信技术的发展, 复杂电磁环境中信号的时频混叠现象越来越严重, 如邻近卫星之间的邻星信号干扰、相邻基站之间的同频干扰, 这类信号极大地影响了系统的性能, 也导致基于单信号假设的信号处理方法不再适用, 因此, 需要研究相对应的处理方法。对时频混叠信号的载频估计是时频混叠信号处理中重要的一步, 既可以作为盲分离算法初

始值设置的先验知识, 又可以预估盲分离性能。

在以往的时频混叠信号载频估计研究中, 往往假设信号中的加性噪声服从高斯分布, 但在实际应用中, 由于自然或人为产生的电磁噪声的影响, 通信系统中存在的噪声往往不服从高斯分布, 且带有一定的脉冲性。如果仍采用高斯模型来对噪声进行模拟, 将会导致信号处理的性能退化甚至完全失效。1993 年, Shao 等<sup>[1]</sup>将 Alpha 稳定分布的概念引入信号处理领域, 他们发现, Alpha 稳定分布是一

收稿日期: 2017-05-24; 修回日期: 2018-04-19

通信作者: 邱天爽, qiutsh@dlut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61671105, No.61172108, No.61139001)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.61671105, No.61172108, No.61139001)

种更贴近真实的噪声模型。以往的研究中针对 Alpha 稳定分布噪声环境下的时频混叠信号分析文献较少,其中,文献[2]基于循环谱特征方法、文献[3]基于信号相关特性方法、文献[4]基于二阶循环平稳特征方法来对时频混叠信号进行调制识别和载波频率估计。但这些方法都是基于高斯噪声的假设,在 Alpha 稳定分布噪声下性能退化严重甚至失效。文献[5-6]提出了基于分数低阶循环相关的方法,虽然可以在一定程度上抑制 Alpha 稳定分布噪声,但是这种方法需要知道噪声的先验知识,有一定的局限性。本文基于循环相关熵谱,估计 Alpha 稳定分布噪声下时频混叠信号的载波频率,不需要噪声的先验知识,又能和循环相关谱一样,在循环频率域对频谱严重混叠的 BPSK 信号进行载波频率估计,一系列的实验验证了算法的有效性。

## 2 信号噪声模型

### 2.1 时频混叠信号模型

多个线性混叠信号的数学模型表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^k A_i s_i(t) + n_i(t) \quad (1)$$

其中,  $s_i(t)$  ( $i=1, \dots, k$ ) 为同一信道中不同载频的 BPSK 信号,  $A_i$  为  $s_i(t)$  的幅度,  $n_i(t)$  为加性噪声,并假设它们均服从对称 Alpha 稳定分布,且相互独立并与信号  $s_i(t)$  独立。

### 2.2 Alpha 稳定分布噪声

Alpha 稳定分布噪声是刻画现实环境噪声的有效模型之一,也是唯一一类满足广义中心极限定理的分布。Alpha 稳定分布具有更厚的拖尾现象,因此,在时域上具有脉冲性。Alpha 稳定分布的概率密度函数没有闭合的表达式,一般用特征函数来对其进行描述<sup>[7]</sup>

$$\Phi(t) = \exp\{j\mu t - \gamma|t|^\alpha [1 + j\beta \operatorname{sgn}(t)\varpi(t, \alpha)]\} \quad (2)$$

其中,若  $\alpha \neq 1$ , 则  $\varpi(t, \alpha) = \tan\left(\alpha \frac{\pi}{2}\right)$ , 若  $\alpha = 1$ ,

则  $\varpi(t, \alpha) = \left(\frac{2}{\pi}\right) \log|t|$ 。可见,通过式(2)中的4个参数  $\alpha$ 、 $\mu$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  便完全确定一个特征函数。 $\alpha \in (0, 2]$  为特征指数,用来表征信号分布函数拖尾的厚度,  $\alpha$  越小则拖尾越厚;  $\gamma$  为分散系数,它与高斯分布中的方差类似;  $\beta$  ( $-1 < \beta < 1$ ) 为对称参数,用于确定分布的斜度,当  $\beta = 0$  时,稳定分布是对

称的,简称为对称 Alpha 稳定分布 (S $\alpha$ S);  $\mu$  为位置参数。实际上,自然界和工程技术中许多实际环境中的噪声能够与 Alpha 稳定分布相吻合,如电话线路中产生的噪声、无线网络中的多址干扰等,都可以通过 Alpha 稳定分布来描述<sup>[8-9]</sup>。

## 3 时频混叠信号的载波频率估计方法

针对 Alpha 稳定分布噪声不存在二阶及以上统计量的情况,文献[5-6]提出了将分数低阶统计量与循环平稳理论相结合的分阶低阶循环统计量方法。基于这种方法对受到 Alpha 稳定分布噪声影响的信号进行处理具有较好的效果。但是这种方法也有一定的局限性,即需要预先知道稳定分布噪声的  $\alpha$  值,并依此来进行参数设置。Luan 等<sup>[10-11]</sup>的研究将相关熵与循环平稳理论相结合,提出了一种基于核方法和相关熵的类循环相关的新概念,称为循环相关熵。基于相关熵的方法具有优良的抑制脉冲噪声的能力,且对信号和噪声先验知识的依赖性小,有效抑制 Alpha 稳定分布噪声,而循环平稳理论又能在时频混叠的信号中利用信号在不同循环频率处的谱相关特性来估计其各自的载波频率。在此基础上,本文提出了一种基于循环相关熵谱的时频混叠信号载波频率估计方法,理论上证明了 BPSK 信号的循环相关熵谱幅度在频率  $f = 0$  切面上除循环频率等于 0 处外有最大峰值,其位置就是 BPSK 信号的 2 倍载波频率。

### 3.1 循环相关熵

时变相关熵的定义式为

$$V_x(t; \tau) = E\left[\kappa_\sigma(x(t) - x(t + \tau))\right] \quad (3)$$

其中,  $\kappa_\sigma(\cdot)$  表示高斯核函数,其定义式为

$$\kappa_\sigma(t; \tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x(t) - x(t + \tau))^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

其中,参数  $\sigma$  为高斯核函数的核长。

若时变相关熵是周期的,且周期为  $T_0$ , 即满足

$$V_x(t + T_0; \tau) = V_x(t; \tau) \quad (5)$$

则可将  $V_x(t; \tau)$  展开成傅里叶级数形式,得

$$V_x(t; \tau) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} V_x^\xi(\tau) e^{j2\pi\xi t} \quad (6)$$

其中,  $\xi = \frac{m}{T_0}$  为循环频率,对应的傅里叶级数的系数  $V_x^\xi(\tau)$  为

$$V_x^\xi(\tau) = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} V_x(t; \tau) e^{-j2\pi\xi t} dt \quad (7)$$

将式(7)用时间平均运算操作符  $\langle \cdot \rangle_t$  重新表示为

$$V_x^\xi(\tau) = \left\langle V_x(t; \tau) e^{-j2\pi\xi t} \right\rangle_t \quad (8)$$

该傅里叶系数  $V_x^\xi(\tau)$  为循环相关熵函数。

循环相关熵谱密度函数  $C_x^\xi(f)$  简称为循环相关熵谱, 它是循环相关熵的傅里叶变换, 其定义式为

$$C_x^\xi(f) = \int_{-\infty}^{\infty} V_x^\xi(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (9)$$

### 3.2 载波频率估计方法

将式(3)进行泰勒级数展开, 有

$$\begin{aligned} V_x(t; \tau) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2^n \sigma^{2n} n!} E[(x(t) - x(t+\tau))^{2n}] \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} E \left[ 1 - \frac{1}{2\sigma^2} (x(t) - x(t+\tau))^2 + \right. \\ &\quad \left. O\left((x(t) - x(t+\tau))^2\right) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

其中,  $O\left((x(t) - x(t+\tau))^2\right)$  是随机变量  $(x(t) - x(t+\tau))$  的高阶无穷小, 泰勒级数展开项中包含了随机变量  $(x(t) - x(t+\tau))$  的所有偶数阶矩, 根据循环相关和循环谱的结论可知<sup>[12-13]</sup>, BPSK 信号具有二阶循环平稳特征, 故选取泰勒展开的前二项进行分析, 有

$$\begin{aligned} V_x(t; \tau) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} E \left[ 1 - \frac{1}{2\sigma^2} (x(t) - x(t+\tau))^2 \right] \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} E \left[ 1 - \frac{1}{2\sigma^2} (x^2(t) + x^2(t+\tau) - 2x(t)x(t+\tau)) \right] \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \left[ 1 - \frac{1}{\sigma^2} R_x(t; 0) + \frac{1}{\sigma^2} R_x(t; \tau) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $R_x(t; \tau)$  表示随机过程的时变自相关函数。

将式(11)代入式(8)可得

$$\begin{aligned} V_x^\xi(\tau) &= \left\langle \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \left[ 1 - \frac{1}{\sigma^2} R_x(t; 0) + \frac{1}{\sigma^2} R_x(t; \tau) \right] e^{-j2\pi\xi t} \right\rangle_t \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} e^{-j2\pi\xi t} dt + \frac{1}{\sigma^2} R_x^\xi(\tau) - \frac{1}{\sigma^2} R_x^\xi(0) \right] \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} e^{-j2\pi\xi T} + \frac{1}{\sigma^2} R_x^\xi(\tau) - \frac{1}{\sigma^2} R_x^\xi(0) \right] \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^3}} [R_x^\xi(\tau) - R_x^\xi(0)] \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $R_x^\xi(\tau)$  是传统的二阶循环自相关函数。

将式(12)代入式(9)得

$$C_x^\xi(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^3}} [S_x^\xi(f) - 2\pi R_x^\xi(0) \delta(f)] \quad (13)$$

其中,  $S_x^\xi(f)$  是  $R_x^\xi(\tau)$  的傅里叶变换, 表示信号  $x(t)$  的循环相关谱。

一个 BPSK 信号可以表示为

$$x(t) = a(t) \cos(2\pi f_c t + \phi_0) \quad (14)$$

其中,

$$a(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n q(t - t_0 - nT_k)$$

其中,  $q(t)$  为能量有限的键控包络, 宽度为  $T_b$ ;  $\{a_n\}$  是传输的二进制序列 ( $\pm 1$ ), 是等概率独立变量。BPSK 信号  $x(t)$  在频率  $f=0$  处的循环相关谱幅度<sup>[12]</sup>为

$$|S_x^\xi(0)| = \begin{cases} \frac{1}{2T_b} \left| Q(f_c + \frac{\xi}{2}) Q^*(f_c - \frac{\xi}{2}) \right|, & \xi = \frac{m}{T_b} \\ \frac{1}{4T_b} \left| Q(f_c + \frac{\xi}{2}) Q^*(-f_c - \frac{\xi}{2}) \right|, & \xi = -2f_c + \frac{m}{T_b} \\ \frac{1}{4T_b} \left| Q(-f_c + \frac{\xi}{2}) Q^*(f_c - \frac{\xi}{2}) \right|, & \xi = 2f_c + \frac{m}{T_b} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $Q(f)$  为  $q(t)$  的傅里叶变换, 将式(15)代入式(13)并取模, 得到信号  $x(t)$  在频率  $f=0$  处的循环相关熵谱幅度

$$|C_x^\xi(0)| = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^3}} \begin{cases} \left| \frac{1}{2T_b} Q(f_c + \frac{\xi}{2}) Q^*(f_c - \frac{\xi}{2}) - 2\pi R_x^\xi(0) \right|, & \xi = \frac{m}{T_b} \\ \left| \frac{1}{4T_b} Q(f_c + \frac{\xi}{2}) Q^*(-f_c - \frac{\xi}{2}) - 2\pi R_x^\xi(0) \right|, & \xi = -2f_c + \frac{m}{T_b} \\ \left| \frac{1}{4T_b} Q(-f_c + \frac{\xi}{2}) Q^*(f_c - \frac{\xi}{2}) - 2\pi R_x^\xi(0) \right|, & \xi = 2f_c + \frac{m}{T_b} \\ |2\pi R_x^\xi(0)|, & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

当  $q(t)$  为全占空比的矩形脉冲情况时, 其傅里叶变换为

$$Q(f) = \frac{\sin(\pi f T_b)}{\pi f} \quad (17)$$

由式(16)以及式(17)可知,  $|C_x^\xi(0)|$  的最大峰值出

现在  $Q(0)$  处，即循环频率  $\xi = \pm 2f_c$  处。因此，通过搜索循环频率  $\xi \neq 0$  处的循环相关熵谱幅度  $|C_x^\xi(0)|$  的最大峰值，即可估计出 BPSK 信号的载波频率。

通过在循环相关熵谱幅度  $|C_x^\xi(0)|$  上设置一个阈值，当幅度大于阈值时认为信号存在，并估计其载波频率；当幅度小于阈值时认为信号不存在。阈值设置过大会造成一定的漏警率，而阈值过小会造成一定的虚警率。

阈值定义为

$$\text{th} = \text{mean}(GC_x^\xi(0)) + t \times \text{var}(GC_x^\xi(0)) \quad (18)$$

其中， $\text{mean}(\cdot)$  为求均值操作， $\text{var}(\cdot)$  为求方差操作， $t$  值的选取根据实验来设置 ( $t = 20$ )， $GC_x^\xi(0)$  为归一化的循环相关熵谱幅度，计算式为

$$GC_x^\xi(0) = \frac{|C_x^\xi(0)|}{\max(|C_x^\xi(0)|)}$$

其中， $\max(\cdot)$  为求最大值操作。

由于循环相关熵谱幅度  $|C_x^\xi(0)|$  的最大峰值出现在循环频率  $\xi = \pm 2f_c$  处，因此并不需要搜索整个循环频率域。综上所述，本文提出的基于循环相关熵的时频混叠信号载频估计方法具体步骤如下。

1) 先通过 FFT 初步估计时频混叠信号  $x(t)$  的载频估值  $\hat{f}_c$  和带宽估值  $\hat{B}$ 。

2) 利用接收数据  $x(t)$ ，根据式(8)针对不同的时延  $\tau$  和不同的循环频率  $\xi$ ，求循环相关熵函数  $V_x^\xi(\tau)$ ，循环频率的范围设置为  $2\hat{f}_c \pm \hat{B}$ 。

3) 对  $V_x^\xi(\tau)$  做傅里叶变换得到循环相关熵谱密度函数  $C_x^\xi(f)$ ，即式(9)。

4) 按照式(16)求频率  $f=0$  处的循环相关熵谱幅度  $|C_x^\xi(0)|$ ，并归一化得到  $GC_x^\xi(0)$ 。

5) 按照式(18)设置一个阈值，在频率  $f=0$  处的循环相关熵谱幅度切面上检测信号是否存在，若存在，估计其载频。

#### 4 仿真结果分析

为了验证本文估计方法的有效性，进行了 50 次 Monte Carlo 实验，载波频率估计的评判标准为估计准确率，定义为

$$r_c = \frac{N_c}{N} \times 100\% \quad (19)$$

其中， $N_c$  为估计正确的次数，即估计的载波频率等

于真实的载波频率的次数， $N$  为估计总次数。

信号功率差定义为

$$P = 10 \lg \left( \frac{\sigma_{s1}^2}{\sigma_{s2}^2} \right) \quad (20)$$

其中， $\sigma_{s1}^2$  和  $\sigma_{s2}^2$  分别为 2 个时频混叠信号分量的方差。

**实验 1** 为了直观地证明循环相关熵谱能够有效地抑制 Alpha 稳定分布噪声对信号的影响以及基于分数低阶统计量方法对 Alpha 稳定分布噪声先验知识的依赖，分别给出 Alpha 稳定分布噪声下 2 个 BPSK 信号混叠的循环谱、循环相关熵谱、噪声先验知识充足的分数低阶循环相关谱以及噪声先验知识不足的分数低阶循环相关谱在频率  $f=0$  处的归一化循环谱幅度图。Alpha 稳定分布噪声特征指数  $\alpha=1.3$ ，采样频率  $f_s = 40\,000$  Hz，载波频率分别设置为  $f_{c1} = 4\,000$  Hz， $f_{c2} = 4\,100$  Hz，波特率设置为  $R_b = 500$  Baud，实验数据长度为 10 000 点。对于依赖于噪声先验知识的分数低阶循环谱而言，在认为 Alpha 稳定分布噪声的先验知识不充足的情况下，设其参数为  $a = b = \frac{a}{2} + 0.2 = 0.85$ ，而在认为 alpha 稳定分布噪声的先验知识充足的情况下，设其参数为  $a = b = \frac{a}{2} - 0.2 = 0.45$ 。对于循环相关熵谱而言，高斯核函数的核长为  $\sigma = 0.5$ 。由于 Alpha 稳定分布没有有限的方差，因此我们采用广义信噪比 (GSNR) [14]，设  $GSNR=5$  dB。

$$GSNR = 10 \lg \left( \frac{\sigma_x^2}{\gamma} \right) \quad (21)$$

其中， $\sigma_x^2$  为时频混叠信号的方差，等于各时频混叠信号分量的方差和， $\gamma$  为 Alpha 稳定分布噪声的分散系数，取  $\gamma=1$ 。实验结果如图 1 所示。

当 BPSK 信号受到 Alpha 稳定分布噪声影响时，从图 1(a)可以看出，基于循环相关熵方法能有效地抑制 Alpha 稳定分布噪声，准确估计载频；由于 Alpha 稳定分布不存在二阶统计量，因此从图 1(b)可以看出，基于循环相关方法不能有效地估计载频；而对于依赖噪声的先验知识的分数低阶循环谱，在先验知识充足和不充足的情况下，从图 1(c)和图 1(d)可以看出，载频估计的性能差异较大。

**实验 2** 为了测试 Alpha 稳定分布的特征指数  $\alpha$  对时频混叠信号载波频率估计性能的影响，设置  $\alpha$  取

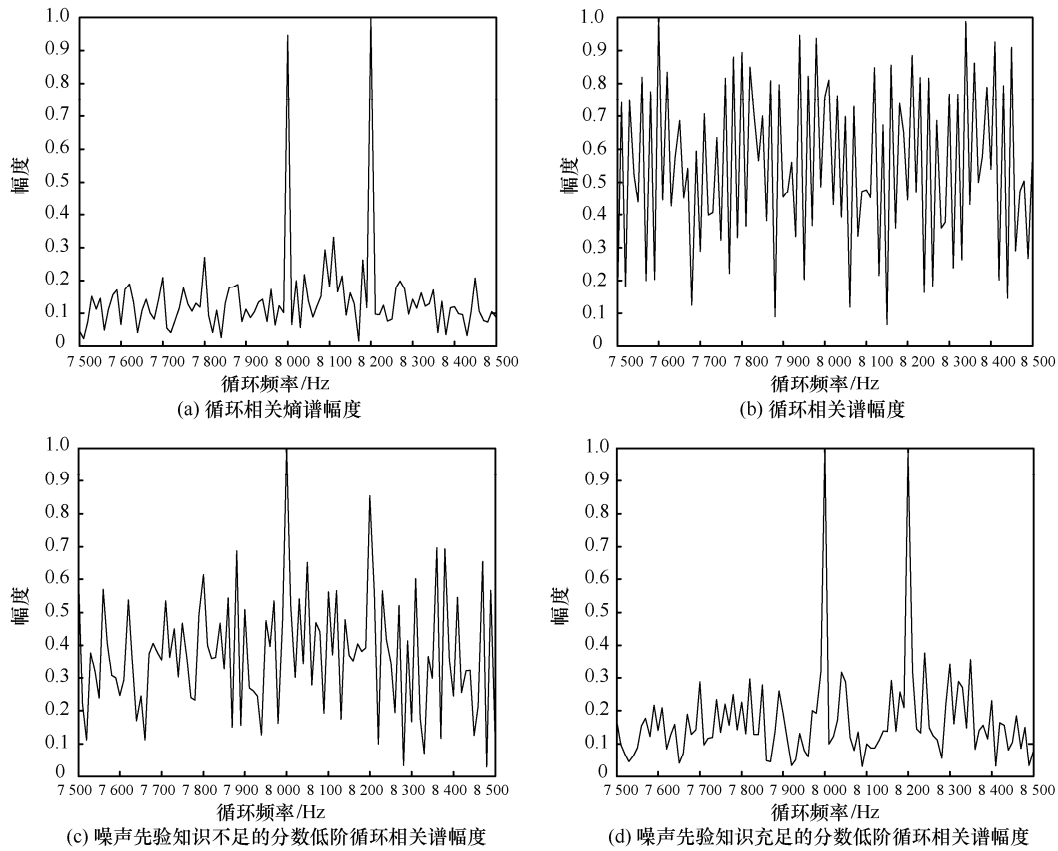


图 1 Alpha 稳定分布噪声下时频混叠双 BPSK 信号归一化循环谱幅度

值为 1~2，采样频率设置为  $f_s = 40\ 000\ \text{Hz}$ ，BPSK 信号  $x(t)$  的载波频率设置为  $f_{c1} = 4\ 000\ \text{Hz}$ ， $f_{c2} = 4\ 100\ \text{Hz}$ ，波特率设置为  $R_b = 500\ \text{Baud}$ ，高斯核函数的核长为  $\sigma = 0.5$ ，接收信号分量之间的功率差为 0 dB， $GSNR$  设置为 5 dB，对于分数低阶统计量方法，为了消除参数的选取对算法性能的影响，设置了 3 组参数： $a = b = 0.3$ 、 $a = b = 0.4$ 、 $a = b = 0.6$ 。实验数据长度为 10 000 点。实验结果如图 2 所示。

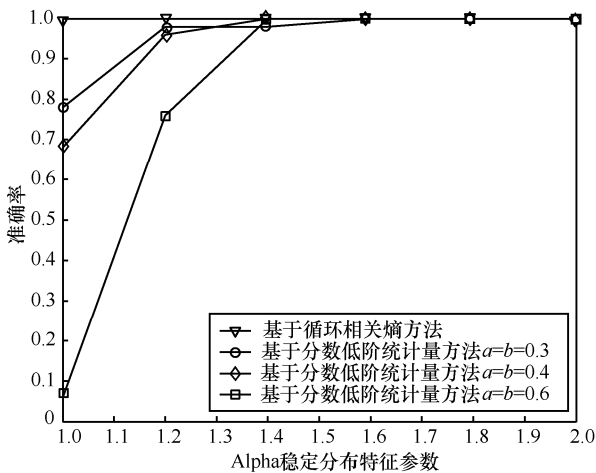


图 2 不同  $\alpha$  值下时频混叠双 BPSK 信号载频估计的准确率曲线

从图 2 可以看出，当特征指数  $\alpha > 1.4$  时，本文方法和基于分数低阶统计量方法都能准确估计载频；当特征指数  $\alpha < 1.4$  时，本文方法载频估计准确率为 100%，而基于分数低阶统计量方法载频估计性能变差。由此可以看出，本文方法在噪声先验知识未知的情况下能有效地抑制 Alpha 稳定分布噪声，表明本文方法在 Alpha 稳定分布噪声下顽健性较强。

**实验 3** 为了测试 Alpha 稳定分布噪声的广义信噪比对时频混叠信号载波频率估计性能的影响，设置广义信噪比为 -4~10 dB，时频混叠信号分量的功率差为 0 dB，Alpha 稳定分布参数  $\alpha = 1.3$ ，对于分数低阶统计量方法，为了消除参数的选取对算法性能的影响，设置了 3 组参数： $a = b = 0.3$ 、 $a = b = 0.4$ 、 $a = b = 0.45$ ，其余参数同实验 2。实验结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出，与分数低阶统计量方法相比，当广义信噪比大于 4 dB 时，本文方法与基于分数低阶统计量方法  $a = b = 0.45$  的性能相同，但是由于参数  $a$ 、 $b$  的选取对基于分数低阶统计量的方法有影响，当  $a$ 、 $b$  取 0.3 或 0.4 时性能反而变差；当广义信噪比小于 4 dB 时，本文方法载频估计准确率高于基于分

数低阶统计量方法，特别在广义信噪比为 0 dB 时，本文方法仍有较高的估计准确率。由此可以看出，本文方法在广义信噪比较低的情况下载频估计性能更佳。

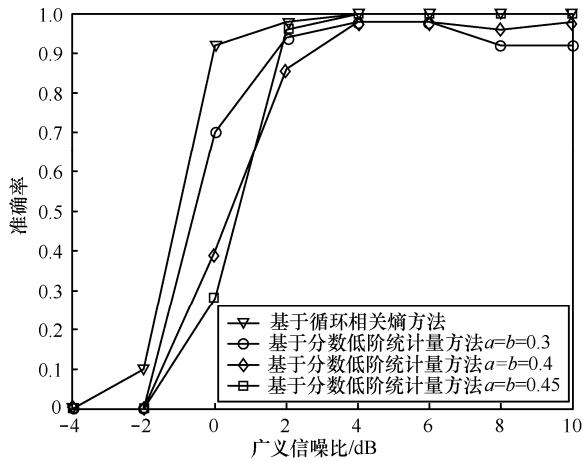


图 3 不同广义信噪比下时频混叠双 BPSK 信号载频估计准确率曲线

**实验 4** 为了测试时频混叠信号分量之间的功率差对时频混叠信号载波频率估计性能的影响，设置 2 个独立的 BPSK 信号分量，接收信号分量之间的功率差设置为 0~9 dB，Alpha 稳定分布参数  $\alpha=1.3$ ，为了使分数低阶统计量方法达到最佳性能，根据实验 3 的结果，设置参数  $a=b=0.45$ ，其余参数同实验 2。实验结果如图 4 所示。

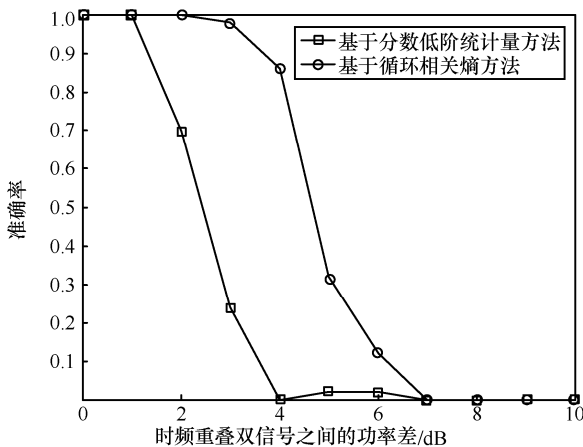


图 4 不同信号功率差下时频混叠双 BPSK 信号载频估计准确率曲线

从图 4 可以看出，当时频混叠信号分量的功率差小于 1 dB 时，本文方法和基于分数低阶统计量方法性能相当；当时频混叠信号分量的功率差大于 1 dB 时，本文方法载波频率估计的准确率要高于基于分数低阶统计量方法。由此可以看出，本文方法

在时频混叠信号分量的功率差较大的情况下载频估计性能更佳。当时频混叠信号分量的功率差别增大时，相当于小功率分量信号广义信噪比降低，由实验 3 可知，当广义信噪比为 0 dB 时，本文方法载频估计的准确率为 92%；当广义信噪比低于 0 dB 时，2 种载频估计方法的准确率都下降很快，但本文方法性能仍优于基于分数低阶统计量方法。同时也可以说明时频混叠信号分量的功率差是影响时频混叠信号载频估计性能的关键因素之一。

**实验 5** 为了测试时频混叠信号分量之间不同载波频率差对时频混叠信号载波频率估计性能的影响，设置 2 个独立的 BPSK 信号分量，载波频率差设置为 20~100 Hz，接收信号分量之间的功率差设置为 0 dB，Alpha 稳定分布参数  $\alpha=1.4$ ，GSNR 设置为 5 dB。实验结果如图 5 所示。

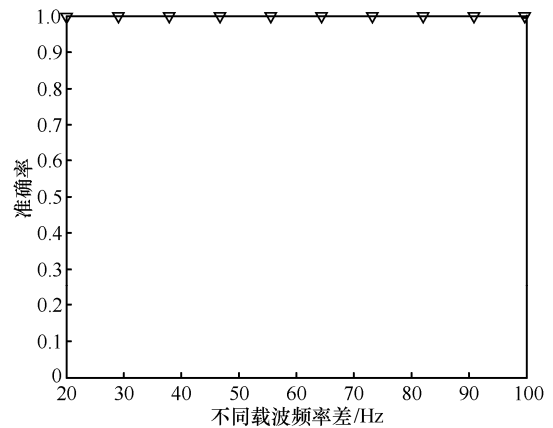


图 5 不同载波频率差下时频混叠双 BPSK 信号载频估计准确率曲线

由于本文是利用信号的循环频率来估计信号的载波频率，理论上，只要混叠信号的循环频率不一样就可以估计出它们的载频，因此与载波频率差没有关系。

### 5 结束语

在 Alpha 稳定分布噪声情况下，针对噪声先验知识不充分所引起的问题，本文提出了一种基于循环相关熵的时频混叠信号载波频率估计方法，并通过理论推导证明了 BPSK 信号循环相关熵谱在循环频率 2 倍载频处具有谱相关的特性，然后利用此特性，在归一化的循环相关熵谱幅度频率  $f=0$  剖面上，估计载波频率。理论推导和仿真实验均表明该方法在 Alpha 稳定分布噪声和时频混叠信号条件下能准确估计出载波频率，由此说明在 Alpha 稳定分

布噪声下, 该方法具有良好的稳健性。在未来的研究中, 将针对更多的数字调制信号 (QPSK、8PSK 等) 进行载波频率估计。

### 参考文献:

- [1] SHAO M, NIKIAS C L. Signal processing with fractional lower order moments: stable processes and their applications [J]. Processings of the IEEE, 1993, 81(7): 986-1010.
- [2] FU H T, WAN Q, SHI R. Modulation classification based on cyclic spectral features for co-channel time-frequency overlapped two-signal[C]// Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and Systems. 2009: 31-34.
- [3] 曾创展, 贾鑫, 刘淑茜. 一种单信道时频重叠信号调制识别方法[J]. 电讯技术, 2015, 55(10): 1164-1169.  
ZENG C Z, JIA X, LIU S Q. A modulation recognition method for time-frequency overlapped signals in single channel[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(10): 1164-1169.
- [4] LI D, QU Y, LIU Z Q, et al. Mixed signal detection based on second-order cyclostationary features[C]//IEEE Military Communications Conference. 2014: 682-687.
- [5] 刘洋, 邱天爽, 李景春. 脉冲噪声环境下改进的顽健循环时延估计算法[J]. 通信学报, 2013, 34(6): 184-190.  
LIU Y, QIU T S, LI J C. Modified robust time delay estimation algorithm based on cyclostationarity in impulsive noise[J]. Journal on Communications, 2013, 34(6): 184-190.
- [6] AKHTAR M, MITSUHASHI W. On family of fractional lower order moment (FLOM)-based algorithms for active noise control of impulsive noise sources[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 131(4): 3435-3435.
- [7] NIKIAS C L, SHAO M. Signal processing with alpha-stable distributions and applications[M]. Wiley-Interscience, 1995.
- [8] WIN M Z, PINTO P C, SHEPP L A. A mathematical theory of network interference and its applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2): 205-230.
- [9] CHAVALI V G, SILVA C R C M D. Detection of digital amplitude-phase modulated signals in symmetric alpha-stable noise[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(11): 3365-3375.
- [10] LUAN S Y, QIU T S, ZHU Y J, et al. Cyclic correntropy and its spectrum in frequency estimation in the presence of impulsive noise[J]. Signal Processing, 2016, 120: 503-508.
- [11] FONTES A I R, REGO J, MARTINS A D M, et al. Cyclostationary correntropy: definition and applications[J]. Expert Systems With Applications, 2017, 69: 110-117.
- [12] GARDNER W, BROWN W, CHEN C K. Spectral correlation of modulated signals: part II-digital modulation[J]. IEEE Transactions on Communications, 1987, 35(6): 595-601.
- [13] 黄知涛. 循环平稳信号处理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
HUANG Z T. Cyclostationary signal processing and application[M]. Beijing: Science Press, 2006.

- [14] 邱天爽, 张旭秀, 李小兵. 统计信号处理: 非高斯信号处理及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

QIU T S, ZHANG X X, LI X B. Statistical signal processing: non-Gauss signal processing and its application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.

### [作者简介]



邱天爽 (1954-), 男, 江苏海门人, 博士, 大连理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为数字信号处理理论及应用等。



陈兴 (1995-), 男, 湖南湘乡人, 大连理工大学硕士生, 主要研究方向为非高斯信号处理。



马济通 (1990-), 男, 江苏赣榆人, 大连理工大学博士生, 主要研究方向为非高斯信号处理。



李景春 (1966-), 男, 河北宁晋人, 博士, 国家无线电监测中心副主任兼总工程师, 主要研究方向为无线电监测理论与应用等。



李蓉 (1984-), 女, 北京人, 博士, 国家无线电监测中心高级工程师, 主要研究方向为认知无线电与数字信号处理等。