第36卷 第14期 计 算 机 工 程 2010年7月
Vol.36 No.14 Computer Engineering July 2010
·开发研究与设计技术· 文章编号：1000—3428(2010)14—0256—03 文献标识码：A 中图分类号：TN911.7

# 脉冲噪声环境下的韧性匹配滤波检测方法

江金龙，查代奉，梁宁利
(九江学院电子工程学院，九江 332005)

**摘 要：**针对传统局部最优匹配滤波检测性能在脉冲噪声环境下会明显退化的问题，提出一种韧性匹配滤波检测方法。利用噪声分布概率密度函数求出非线性变换公式，对观测信号作非线性变换和匹配滤波检测。应用于BPSK调制信号的匹配检测滤波信号仿真表明，该算法在抑制脉冲噪声方面对噪声特征指数具有良好韧性，在脉冲噪声环境下比传统局部最优匹配滤波方法具有更好的检测性能。
**关键词：**韧性检测；匹配滤波；非线性变换；Alpha稳定分布

# Robust Detection Method of Matched Filtering in Impulsive Noise Environment

JIANG Jin-long, ZHA Dai-feng, LIANG Ning-li
(College of Electronic Engineering, Jiujiang University, Jiujiang 332005)

**【Abstract】** A robust detection method of Matched Filtering(MF) is proposed to improve performance of conventional local optimization MF detection in impulsive noise environment. A nonlinear transform of observed signal is found by probability density function of impulsive noise distribution, and MF detection is used to transformed signal. The method is dull to characteristic exponent of impulsive noise, it can restrain effectively impulsive noise. Simulation results on MF detection of BPSK modulation show that the proposed method has better detection performance than conventional local optimization MF in impulsive noise and is robust to noise characteristic exponent.
**【Key words】** robust detection; Matched Filtering(MF); nonlinear transform; Alpha stable distribution

## 1 概述

匹配滤波(Matched Filter, MF)常采用最小均方误差(MMSE)准则使输出信噪比最大，在高斯噪声环境下具有最优的检测性能。但通信系统常常受到非高斯脉冲噪声的影响，信号表现出显著的“噪声尖峰”特征。这种噪声称为$\alpha$稳定分布[1]噪声，如果这种噪声通过传统的匹配滤波器，其检测性能就会明显退化。为此，很多学者对$\alpha$噪声环境下的信号检测进行了研究，文献[2]研究了最优和次优的检测方法，文献[3]研究了利用神经网络实现的韧性自适应扩频接收机，但结构复杂。本文在上述研究基础上，提出一种脉冲噪声环境下的韧性匹配滤波检测方法，利用局部最优检测原理，根据噪声分布概率密度函数，先将观测信号作非线性处理，以抑制尖峰脉冲，然后作匹配滤波检测，仿真实验表明了它的有效性。

## 2 Alpha稳定分布

$\alpha$稳定分布是唯一一类满足广义中心极限定理的分布，它的统计特性由其特征函数的4个参数来决定，分别是特征指数$\alpha$($0<\alpha\le 2$)，对称系数$\beta$、分散系数$\gamma$和位置参数$a$。正态分布是$\alpha=2$时的特例。若随机信号的特征指数为$\alpha$，则只有小于$\alpha$阶的统计矩是有限的[1]。对于零均值(中值)的对称分布噪声($S\alpha S$)，$a=0,\beta=0$，仅使用$\alpha$和$\gamma$ 2个参数。$\alpha$稳定分布没有统一的显式概率密度函数，通常用其特征函数来描述：

$$\phi(u)=\exp\{\mathrm{j}au-\gamma|u|^{\alpha}[1+\mathrm{j}\beta\,\mathrm{sgn}(u)\omega(u,\alpha)]\} \tag{1}$$

其中，

$$\omega(u,\alpha)=\begin{cases}\tan(\pi\dfrac{\alpha}{2}) & \alpha\neq 1\\ (\dfrac{2}{\pi})\ln|u| & \alpha=1\end{cases} \tag{2}$$

$\gamma>0$为分散系数，类似高斯分布的方差$\sigma^2$，在高斯情况下，$\gamma=\sigma^2/2$，$0<\alpha\le 2$为特征指数，$-\infty<a<\infty$为位置参数，$\beta\in[-1,1]$为对称参数。sgn($u$)为$u$的符号函数。

若$\alpha$稳定随机变量$X$的特征指数为$\alpha$($0<\alpha<2$)，则只有阶数小于$\alpha$的$p$阶矩是有限的：

$$\begin{cases}E[|X|^p]<\infty & 0\le p<\alpha\\ E[|X|^p]=\infty & p\ge\alpha\end{cases} \tag{3}$$

若$X$的分布具有代数型拖尾(或拖尾较厚)，则存在对数

**基金项目：**国家自然科学基金资助项目“分数低阶非高斯有色噪声的谱分析及频域相关应用研究”(60772037)；江西省教育厅科技基金资助项目“$\alpha$稳定分布噪声下的非线性变换特性及在通信信号分析中的应用研究”(GJJ10266)；江西省自然科学基金资助项目“基于不同分析域变换的重拖尾尖峰脉冲过程的特性与工程应用研究”(2009GES0068)；江西省卫生厅科技计划基金资助项目“非高斯脉冲背景下的诱发电位分析域变换特性研究及临床应用”(20092076)；江西省教育科学“十一五”规划基金资助项目“基于构建主义学习思想的通信工程网络教学研究”(09YB472)
**作者简介：**江金龙(1969－)，男，讲师、硕士，主研方向：随机信号处理，智能信号处理；查代奉，副教授、博士；梁宁利，讲师、硕士
**收稿日期：**2010-02-10 **E-mail：**jljiang8@163.com

阶矩，文献[4]给出了具体的计算公式：

$$E[\ln|X|]=C_e(\frac{1}{\alpha}-1)+\frac{1}{\alpha}\ln\gamma \tag{4}$$

$$E[\ln|X|^2]=\frac{\pi}{6}(\frac{1}{\alpha^2}+\frac{1}{2})+\left|C_e(\frac{1}{\alpha}-1)+\frac{1}{\alpha}\ln\gamma\right|^2 \tag{5}$$

实际遇到的脉冲噪声多数可以用对称分布噪声( $S\alpha S$ )来建模，这时，式(1)的特征函数就简化为

$$\phi_{\alpha,\gamma}(u)=\exp\{-\gamma|u|^{\alpha}\} \tag{6}$$

对式(6)的特征函数作傅里叶反变换，可得到 $S\alpha S$ 稳定分布的概率密度函数

$$f_{\alpha,\gamma}(x)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\phi_{\alpha,\gamma}(u)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega u}\mathrm{d}u \tag{7}$$

但除了高斯( $\alpha=2$ )、柯西( $\alpha=1,\beta=0$ )和皮而森(Pearson, $\alpha=1/2,\ \beta=-1$ )等分布外，一般的 $\alpha$ 稳定分布概率密度函数均没有封闭的表达式，但可以展开为绝对收敛的级数形式。零均值 $S\alpha S$ 分布的概率密度函数 $f_{\alpha,\gamma}(x)$ 参见文献[2]。

## 3 $\alpha$ 稳定分布下的局部最优信号检测

信号检测一般都假设噪声为高斯分布，这在很多情况下是合理的，但在诸如水声、雷达、通信、语音信号和生物医学信号处理等领域的实际应用中，许多随机信号是非正态分布的，具有明显的非高斯脉冲特性，使得基于高斯噪声假设下的接收机在实际的脉冲环境下性能显著退化，表现为虚警概率和漏警概率增加或误码率增大。

考虑如下假设检验问题：

$$\begin{aligned}&H_0: x(n)=s_0(n)+w(n),\ n=1,2,\cdots,N\\&H_1: x(n)=s_1(n)+w(n),\ n=1,2,\cdots,N\end{aligned} \tag{8}$$

其中， $s_i(n)$ ， $i=1,2$ 是 2 个可能的信号之一， $w(n)$ 是特征指数为 $\alpha$ 、分散系数为 $\gamma$ 的独立同分布 $S\alpha S$ 噪声序列。检测器在观测数据 $s_i(n)$ 的基础上选择 $H_0$ 或 $H_1$ ，或者说判决哪个信号被发送。

在最大似然意义上的最优检测器按式(9)计算统计量 $\Lambda$ ：

$$\Lambda=\ln\left\{\frac{\prod_{n=1}^{N}f_{\alpha}([x(n)-s_0(n)])}{\prod_{n=1}^{N}f_{\alpha}([x(n)-s_1(n)])}\right\}=\sum_{n=1}^{N}\ln\left\{\frac{f_{\alpha}([x(n)-s_0(n)])}{f_{\alpha}([x(n)-s_1(n)])}\right\} \tag{9}$$

并与预设判决门限 $\eta$ 相比较。当 $\Lambda\geq\eta$ 时，检测器判决 $s_0(n)$ 被发送；否则就判决 $s_1(n)$ 。若进一步假设 $\eta=0$ ，对 BPSK 等信号，这一门限将使误差概率最小。

当噪声服从高斯分布时，上述最优检测器用匹配滤波器或线性相关器实现(以 $s_0(n)$ 为例)。

$$\Lambda_{\mathrm{MF}}=\sum_{n=1}^{N}s_0(n)x(n)\underset{H_1}{\overset{H_0}{\gtrless}}\eta \tag{10}$$

对 $s_1(n)$ 的匹配滤波检测也是类似的。

在扩频通信等应用中，信号功率相对于噪声功率很小，这时可使用局部最优(Local Optimization, LO)检测。对式(9)的左边作泰勒级数展开，并略去二阶以上高次项，可得到局部最优检测器的似然检验形式：

$$\Lambda_{\mathrm{LO}}(X)=\sum_{n=1}^{N}-\frac{f'(x(n))}{f(x(n))}s_0(n)\underset{H_1}{\overset{H_0}{\gtrless}}\eta \tag{11}$$

定义

$$g(x)=-\frac{f'(x)}{f(x)} \tag{12}$$

实际上式(12)是定义了一个 $x(n)$ 的无记忆非线性变换，式(11)的左边是非线性变换后的 $x(n)$ 与 $s_0(n)$ 、 $s_1(n)$ 的相关检测。

根据式(7)的概率密度函数，对高斯分布( $\alpha=2$ )，有

$$g(x)=x/(2\gamma)=x/\sigma^2 \tag{13}$$

对柯西分布( $\alpha=1$ )，有

$$g(x)=x/(x^2+\gamma^2) \tag{14}$$

对其他情况( $0<\alpha<2,\alpha\neq1$ )， $g(x)$ 没有显式的表达式。图 1 为通过数值计算得到的不同 $\alpha$ 下的 $g(x)$ 曲线[2]，可以看出，所有的变换曲线都是类似的。

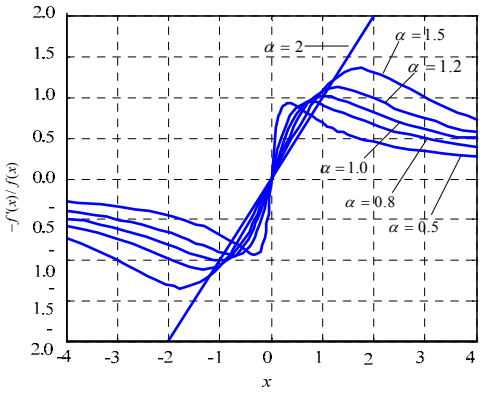



**图 1　不同 $\alpha$ 下的变换曲线**

## 4 $\alpha$ 稳定分布下的韧性匹配滤波方法

当 $\alpha$ 噪声的分散系数明显大于有用信号功率时，应用局部最优信号检测原理，可以达到较好的次优检测。设发送机利用 $M$ 个信号波形 $s_m(t)$ ， $m=1,2,\cdots,M$ 发送数字序列，信息符号周期为 $T$，信道噪声 $n(t)$ 为零均值 $S\alpha S$ 分布噪声，其特征指数为 $\alpha$ ，分散系数为 $\gamma$ ，则接收信号 $r(t)$ 为

$$r(t)=s_m(t)+n(t),\quad 0\leq t\leq T \tag{15}$$

现要求根据接收信号合理判决发送波形，使接收的错误最小。

由于 $\alpha$ 稳定分布没有有限的二阶矩，常规线性相关或匹配滤波检测判决会失去韧性。需要采取有效的措施抑制脉冲噪声的干扰或非线性变换降低信号的特征指数[5]。

式(12)对脉冲噪声作非线性变换，使得变换后的序列均为有限值，各阶统计量存在。从而能有效地抑制脉冲噪声的干扰，检测脉冲噪声环境中的信号。

式(12)对不同的 $\alpha$ 有不同的表达式，这给应用带来不便，考虑到 $0<\alpha<1$ 时，噪声脉冲性太大，一般不适合传输信号，故通常选择柯西分布下的非线性变换式(14)，作为脉冲环境下的通用的变换公式。由于局部局部最优仅在有用信号的功率(或分散系数)明显小于噪声功率(或分散系数)时有效，如果信噪比较大时，性能反而有所下降。为此，可修改如下：

$$g'(x)=x/(x^2+\gamma^2+qP_s) \tag{16}$$

其中， $P_s$ 表示信号功率； $q$ 为加权系数，一般取 1~3 倍。增加 $qP_s$ 项的目的是在信噪比较大，有用信号仍落在式(14)的近似线性范围内，不受非线性变换的影响。由于这种结构对脉冲噪声环境不敏感，因此称之为韧性匹配滤波检测器。

## 5 仿真实验

由于 $\alpha$ 稳定分布噪声没有有限的二阶矩，致使噪声的方差变得没有意义，需要采用广义信噪比(Generalized SNR, *GSNR*)，广义信噪比的定义为[1]

$$GSNR_{dB}=10\lg(\sigma_s^2/\gamma) \tag{17}$$

其中，$\sigma_s^2$ 和 $\gamma$ 分别表示有用信号的方差和 $\alpha$ 稳定分布噪声的分散系数。当噪声为高斯分布时，$\gamma=\sigma^2/2$，这时 *GSNR* 较传统意义的信噪比大 3 dB。

设 $s_m(t)$ 为 BPSK 信号，数据速率 $f_d=6.25$ Hz，$f_c=12.5$ Hz，信号采样频率 $f_s=100$ Hz。测试数据个数 $N=10\ 000$ 个，加性噪声为 $\alpha=1$ 的 $S\alpha S$ 噪声，判决门限为 0。仿真结果如图 2 所示，可以看出，当不使用式(14)的变换，匹配滤波检测的误码率(*BER*)较大，而使用式(14)变换后的匹配滤波检测的误码率在低信噪比时有较好的性能，但高信噪比时的性能下降较多。改进后的式(16)则改进了这一缺陷。

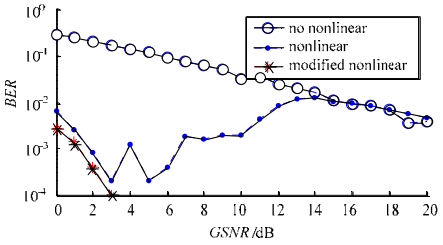



**图 2　$\alpha=1$, $\gamma=1$ 时韧性匹配检测器的误码率比较**

不同 $\alpha$ 下，式(16)下的匹配检测器的性能比较如图 3 所示。

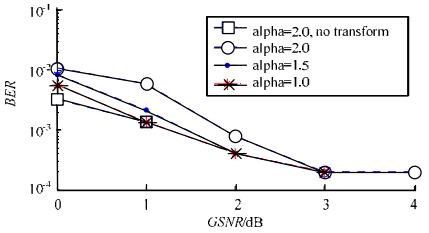



**图 3　$\gamma=1$，不同 $\alpha$ 下韧性匹配检测器的误码率比较**

当 $\alpha=1$ 时，式(16)下的匹配检测器接近高斯噪声($\alpha=2$)下匹配检测器的性能，当 $\alpha$ 从 1 逐渐增大到 2 时，匹配检测器在 *GSNR* 为 0 dB~3 dB 的低信噪比范围内有所下降，而在大于 3 dB 的范围内，它们没有明显区别，对 $\alpha$ 的大小不敏感。

## 6　结束语

本文在分析局部最优检测原理的基础上，提出了一种适合脉冲噪声环境下的韧性匹配检测方法，该算法对加性 $\alpha$ 稳定分布噪声的信号作非线性变换，然后作匹配滤波检测，可以有效地抑制脉冲噪声的影响，运用 BPSK 调制信号的匹配检测表明了该算法的有效性。

## 参考文献


[1] Shao M, Nikias C L. Signal Processing with Fractional Lower Order Moments: Stable Processes and Their Applications[J]. Proceedings of the IEEE, 1993, 81(7): 986-1010.

[2] Shao M, Nikas C L. Signal Detection on Impulsive Noise Based on Stable Distributions[C]//Proc. of the 27th Asilomar Conference on Signal, Systems and Computers. Pacific Grove, Canada: [s. n.], 1993: 218-222.

[3] Chuah T C, Sharif B S, Hinton O R. Robust Adaptive Spread-spectrum Receiver with Neural-net Preprocessing in Non-Gaussian Noise[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2001, 12(3): 546-558.

[4] Zha Daifeng, Qiu Tianshuang. New Analysis Model and Framework of Impulsive Noise with Heavy Tail[J]. Journal of Communication and Computer, 2008, 38(1): 1-8.

[5] Jiang Jinlong, Zha Daifeng. Generalized Fractional Lower-order Spectrum of Alpha Stable Distribution Process[C]//Proc. of the 4th IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Dalian, China: IEEE Press, 2008.


编辑　金胡考

(上接第 255 页)

### 4.4　ColdFire Flash 擦写构件的测试工具

ColdFire Flash 擦写构件的测试工具的运行界面见图 4。




**图 4　测试 Flash 擦写构件的工具运行界面**

MCU 通过串行口接收 PC 机发送的预定格式的命令，实现对 Flash 进行擦除、写入以及读取操作。

## 5　结束语

本文通过 ColdFire 系列的 MCF52233 Flash 的擦除与写入的编程设计，构建了 3 个可移植并重用于 ColdFire 系列所有 MCU 的构件，通过了测试并进行了封装，使 ColdFire Flash 存储器在线编程变得简单易行。

## 参考文献


[1] 王宜怀, 王　林. MC68HC908GP32 单片机的 Flash 存储器在线编程技术[J]. 微电子学与计算机, 2002, 19(7): 15-19.

[2] 王　林, 王宜怀. UF32 Flash 存储器 U-ISP 问题研究[J]. 计算机工程, 2010, 36(2): 56-59.

[3] 王宜怀, 蒋银珍, 王加俊. 基于嵌入式硬件构件模型的原理图绘制规则研究[J]. 微计算机信息, 2009, 26(29): 76-79.

[4] 李　涛, 董云卫. 一种嵌入式软件构件模型和构件库[J]. 计算机科学, 2006, 33(11): 259-262.

[5] 王宜怀. 嵌入式应用在线编程开发系统的研制[J]. 计算机工程, 2002, 28(12): 22-24.

[6] 沈　娟, 吴　晓, 张成栋. 嵌入式软构件模型 JECM 的技术研究及实现[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(7): 194-197.


编辑　金胡考