

控制与决策

Control and Decision

脉冲噪声下基于循环相关熵的PSK信号码速率估计

金艳, 郝浪浪, 姬红兵

引用本文:

金艳, 郝浪浪, 姬红兵. 脉冲噪声下基于循环相关熵的PSK信号码速率估计[J]. *控制与决策*, 2020, 35(3): 735–739.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0480>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

拒绝服务攻击下领导-跟随多智能体系统的均方一致性研究

Mean square consensus for leader-following multi-agent systems under denial-of-service attacks

控制与决策. 2019, 34(11): 2317–2322 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0588>

北斗弱信号跟踪相干积分算法设计

Beidou weak signal tracking algorithm based on coherent integration

控制与决策. 2018, 33(7): 1282–1286 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0197>

基于前景理论的犹豫模糊TOPSIS多属性决策方法

Hesitant fuzzy TOPSIS multi-attribute decision method based on prospect theory

控制与决策. 2017, 32(5): 864–870 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0259>

递减候选集正则化子空间追踪算法

Decreasing candidate set regularized subspace pursuit algorithm

控制与决策. 2017, 32(2): 287–292 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0077>

带不确定噪声方差保性能鲁棒集中式融合Kalman预报器

Guaranteed cost robust centralized fusion Kalman predictor with uncertain noise variances

控制与决策. 2016, 31(6): 1133–1137 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0451>

一种非平稳环境下的自适应变步长盲源分离算法

An adaptive variable step-size blind source separation algorithm in non-stationary environment

控制与决策. 2016, 31(4): 735–739 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0170>

基于改进熵和新得分函数的区间直觉模糊多属性决策

Interval-valued intuitionistic fuzzy multiple attribute decision-making method based on revised fuzzy entropy and new scoring function

控制与决策. 2016, 31(10): 1757–1764 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1042>

基于近似决策熵的属性约简

Attribute reduction based on approximation decision entropy

控制与决策. 2015(1): 65–70 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1527>

脉冲噪声下基于循环相关熵的PSK信号码速率估计

金 艳, 郝浪浪[†], 姬红兵

(西安电子科技大学 电子工程学院, 西安 710071)

摘要: 针对现有相移键控 (PSK) 信号码速率估计方法在脉冲噪声下性能退化甚至失效的问题, 提出一种循环平稳理论框架下基于相关熵的码速率估计新方法. 构造信号的循环相关熵函数, 并理论推导出在二相相移键控 (BPSK) 信号下的循环相关熵函数. 该方法可通过检测 PSK 信号循环相关熵函数的离散谱线实现码速率估计, 不需要噪声的先验信息, 且能够直接利用 FFT 计算信号的循环相关熵函数的延迟切片, 实现简单. 仿真结果表明, 所提出方法能有效抑制脉冲噪声, 尤其在强脉冲噪声环境下, 具有良好的 PSK 信号码速率估计性能.

关键词: 脉冲噪声; Alpha 稳定分布; 相关熵; 循环平稳; 相移键控信号

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

Symbol rate estimation of PSK signals based on cyclic correntropy in impulsive noise

JIN Yan, HAO Lang-lang[†], JI Hong-bing

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

Abstract: In order to solve the problem that existing algorithms for the symbol rate estimation of phase shift keying (PSK) signals will undergo performance degradation or even become invalid in the Alpha stable noise environment, a novel cyclic correntropy based method under the cyclostationary framework for symbol rate estimation of PSK signals is proposed. The paper presents the cyclic correntropy function, and deduces the cyclic correntropy function expression of binary phase shift keying (BPSK) signals theoretically. This method is easy to be realized owing to the adoption of fast fourier transform (FFT) in calculating the one-dimensional slices of the cyclic correntropy function, and can estimate the symbol rate by detecting the discrete spectral lines of the PSK signal cyclic correntropy function. Moreover, it does not require the prior information of the impulsive noise. The simulation results show that the proposed method can suppress the Alpha stable noise efficiently, and has excellent symbol rate estimation performance of PSK signals, especially in the strong impulsive noise environment.

Keywords: impulsive noise; Alpha-stable distribution; correntropy; cyclostationary; phase shift keying signals

0 引言

相移键控 (Phase shift keying, PSK) 信号是一种典型的具有相位跳变特征的低截获概率信号, 具有较强的抗干扰性和良好的保密性, 是扩频通信系统中的常用信号. 码速率是表示 PSK 信号编码特性的重要参数, 能否得到正确的码速率成为 PSK 信号分析与处理的重要指标, 也是通信对抗的研究热点之一^[1]. 传统的 PSK 信号码速率估计一般假设背景噪声服从高斯分布. 然而, 由于受到自然因素以及人为因素 (如海杂波、大气噪声、电磁设备等) 的影响, 实际噪声呈现很强的冲激特性. 受这类脉冲噪声的影响, 常规的基于高斯噪声假设的处理方法性能严重退化甚至失

效. 对于此类非高斯脉冲噪声, Alpha 稳定分布噪声模型能更好地进行描述. 相对于高斯分布, Alpha 稳定分布具有更厚的拖尾和显著的脉冲特性^[2].

针对 PSK 信号的码速率估计, Gardner 建立了基于循环平稳理论对信号检测的统一框架, 在此基础上文献 [3] 提出了基于循环自相关函数的算法, 文献 [4] 利用循环谱估计码速率, 均可取得有效估计; 在时频域上, 小波变换^[5]可提取信号瞬时跳变时刻, 已被应用到 PSK 信号参数估计中. 近年来, PSK 信号在循环自相关域的高度稀疏性引起学者的关注, 文献 [6] 利用压缩感知理论实现了对信号的参数估计. 但这些方法是在以高斯分布为背景噪声的环境下进行的, 算

收稿日期: 2018-04-17; 修回日期: 2018-06-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61701370).

责任编辑: 柴利.

[†]通讯作者. E-mail: lhao531@126.com.

法估计性能在 Alpha 稳定分布噪声下均有不同程度的退化. 针对 Alpha 稳定分布噪声的抑制, 分数低阶统计量 (Fractional lower order statistics, FLOS) 受到广泛应用, 其阶次 p 必须满足 $0 < p < \alpha$ 以保证 FLOS 的有界性, 因此需要脉冲噪声的先验信息. 对此, 文献 [7-8] 引入非线性变换函数, 通过对信号作非线性变换来抑制脉冲噪声, 但在 $\alpha < 1$ 的强脉冲噪声下无法保证性能.

为了更好地抑制脉冲噪声, 本文提出一种基于相关熵的码速率估计方法. 构造信号的循环相关熵函数, 推导二相移键控 (Binary phase shift keying, BPSK) 信号的循环相关熵函数表达式, 论证了可通过检测循环相关熵函数的离散谱线实现码速率估计. 所提出方法能够利用 FFT 计算信号的循环相关熵函数的延迟切片, 实现简单, 且不需要噪声的先验信息.

1 Alpha 稳定分布与相关熵

Alpha 稳定分布不存在统一的概率密度表达式, 通常采用特征函数描述, 有

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

其中

$$w(t, \alpha) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \log |t|, & \alpha = 1; \\ \tan \frac{\alpha\pi}{2}, & \alpha \neq 1. \end{cases} \quad \operatorname{sgn}(t) = \begin{cases} 1, & t > 0; \\ 0, & t = 0; \\ -1, & t < 0. \end{cases}$$

参数 α 为特征指数, 表征概率密度函数的尖锐程度和拖尾的厚度, α 值越小, 概率密度函数越尖锐且拖尾越厚重; γ 为分散系数, 与高斯分布中的方差有类似意义, 表征了样本的分散程度; β 为对称参数, $\beta = 0$ 即为对称 Alpha 稳定分布 (Symmetric α -Stable, S α S).

相关熵作为一种广义的相关函数^[9-10], 自提出以来广泛应用于非线性检测^[11]、滤波^[12]、波达方向估计^[13]等领域. 对于任意一个随机过程 $\{X_t, t \in T\}$, T 表示时间集合, 其相关熵^[8-9] 定义为

$$V_\sigma(t_1, t_2) = E[k_\sigma(X_{t_1} - X_{t_2})], \quad (2)$$

$$k_\sigma(\cdot) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(\cdot)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3)$$

其中: $k_\sigma(\cdot)$ 为核函数, $\sigma > 0$ 为核长参数, $E[\cdot]$ 为期望.

2 基于相关熵的码速率估计

2.1 循环相关熵函数

Gardner 等^[14] 提出的循环自相关函数得到了广泛应用. 对循环平稳信号 $x(t)$ 的时变自相关函数 $R_x(t, \tau) = E[x(t)x(t+\tau)]$ 进行 Fourier 级数展开, 有

$$R_x(t, \tau) = \sum_{\alpha} R_x(\alpha, \tau) e^{j2\pi\alpha t}, \quad (4)$$

其中: α 为循环频率, Fourier 系数 $R_x(\alpha, \tau)$ 为 $x(t)$ 的循环自相关函数^[13], 满足

$$R_x(\alpha, \tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} R_x(t, \tau) e^{-j2\pi\alpha t} dt. \quad (5)$$

相关熵作为一种随机变量局部相似性的度量^[10], 与自相关函数有相似的特性, 因此本文构造信号的时变自相关熵函数如下:

$$V_x(t, \tau) = E[k_\sigma(x(t) - x(t+\tau))]. \quad (6)$$

其 Fourier 级数展开为

$$V_x(t, \tau) = \sum_{\alpha} V_x(\alpha, \tau) e^{j2\pi\alpha t}. \quad (7)$$

将其 Fourier 系数 $V_x(\alpha, \tau)$ 定义为 $x(t)$ 的循环相关熵函数 (Cyclic correntropy function, CCF), 有

$$V_x(\alpha, \tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} V_x(t, \tau) e^{-j2\pi\alpha t} dt = \langle V_x(t, \tau) e^{-j2\pi\alpha t} \rangle, \quad (8)$$

其中 $\langle \cdot \rangle = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} (\cdot) dt$ 为时间均值算子. 可以看出, 只要求得信号的自相关熵函数 $V_x(t, \tau)$, 即可利用 FFT 计算其循环相关熵函数 $V_x(\alpha, \tau)$.

2.2 PSK 信号的循环相关熵函数

对式 (8) 进行 Fourier 级数展开, 可得

$$V_x(\alpha, \tau) = \left\langle \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2^n n! \sigma^{2n}} [x(t) - x(t+\tau)]^{2n} e^{-j2\pi\alpha t} \right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \left\{ \langle e^{-j2\pi\alpha t} \rangle - \frac{1}{2\sigma^2} \langle [x(t) - x(t+\tau)]^2 e^{-j2\pi\alpha t} \rangle + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2^n n! \sigma^{2n}} \langle [x(t) - x(t+\tau)]^{2n} e^{-j2\pi\alpha t} \rangle \right\}. \quad (9)$$

令

$$H_x(\alpha, \tau) = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2^n n! \sigma^{2n}} \langle [x(t) - x(t+\tau)]^{2n} e^{-j2\pi\alpha t} \rangle, \quad (10)$$

则式 (9) 可表示为

$$V_x(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \left\{ \langle e^{-j2\pi\alpha t} \rangle - \frac{1}{2\sigma^2} \times \langle [x(t) - x(t+\tau)]^2 e^{-j2\pi\alpha t} \rangle + H_x(\alpha, \tau) \right\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \left\{ \langle e^{-j2\pi\alpha t} \rangle + H_x(\alpha, \tau) - \frac{1}{2\sigma^2} \times \langle [x^2(t) - 2x(t)x(t+\tau) + x^2(t+\tau)] e^{-j2\pi\alpha t} \rangle \right\}. \quad (11)$$

由式 (5) 可知, 信号的循环自相关函数满足

$$R_x(\alpha, \tau) = \langle x(t)x(t+\tau) e^{-j2\pi\alpha t} \rangle,$$

则 $R_x(\alpha, 0) = \langle x^2(t) e^{-j2\pi\alpha t} \rangle$. 再令

$$\xi_x(\alpha, \tau) = -\frac{1}{2\sigma^2} (R_x(\alpha, 0)(1 + e^{j2\pi\alpha\tau}) - 2R_x(\alpha, \tau)),$$

式(11)可改写为

$$V_x(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \{ \langle e^{-j2\pi\alpha t} \rangle + \xi_x(\alpha, \tau) + H_x(\alpha, \tau) \}. \quad (12)$$

可以看出,与基于二阶矩的循环自相关函数 $R_x(\alpha, \tau)$ 相比,循环相关熵函数 $V_x(\alpha, \tau)$ 包含了更多的信息. 由于Alpha稳定分布不存在有限的二阶统计量,导致基于二阶矩的循环自相关函数在Alpha稳定分布噪声下失效;但循环相关熵函数不同于循环自相关函数,因其高斯核函数 $k_\sigma(x(t) - x(t + \tau))$ 的存在,当信号与信号的延迟中出现大幅值脉冲时,高斯核函数趋近于零,这便能够起到抑制脉冲噪声的作用. 此外,受系数 $\frac{(-1)^n}{2^n n! \sigma^{2n}} (n \geq 2)$ 的约束,相较于包含二阶信息的 $\xi_x(\alpha, \tau)$ 项, $H_x(\alpha, \tau)$ 的幅值很小,且随着核长参数 σ 的增大, $H_x(\alpha, \tau)$ 幅值的衰减速度远大于 $\xi_x(\alpha, \tau)$ 的衰减速度. 这样,若选择合适大小的核长参数 σ ,使 $|H_x(\alpha, \tau)| \ll |\xi_x(\alpha, \tau)|$,则循环相关熵函数可表示为

$$V_x(\alpha, \tau) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \{ \langle e^{-j2\pi\alpha t} \rangle - \frac{1}{2\sigma^2} (R_x(\alpha, 0)(1 + e^{j2\pi\alpha\tau}) - 2R_x(\alpha, \tau)) \}, \quad (13)$$

其中 $\langle e^{-j2\pi\alpha t} \rangle$ 只在 $\alpha = 0$ 时有非零值. 由式(13)可知,只需得到信号 $x(t)$ 的循环自相关函数 $R_x(\alpha, \tau)$,即可求得信号的循环相关熵函数 $V_x(\alpha, \tau)$. 记PSK信号为 $s(t)$,其模型为

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} q(t - nT_c - t_0) \cos(2\pi f_0 t + \theta_n + \phi_0). \quad (14)$$

其中: $q(t)$ 为调制脉冲, T_c 为码元时宽, t_0 为起始时刻, f_0 为载频, ϕ_0 为初相, θ_n 为码元序列. 当 θ_n 等概率取 $\{0, \pi\}$ 时,即为BPSK信号;当 θ_n 等概率取 $\{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$ 时,即为四相相移键控(Quaternary phase shift keying, QPSK)信号. 本文推导BPSK信号的循环相关熵函数,以此阐释基于循环相关熵函数的PSK信号码速率估计的原理. 令 $a_n = \cos \theta_n, a(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n q(t - nT_c - t_0)$,则式(14)可表示为

$$s(t) = a(t) \cos(2\pi f_0 t + \phi_0). \quad (15)$$

将BPSK信号代入循环自相关函数定义式(5),可得

$$R_s(\alpha, \tau) = R_a(\alpha, \tau) \cos(2\pi f_0 \tau) / 2 + R_a(\alpha + 2f_0, \tau) e^{j2\phi_0} / 4 + R_a(\alpha - 2f_0, \tau) e^{-j2\phi_0} / 4, \quad (16)$$

其中 $R_a(\alpha, \tau)$ 为 $a(t)$ 的循环自相关函数. 由文献[15]可知

$$R_a(\alpha, \tau) = \begin{cases} \frac{\sin(\pi\alpha(T_c - |\tau|))}{\pi\alpha T_c} e^{-j2\pi\alpha t_0}, & \alpha = \frac{k}{T_c}; \\ 0, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (17)$$

其中 k 为整数. 将式(17)代入(16)可得 $R_s(\alpha, \tau)$ 的表达式;再将 $R_s(\alpha, \tau)$ 代入式(13),即得到BPSK的循环相关熵函数

$$V_s(\alpha, \tau) = A \times \begin{cases} \left[\frac{\sin(\pi\alpha(T_c - |\tau|))}{\pi\alpha T_c} \cos(2\pi f_0 \tau) - \frac{\sin(\pi\alpha T_c)}{2\pi\alpha T_c} (1 + e^{j2\pi\alpha\tau}) \right] e^{-j2\pi\alpha t_0}, & \alpha = \frac{k}{T_c}; \\ \left[\frac{\sin(\pi(\alpha \pm 2f_0)(T_c - |\tau|))}{2\pi(\alpha \pm 2f_0)T_c} - \frac{\sin(\pi(\alpha \pm 2f_0)T_c)}{4\pi(\alpha \pm 2f_0)T_c} (1 + e^{j2\pi\alpha\tau}) \right] e^{-j2\pi(\alpha \pm 2f_0)t_0}, & \alpha = (\mp 2f_0) + \frac{k}{T_c}; \\ 0, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (18)$$

其中:系数 $A = \frac{1}{2\sqrt{2\pi\sigma^3}}$, k 为整数. 由式(18)可知, $V_s(\alpha, \tau)$ 只在循环频率 α 等于一组与码速率 $f_c = 1/T_c$ 和载频 f_0 有关的离散值时有非零值. 因此,只要通过选取合适的时间延迟 τ ,并搜索其对应的一维切片 $|V_s(\alpha, \tau)|$ 上的峰值,即能得到BPSK信号的载频和码速率的估计. 值得注意的是,当 $\tau = 0$ 时,由式(9)可知

$$V_s(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \langle e^{-j2\pi\alpha t} \rangle,$$

只在零频有非零值而没有其他谱线. 因此要估计码速率,需选取时间延迟 $\tau \neq 0$ 的切片. 另外,实际应用中载频参数远大于码速率,因此距离零频点最近的循环频率 α 与零频频率差的绝对值即为所求参数码速率 f_c . 当无法知晓信号的先验信息时,选取合适的时间延迟 τ 变得困难. 为此考虑统计量 $T = V_s V_s'$,其中

$$V_s = [\text{Re}\{V_s(\alpha, \tau_1)\}, \dots, \text{Re}\{V_s(\alpha, \tau_N)\}, \text{Im}\{V_s(\alpha, \tau_1)\}, \dots, \text{Im}\{V_s(\alpha, \tau_N)\}]. \quad (19)$$

$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$ 为一组时间延迟, $\text{Re}\{\cdot\}$ 和 $\text{Im}\{\cdot\}$ 分别表示实部和虚部, V_s' 为 V_s 的转置. 易知,统计量 T 并未改变 $V_s(\alpha, \tau)$ 的循环频率结构. 通过选用一组时间延迟 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$,即可解决难以选取合适的时间延迟 τ 的问题.

综上,可得基于相关熵的码速率估计方法如下:构造BPSK信号的循环相关熵函数 $V_s(\alpha, \tau)$,建立统计量 T ,选取非零的一组时间延迟 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$,通过搜索统计量 T 距离零频率点最近的循环频率 α 得到

信号的码速率 f_c 的估值。

3 仿真结果及分析

实验中, BPSK 信号的参数设置如下: 采样频率 f_s 归一化为 1, 载频 $f_0 = f_s/2$, 码速率 $f_c = f_s/16$, 起始时刻 t_0 和初相 ϕ_0 均为 0. 噪声环境为加性标准 $S\alpha S$ 分布噪声, 因其二阶矩 ($\alpha \neq 2$) 不收敛, 信噪比定义中噪声方差的概念失去意义, 通常采用广义信噪比 (Generalized signal-to-noise ratio, GSNR)^[16] 代替信噪比, 表示为

$$\text{GSNR}_{\text{dB}} = 10 \lg(\sigma_s^2/\gamma_v). \quad (20)$$

其中: σ_s^2 为信号的方差, γ_v 为 $S\alpha S$ 分布噪声的分散系数. 特别地, 当 $\alpha = 2$ 时, 噪声退化为高斯分布, 其方差 $\sigma_v^2 = 2\gamma_v$, $\text{GSNR}_{\text{dB}} = 10 \lg(\sigma_s^2/2\gamma_v)$. 本文采用归一化均方根误差 (Normalized root mean square error, NRMSE) 衡量码速率估计的性能, 定义为

$$\text{NRMSE} = \left(\frac{1}{R} \sum_{i=1}^R (\hat{\theta}_i - \theta)^2 \right)^{1/2} / \theta. \quad (21)$$

其中: R 为蒙特卡洛仿真实验次数, θ 为所估计的参数, $\hat{\theta}_i$ 为第 i 次实验中的估计值.

3.1 核长参数的选择

选取一组不同大小的核长参数

$$\sigma = \{0.01, 0.05, 0.1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8\},$$

在 $\alpha = \{0.5, 1, 1.5, 2\}$ 以及 $\text{GSNR} = 0 \text{ dB}$ 的噪声环境下, 对 BPSK 信号经过 200 次蒙特卡洛实验, 所提出算法的性能与核长参数的关系曲线如图 1 所示. 由图 1 可见, 当 $\alpha = 0.5$, 核长参数 $\sigma \in [0.05, 3]$ 时, 可有效完成码速率的准确估计; 当 $\alpha = 1$, $\sigma \in [0.05, 6]$ 时, 可有效估计码速率; 当 $\alpha = 1.5$ 或 $\alpha = 2$, $\sigma \in [0.1, 8]$ 时, 能准确估计码速率. 可以看出, 随着 α 的增大, 能够准确估计参数的核长参数范围也随之增大; 且当 $\sigma \in [0.1, 3]$ 时, 所提出算法均能完成对码速率的准确估计. 基于此, 后续实验核长参数均取 $\sigma = 1$.

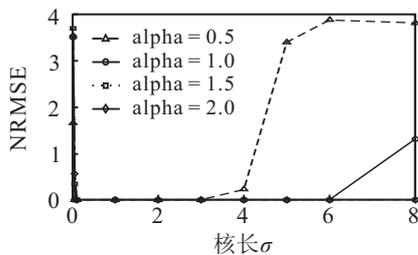
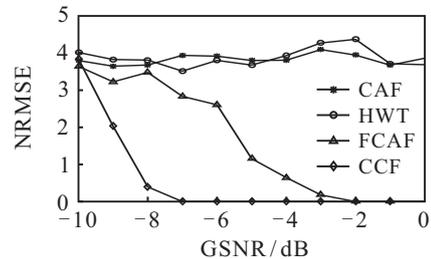


图 1 算法性能与核长参数关系曲线

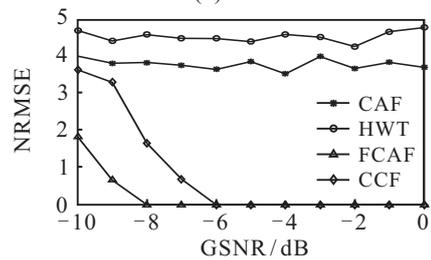
3.2 不同噪声环境对算法性能的影响

在 $\alpha = \{0.5, 1, 1.5, 2\}$ 及不同广义信噪比的噪声环境下, 对 BPSK 信号作 200 次蒙特卡洛实验, 并将提出的基于循环相关熵函数的 CCF 方法分别与基于循

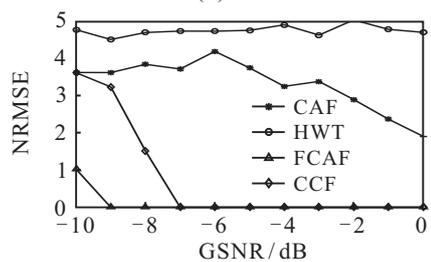
环自相关函数 (Cyclic autocorrelation function, CAF)、基于 Haar 小波变换 (Haar wavelet transform, HWT) 的方法、基于分数低阶矩的分数低阶循环自相关函数 (FCAF) 法进行对比, 所得结果如图 2 所示. 由图 2 可见, 在脉冲噪声 ($\alpha < 2$) 环境下, CAF 和 HWT 的 BPSK 信号码速率估计方法均失效, FCAF 和本文提出的 CCF 法均可有效估计码速率. 具体而言, 当 $\alpha = 0.5$ 时, 提出的基于相关熵的 CCF 方法在 $\text{GSNR} \geq -7 \text{ dB}$ 时即可准确估计码速率, 而基于分数低阶矩的 FCAF 法, 则在 $\text{GSNR} \geq -2 \text{ dB}$ 时能保证估计性能; 当 $\alpha = 1$ 和 $\alpha = 1.5$ 时, CCF 法分别在广义信噪比为 $\text{GSNR} \geq -6 \text{ dB}$ 和 $\text{GSNR} \geq -7 \text{ dB}$ 时能准确估计码速率; 基于分数低阶矩的 FCAF 法分别在 $\text{GSNR} \geq -8 \text{ dB}$ 和 $\text{GSNR} \geq -9 \text{ dB}$ 时能有效估计码速率.



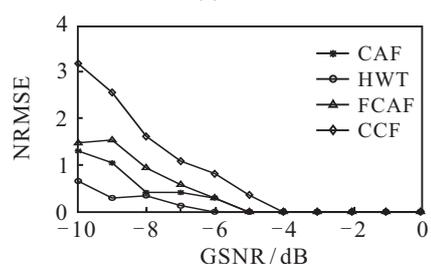
(a) $\alpha = 0.5$



(b) $\alpha = 1.0$



(c) $\alpha = 1.5$



(d) $\alpha = 2.0$

图 2 BPSK 信号码速率估计性能比较

在 $\alpha = 2$ 时, 即高斯噪声下, 上述几种方法都可以有效估计信号码速率, 其中 FCAF 和 CAF 方法能在

GSNR ≥ -5 dB时有效估计码速率;HWT方法则在GSNR ≥ -6 dB时可有效估计码速率;本文提出的CCF法在GSNR ≥ -4 dB时能准确估计码速率。

结果表明,本文提出的基于循环相关熵函数的CCF方法在低信噪比、脉冲噪声环境和高斯噪声环境下均可实现对BPSK信号码速率的准确估计,表现出抑制脉冲噪声的稳健性,尤其在 $\alpha < 1$ 的强脉冲噪声中,可以得到更好的估计。

4 结论

针对Alpha稳定分布噪声环境下PSK信号码速率估计性能退化的问题,本文提出了一种可有效应用于强脉冲噪声环境的新方法。该方法在循环平稳理论框架下构造PSK信号的循环相关熵函数,然后通过检测PSK信号循环相关熵函数时间延迟切片的离散谱线,实现对码速率的估计。仿真实验详细分析了核长参数、广义信噪比以及脉冲噪声特征指数对算法性能的影响,并对比了CAF、HWT以及FCF的码速率估计方法。实验结果表明,所提出方法能有效抑制脉冲噪声,在强脉冲噪声环境下也具有良好的估计性能,能有效解决强脉冲噪声下PSK信号码速率估计性能退化的问题。

参考文献(References)

- [1] 马秀荣, 张媛. 基于功率谱FFT的BPSK信号参数估计[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(5): 1252-1256.
(Ma X R, Zhang Y. Parameters estimation of BPSK signals based on power spectral FFT[J]. J of Electronics & Information Technology, 2013, 35(5): 1252-1256.)
- [2] Yang Guo-sheng, Wang Jun, Zhang Guo-yong, et al. Joint estimation of timing and carrier phase offsets for MSK signals in alpha-stable noise[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(1): 89-92.
- [3] Jin Yan, Ji Hong-bing. Robust symbol rate estimation of PSK signals under the cyclostationary framework[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2014, 33(2): 599-612.
- [4] Deborah Cohen, Liad Pollak, Yonina C, et al. Carrier frequency and bandwidth estimation of cyclostationary multiband signals[C]. IEEE Int Conf on Acoustics, Speech and Signal Processing. Shanghai: IEEE, 2016: 3716-3720.
- [5] Walencykowska M, Kawalec A. Type of modulation identification using wavelet transform and neural network[J]. J of Polish Academy of Sciences, 2016, 64(1): 257-261.
- [6] Chen Xu-shan, Zhang Xiong-wei, Yang Ji-bin, et al. Gridless sparse reconstruction for the cyclic autocorrelation estimation[C]. IEEE Int Conf on Advanced Communication Technology. Pyeongchang: IEEE, 2016: 254-259.
- [7] He Ji-ai, Du Pan-pan, Chen Xing. Parameter estimation of communication signal in alpha-stable distribution noise environment[C]. The 13th Int Conf on Computational Intelligence and Security (CIS). Hong Kong: IEEE, 2017: 182-186.
- [8] Yu Ling, Qiu Tian-shuang, Luan Sheng-yang. Robust joint estimation for time delay and Doppler frequency shift based on generalised sigmoid cyclic cross-ambiguity function[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2017, 11(5): 721-728.
- [9] Santamaria I, Pokharel P P, Principe J C. Generalized correlation function: Definition, properties, and application to blind equalization[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2006, 54(6): 2187-2197.
- [10] Liu W F, Pokharel P P, Principe J C. Correntropy: Properties and applications in non-Gaussian signal processing[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2007, 55(11): 5286-5298.
- [11] Gunduz A, Principe J C. Correntropy as a novel measure for nonlinearity tests[J]. Signal Processing, 2009, 89(1): 14-23.
- [12] Chen Ba-dong, Liu Xi, Zhao Hai-quan, et al. Maximum correntropy Kalman filter[J]. Science Direct, 2017, 76: 70-77.
- [13] Wang Peng, Qiu Tian-shuang, Ren Fu-quan, et al. A robust DOA estimator based on the correntropy in alpha-stable noise environments[J]. Digital Signal Processing, 2017, 60: 242-251.
- [14] Gardner W A, Spooner C M. Signal interception: Performance advances of cyclic-feature detectors[J]. IEEE Trans on Communications, 1992, 40(1): 149-159.
- [15] 金艳, 姬红兵. 基于循环自相关的PSK信号盲参数估计新方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(6): 892-895.
(Jin Y, Ji H B. A new cyclic autocorrelation based blind parameter estimation method for PSK signals[J]. J of Xidian University, 2006, 33(6): 892-895.)
- [16] Jin Yan, Liu Jie. Parameter estimation of frequency hopping signals based on the robust S-transform algorithms in alpha stable noise environment[J]. AEU-Int J of Electronics and Communications, 2016, 70(5): 611-616.

作者简介

金艳(1978—), 女, 副教授, 博士, 从事通信信号侦察及其应用等研究, E-mail: yjin@mail.xidian.edu.cn;

郝浪浪(1994—), 男, 硕士生, 从事非高斯噪声下的信号处理的研究, E-mail: lhao531@126.com;

姬红兵(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事光电信息处理、微弱信号检测与识别等研究, E-mail: hbji@xidian.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)