

抑制脉冲型噪声的限幅器自适应设计

罗忠涛^{*①} 卢鹏^① 张杨勇^② 张刚^①

^①(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

^②(武汉船舶通信研究所 武汉 430079)

摘要: 针对脉冲型噪声的抑制问题, 该文提出一种自适应的限幅器设计方法。该方法以效能函数为指标, 采用自适应搜索算法, 自动寻找削波器和置零器的最佳门限, 且能适用于未知噪声分布的情形。首先分析了效能与非线性函数的关系, 给出关键的优化问题。然后考虑到效能函数计算复杂, 提出基于线搜索的自适应设计算法。其次针对未知分布情况, 考虑非参数化的概率密度估计, 该算法能够稳健运行且基本取得最优设计效果。最后, 结合两种非高斯噪声和实测大气噪声数据仿真, 结果表明: 该文方法可自适应寻找最佳门限, 使削波器和置零器效能达到最佳; 当噪声分布未知时, 该文方法无需假设噪声模型, 可与非参数化概率密度估计方法结合, 取得最优检测效果。

关键词: 非线性处理; 效能函数; 自适应优化; 削波器; 置零器

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)05-1160-07

DOI: 10.11999/JEIT180609

Adaptive Design of Limiters for Impulsive Noise Suppression

LUO Zhongtao^① LU Peng^① ZHANG Yangyong^② ZHANG Gang^①

^①(School of Communication and Information Engineering, Chongqing
University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(Wuhan Maritime Communication Research Institute, Wuhan 430079, China)

Abstract: An adaptive method of limiter design is proposed to suppress impulsive noise. With a purpose of maximizing the efficacy function, the proposed method searches for optimal thresholds of clipper and blanker, via adaptive line search. Firstly, based on analysis on the relationship between the efficacy and the nonlinearity, the key problem of optimization is proposed. Then, since the calculation of efficacy is hard, an adaptive algorithm based on linear search approach is developed based on linear search to optimize the efficacy. Considering the noise distribution is unknown, the proposed method employs the nonparametric kernel density estimation and works robustly in the presence of estimation error. Finally, numeric simulations demonstrate that the proposed method can obtain the optimal performance of clippers and blankers successfully. In the processing of real atmospheric noise from unknown distribution, the proposed method achieves the best detection performance when combining nonparametric kernel density estimation approach.

Key words: Nonlinear processing; Efficiency function; Adaptive optimization; Clipper; Blanker

1 引言

信号检测理论一般考虑噪声服从高斯分布, 采用线性相关器即可取得最佳检测效果^[1]。不过, 许

多脉冲型噪声, 如大气噪声^[2], 含有能量较高的脉冲分量, 往往不服从高斯分布, 其概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 相比高斯分布的PDF具有较长的拖尾^[1]。在受脉冲型噪声影响的系统中, 线性相关检测的性能并非最优。因此需要考虑非线性检测器。实际系统常采用预处理后接线性相关器的方法进行检测, 其中预处理一般具有零记忆非线性 (Zero Memory Non-Linearity, ZMNL) 性质^[3], 其作用是对接收数据做非线性处理。

非线性处理方法的来源可分为3类^[3-11]。首先, 以最大似然准则为基础, 推导得到局部最优检

收稿日期: 2018-06-22; 改回日期: 2018-12-14; 网络出版: 2018-12-24

*通信作者: 罗忠涛 luozt@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61701067, 61771085, 61671095), 重庆市教育委员会科研基金(KJ1600427, KJ1600429)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61701067, 61771085, 61671095), The Scientific Research Foundation of the Chongqing Education Committee (KJ1600427, KJ1600429)

测^[4,5](Local Optimal Detection, LOD), 基本等同于理论上的最优处理。也有人以LOD为原型, 拟合其非线性函数曲线的拖尾, 得到非线性处理方法^[9]。其次, 高斯化处理将脉冲型噪声转化为高斯分布, 然后采用线性相关^[6]或广义相关^[7]; 最后, 设计限幅器如削波器(clipper)或置零器(blank), 可以有效地削弱噪声中的脉冲分量^[8-11]。

上述方法在实用中各具优劣势。局部最优检测虽然性能最优, 但是要求高, 既要已知噪声PDF又要计算1阶导数, 这对于PDF计算复杂的模型(如S α S模型等)来说难以运用。拟合局部最优检测得到的方法往往只适用于特定噪声分布, 且要求分布参数已知, 如AZMNL只能适用于S α S噪声^[9], 文献^[8]中提出的削波器与置零器仅适用于Class A噪声。高斯化处理的性能与局部最优检测有明显差距。削波器和置零器的优势是简单实用, 缺点是难以给出最优解, 一般通过经验取门限^[12]。并且, 当实际噪声不完全符合假设的噪声模型时, 现有方法难以运用。

本文旨在解决脉冲型噪声中的限幅器自适应设计问题, 采用效能函数作为优化目标^[13]。效能函数与检测性能如误码率与虚警概率直接相关, 能够准确反映不同非线性处理方法之间的性能差异。由于效能函数与非线性处理的函数关系计算复杂, 本文提出采用基于线搜索的自适应优化方法。针对未知噪声模型的情况, 本文提出了结合无参数的PDF估计方法的限幅器设计方法。考虑两种常见脉冲型噪声和实测噪声, 本文对所提方法进行了验证。

2 传统的非线性处理

脉冲型噪声中的检测处理常采用预处理加线性检测的方式。输出的检测统计量可以表示为^[14]

$$T_g = g(\mathbf{r})\mathbf{s}^T \quad (1)$$

其中, $g(\cdot)$ 表示预处理中的非线性函数, $\mathbf{r}$ 表示接收信号, $\mathbf{s}$ 表示发射信号, $(\cdot)^T$ 表示转置。

在各类非线性处理方法中, 削波器与置零器的构造非常简单, 在未知噪声模型下可凭经验优化, 因而在实际工作中被广泛应用。置零器和削波器的非线性处理函数可以表示为^[8,15]

$$g_b(x, \tau_b) = \begin{cases} x, & x \leq |\tau_b| \\ 0, & x > |\tau_b| \end{cases} \quad (2)$$

$$g_c(x, \tau_c) = \begin{cases} x, & x \leq |\tau_c| \\ \text{sgn}(x) \cdot \tau_c, & x > |\tau_c| \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\tau_b > 0$ 、 $\tau_c > 0$ 分别表示置零器和削波器的门限, $\text{sgn}(x)$ 表示符号函数。

由式(2)和式(3)可见, 削波器和置零器只需要设计一个因素, 即限幅门限。传统的削波、置零方法往往针对某种噪声模型进行设计, 门限选择方法与噪声模型密切相关, 自适应能力低。一旦实际噪声不服从设定的噪声分布, 削波器与置零器的性能就会大大降低。针对这一问题, 本文考虑适用于脉冲型噪声一般性分布的门限自适应优化方法来设计限幅器。

3 限幅器的自适应设计

设置合理的门限是成功设计削波器与置零器的关键。本节将以效能函数为优化目标, 采用自动线搜索方法, 寻求最大效能对应的门限值。

3.1 非线性处理优化设计

效能函数能够表征低信噪比下多样本检测的输出信噪比, 文献^[1,8,11]给出了采用非线性函数 $g(x)$ 下的效能计算方法, 为

$$\eta(g, f, \tau) = \frac{\left(\int g(x, \tau) f'(x) dx \right)^2}{\int g^2(x, \tau) f(x) dx} \quad (4)$$

其中, $f(x)$ 表示噪声的概率密度函数, $f'(x)$ 为其导数, τ 表示限幅器类处理的门限。效能函数与检测性能密切相关, 且较误码率或检测概率等具体性能更易计算。因此本文选择采用效能函数作为非线性函数的性能指标。

考虑优化限幅器中的门限参数, 使效能函数达到最大值。如式(2)中, 置零器的效能函数最大化的门限值可以表示为

$$\tau_{\text{opt_b}} = \arg \max_{\tau} \eta(g_b, f, \tau) \quad (5)$$

同理, 对于式(3)中的削波器, 其最佳门限值应为

$$\tau_{\text{opt_c}} = \arg \max_{\tau} \eta(g_c, f, \tau) \quad (6)$$

不过, 解决式(5)和式(6)中的优化问题比较困难。一方面, 效能函数公式复杂, 如式(4)包括了微分、积分和除法; 另一方面, 噪声PDF形式多样, 其导数难以计算, 最快下降法、牛顿法^[16]等借助导数的优化方法均不适用。故需考虑无导数的寻优方法解决此问题。

3.2 目标函数特性分析

本文讨论的限幅器设计只有一个待优化参数, 即门限 τ , 故考虑无需导数的线搜索方法。不过, 这类方法要求优化目标函数具有两个特性: 在待优化区间内函数值为单峰且光滑。这样才能保证寻找到的局部极大值即为全局最大值。下面分析效能函数特性是否满足该要求。

现以S α S模型(模型介绍见第5.1节)为例,将效能函数随门限值的变化绘成图1。效能是门限的单峰函数,曲线保持光滑。置零器在门限约3.5时达到最大效能,削波器在门限约1.2时达到最大效能。即S α S分布下的效能函数满足无导数线搜索方法的要求,故在效能函数不解析的情况下也能通过线搜索方法解决式(5)和式(6)中的优化问题。

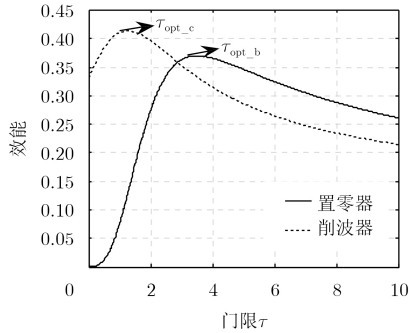


图1 S α S分布下的门限-效能变化, $\alpha=1.5$, $\gamma=1$

对于不同分布的概率密度函数 $f(x)$,改变削波器或置零器门限,仿真其效能函数值大小,进而观察效能值与门限值的关系。本文仿真了脉冲型噪声的两个典型模型,即S α S模型和Class A模型,它们表现出来的关系特性是相似的。

3.3 自适应设计算法

无导数线搜索算法的原则是迭代缩小搜索区间,包括黄金分割法和斐波那契方法等。在设计算法解决式(5)与式(6)优化问题时,还需考虑搜索区域的初始化。故设计算法分为2步:(1)确定最优解或函数峰值的搜索区间;(2)采用某算法缩小这个区间,进行搜索求解。

本文实现两步分别采用进退法与黄金分割法(0.618法)^[16-18]:利用进退法确定最优解所在的区间,然后采用0.618法寻找区间内的最优解。最后,所给出的自适应设计算法如表1。

算法中,初始值设置为自PDF最大值降低3 dB处的样本值;容许误差比率表示搜索范围相对于搜索值的大小,取值越小则搜索结果越精确,一般可设 $\lambda=0.01$ 。其次,文献^[16-18]给出了黄金分割法搜索的推导,并指出黄金分割法具有快速收敛性。因此,当效能为门限的单峰函数时,表1中的自适应优化方法可以迭代搜索到最优门限。

4 未知噪声分布时的设计

假设噪声分布已知,是大部分非线性处理研究和本文第3节考虑的情况。实际运用时,存在噪声分布未知或时变的情况,因此有必要研究噪声未知分布时的限幅器优化设计。

表1 限幅器的自适应优化处理算法

步骤 1	设置初始值 $\tau_0 > 0$, 初始步长 $d_0 = 0.5\tau_0$, 迭代次数 $k = 0$, 计算效能值 $\eta_0 = \eta(g, f, \tau_0)$;
步骤 2	令 $\tau_{k+1} = \tau_k + d_k$, 并计算效能值 $\eta_{k+1} = \eta(g, f, \tau_{k+1})$ 。若 $\eta_{k+1} > \eta_k$, 转步骤3; 否则, 转步骤4;
步骤 3	正向搜索。令 $d_{k+1} = 2d_k$, $\tau = \tau_k$, $\tau_k = \tau_{k+1}$, $\eta_k = \eta_{k+1}$, $k = k + 1$, 转步骤2;
步骤 4	反向搜索。若 $k = 0$, 则令 $d_1 = -d_0$, $\tau = \tau_1$, $\tau_1 = \tau_0$, $\eta_1 = \eta_0$, $k = 1$, 转步骤2; 否则, 停止迭代;
步骤 5	设置线搜索参数, 容许误差比率 λ 。迭代次数 $j=0$; 令 $l_0 = \min\{\tau, \tau_{k+1}\}$, $r_0 = \max\{\tau, \tau_{k+1}\}$, $p_0 = l_0$, $0.382(r_0 - l_0)$, $q_0 = l_0 + 0.618(r_0 - l_0)$;
步骤 6	条件判断。若 $\eta(g, f, p_j) \geq \eta(g, f, q_j)$, 转步骤7, 否则转步骤8;
步骤 7	计算左试探点。若 $ q_j - l_j /r_j > \lambda$, 则令 $l_{j+1} = l_j$, $r_{j+1} = q_j$, $\eta(g, f, q_{j+1}) = \eta(g, f, p_j)$, $q_{j+1} = p_j$, $p_{j+1} = l_{j+1} + 0.382(r_{j+1} - l_{j+1})$, 计算效能值 $\eta(g, f, p_{j+1})$, $j = j + 1$, 转步骤6; 否则, 停止搜索并输出最佳门限值 p_j ;
步骤 8	计算右试探点。若 $ r_j - p_j /r_j > \lambda$, 则令 $l_{j+1} = p_j$, $r_{j+1} = r_j$, $\eta(g, f, p_{j+1}) = \eta(g, f, q_j)$, $p_{j+1} = q_j$, $q_{j+1} = l_{j+1} + 0.618(r_{j+1} - l_{j+1})$, 计算效能值 $\eta(g, f, q_{j+1})$, $j = j + 1$, 转步骤6; 否则, 停止搜索并输出最佳门限值 q_j 。

针对限幅器的自适应优化设计问题式(5)和式(6),效能函数式(4)需要噪声分布的PDF及其导数。当噪声分布未知,可以考虑采用估计噪声PDF及其导数。但需要特别注意的是,估计方法是否适合,效能函数是否单峰和光滑,影响着问题式(5)和式(6)的求解。

当噪声分布未知时,可采用非参数化核密度估计(Kernel Density Estimation, KDE)方法来估计噪声PDF。假设一组观测样本为 $X = [X_1 X_2 \cdots X_n \cdots X_N]$,其KDE所得PDF为^[19]

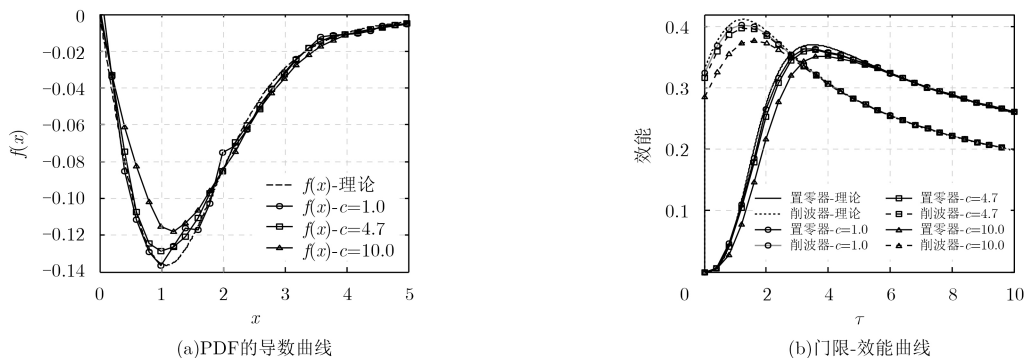
$$\hat{f}(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{n=1}^N K\left(\frac{X_n - x}{h}\right), h > 0 \quad (7)$$

其中, $K(x)$ 为核函数,一般具有零值对称性,常用核函数包括正态核,均匀核等。参数 h 是一个重要参数,决定了概率密度估计的光滑程度。对于脉冲型噪声,一个有效且稳健的赋值方法为

$$h = 0.79N^{-1/5}R_{IQ} \quad (8)$$

其中, R_{IQ} 表示四分间距(interquartile range)^[20]。

再考虑噪声PDF的导数。由KDE方法得到的PDF并无显式表达,只能通过数值方法计算。在此过程中,需考虑求导间隔的大小使计算结果与理论值之间的误差最小。以 $\alpha=1.5$, $\gamma=1$ 的S α S噪声为例,假设求导间隔为 h 的 c 倍,图2给出了由KDE得

图2 $S\alpha S$ 分布下PDF的导数及效能函数图, $\alpha=1.5, \gamma=1$

到的PDF及其导数的估计值。注意本文KDE方法基于的样本点均为 10^4 个。由于PDF导数一般为奇函数, 图2(a)中只给出正半轴部分的曲线以方便对比图线。

观察图2(a)可知, $c=1.0$ 时导数曲线抖动剧烈, 明显不稳健; $c=10.0$ 时曲线光滑, 但是与理论值差距较大; $c=4.7$ 时曲线有微弱抖动现象, 曲线与理论接近。可见倍数 c 不宜过大或过小。针对不同噪声分布的数值分析表明, c 取值范围与噪声分布相关。 $S\alpha S$ 分布下 c 取3~6时估计结果的均方误差较小, 在 $c=4.7$ 处达到最小; Class A分布下 c 的取值范围为2~5, 在 $c=2.2$ 处均方误差最小。

进一步分析效能曲线。PDF导数数值曲线的抖动, 尽管会影响效能函数的计算精度, 但效能函数基本能够保持平滑。原因在于, 效能函数所含的积分运算具有平滑运算的功能。图2(b)给出了由理论值与不同估计值计算得到的门限-效能曲线。可以看到, 尽管 c 值不同导致估算的效能略有不同, 但效能曲线能够保持单峰特性。 $c=1.0$ 效能曲线存在微弱抖动, $c=10.0$ 最佳门限位置与理论门限位置仅有偏差。

基于典型脉冲型噪声分布($S\alpha S$ 分布、Class A分布)数值仿真和实测大气噪声处理的经验, 本文推荐 c 取值在(3~5)范围内。该范围能够取得光滑的效能曲线, 用于表1算法自适应设计门限位置, 基本能够取得理论上最大效能。

5 优化设计方法的性能验证

为考察优化设计限幅器的性能, 本节分析典型脉冲型噪声分布($S\alpha S$ 分布、Class A分布)中限幅器设计的非线性函数, 仿真其效能函数并与局部最优检测对比。

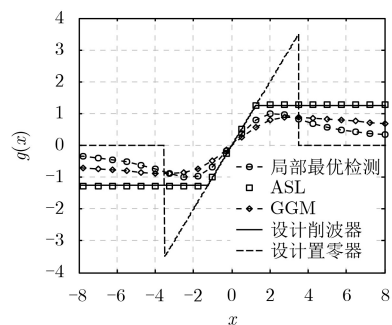
5.1 $S\alpha S$ 分布

非线性变换的作用在于衰减脉冲型噪声的拖尾, 以减少噪声中脉冲分量的占比。其中, $S\alpha S$ 模型是一种常见的非高斯噪声模型, 其特征函数一般为^[21,22]

$$\psi_{\alpha,\gamma}(w) = \exp(-\gamma|w|^\alpha) \quad (9)$$

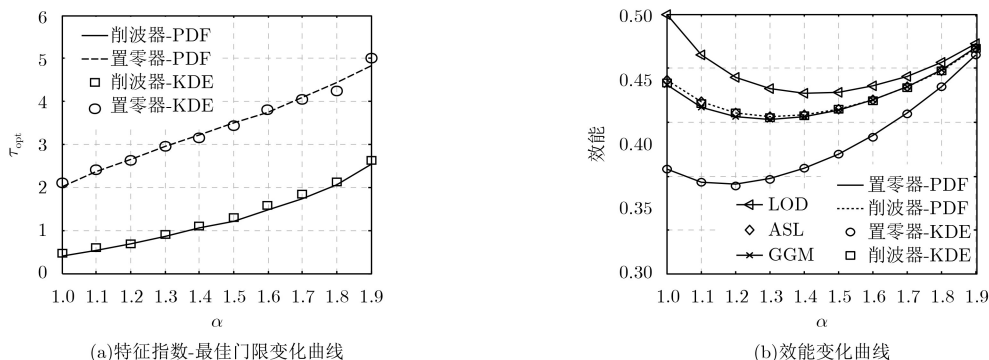
其中, α 为特征指数, 在区间(0,2]内取值, γ 表示分散系数。 $S\alpha S$ 分布PDF封闭表达式仅在 $\alpha=1$ 或 $\alpha=2$ 时存在。一般地, $S\alpha S$ 分布的PDF计算为特征函数的傅里叶反变换。

为考察限幅器的非线性处理, 图3画出在 $\alpha=1.5$ 的 $S\alpha S$ 分布噪声下ZMNL函数曲线。其中, ASL^[11]是一种根据 α 计算最佳门限的设计削波器, 只能用于分布已知的 $S\alpha S$ 分布。GGM方法为高斯化-广义匹配(Gaussianization and Generalized Matching, GGM)相结合的方法^[7], 可用于抑制未知分布的噪声。设计削波器、设计置零器为本文提出的优化设计方法。

图3 $S\alpha S$ 噪声下的ZMNL函数, $\gamma=1$

由图3可见, 不同非线性处理的共同点是抑制大幅度值的噪声样本。不同处理方法的非线性函数大有不同, 不仅表现在拖尾的处理上, 也表现在线性区域或近似线性区域的门限上。例如, ASL和设计削波器的本质均是削波器, 门限一致, 而设计置零器的门限则较大, 局部最优检测在二者中间。注意, ASL方法与最优削波器基本相同, 证明本文与文献^[11]的研究吻合。

下面分析限幅器设计的性能。图4中分别画出了设计限幅器最佳门限随参数变化曲线以及对应非线性处理方法的效能。其中, 削波器-PDF、置零器-PDF均为基于分布的PDF计算的结果, 即理论

图4 SαS分布下设计限幅器的两种性能曲线, $\gamma=1$

结果; 削波器-KDE、置零器-KDE则表示噪声分布未知时, 采用KDE方法得到的估计结果。

观察图4(a)可知, 随 α 的增加最佳门限逐渐提高, 二者近似满足线性关系。采用KDE估计PDF得到的门限与直接由理论PDF计算的最佳门限基本相同。尽管因PDF导数估计存在偏差引起一定的门限曲线的抖动, 但在图4(b)可见, 基于KDE估计的限幅器的效能仍然维持在理论效能的98%以上。此外, 局部最优检测(LOD)方法的效能最优, 设计削波器效能为次优, 而设计置零器效能值差距较大, 故不推荐使用设计置零器抑制服从SαS分布的噪声。

5.2 Class A分布

再验证限幅器自适应设计方法用于Class A分布噪声。Class A模型的概率密度函数为^[8,23,24]

$$p(x) = e^{-A} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A^m}{m! \sqrt{2\pi} \sigma_m} e^{-x^2/\sigma_m^2} \quad (10)$$

其中, A 为脉冲指数, m 为脉冲分量数, $\sigma_m^2 = \sigma^2(m/A + \Gamma)/(1 + \Gamma)$, σ^2 表示噪声过程的平均功率, Γ 表示输入干扰的独立高斯部分的强度和非高斯部分的强度的比率。

Class A噪声PDF与 A 与 Γ 两个参数相关。为直观的观察分布参数与门限和效能的变化关系, 表2列出在不同 A 与 Γ 组合下的最佳门限与效能值。其中 τ -PDF表示噪声PDF已知, τ -KDE表示假设噪声分布未知、采用KDE方法估计PDF。

观察表2可知, 在Class A噪声参数变化时, 设

计置零器的最佳门限高于设计削波器, 同时效能也明显高于设计削波器。因此, 对于服从Class A分布的噪声, 应当多采用设计置零器处理。再对比基于KDE与基于PDF两种方法的门限值, 两类设计限幅器的最佳门限与其理论值差距很小, 且KDE方法的置零器效能始终维持在最优效能的97%以上。

5.3 运算量分析

在实际应用中, 本文所提的限幅器设计, 其工作流程可分为2个阶段: (1)设计阶段: 根据脉冲型噪声的概率密度函数, 采用本文自适应设计方法找出最优门限。(2)使用阶段: 以所得最优门限作为限幅器的门限参数, 按照传统限幅器工作方法处理数据。

由此可见, 设计限幅器与传统限幅器在使用阶段的处理是一样的, 均含有近似的ZMNL函数。不同的是, 设计限幅器增加了设计过程, 会增加运算量。下面简要分析自适应优化方法的运算量。

本文基于进退法与黄金分割法提出的自适应设计方法, 其运算速度与这两种方法的计算量有关。以 $\gamma=1$ 的SαS分布为例, 表3统计了得到最优解前, 进退法与黄金分割法需要搜索与判断的总次数Iter。其中, Iter_b-PDF, Iter_b-KDE分别表示设计置零器在已知PDF和未知PDF下的迭代次数, Iter_c-PDF, Iter_c-KDE则表示设计削波器的迭代次数。

由表3可得, 自适应设计方法的运算复杂度低, 能快速收敛。随着参数 α 增大, 迭代次数减少, 运算量降低, 但总体变化不大。设计削波器的运算复杂度高于设计置零器。另外, 基于PDF方法

表2 Class A分布下(A, Γ)- τ 变化, $\sigma^2=1$

A, Γ	0.1, 10^{-3}	0.35, 10^{-3}	0.5, 10^{-3}	0.1, 10^{-2}	0.35, 10^{-2}	0.5, 10^{-2}
τ_{opt_b} -PDF (η_{opt_b})	0.1296(888.8429)	0.1094(647.4406)	0.0996(532.3140)	0.3397(87.5188)	0.2898(59.1912)	0.2698(46.5176)
τ_{opt_c} -PDF (η_{opt_c})	0.0386(671.5877)	0.0232(356.9533)	0.0188(257.2668)	0.1181(69.5440)	0.0743(38.4601)	0.0623(28.4378)
τ_{opt_b} -KDE (η_{opt_b})	0.1199(877.9385)	0.1094(631.7642)	0.0994(510.9088)	0.3494(85.5270)	0.2937(57.2562)	0.2708(43.9273)
τ_{opt_c} -KDE (η_{opt_c})	0.0396(665.3161)	0.0239(349.5658)	0.0197(247.0483)	0.1197(68.3936)	0.0786(36.7663)	0.0651(26.4190)

表3 S α S分布下限幅器自适应设计方法迭代次数

α	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
Iter _b -PDF	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Iter _c -PDF	17	17	17	16	16	16	16	15	15
Iter _b -KDE	15	15	15	15	15	15	15	15	14
Iter _c -KDE	17	17	17	16	16	16	16	15	15

仿真得到自适应方法的初始值 τ_0 分别为：1.11, 1.21, 1.30, 1.37, 1.44, 1.49, 1.55, 1.60, 1.63, 与KDE估计方法的初始值相近。比较这些初始值 τ_0 与图4(a)和表3的迭代次数，注意到自适应方法的计算复杂度跟初始值与最优值之间的距离相关，距离越小，所需迭代次数就减少。

综合上述仿真验证，可见本文提出的限幅器自适应设计方法能够准确找到最优门限，取得次优效能，且运算复杂度较低。当噪声分布未知时，限幅器自适应设计方法可与KDE方法相结合，算法工作依然稳健，效能损失非常低。相比传统限幅器，本文限幅器能快速设计，使用过程不增加运算量。此外，针对不同噪声分布，设计削波器与设计置零器的性能表现有差距，在实用中要选择二者效能高者使用。

6 实测噪声数据的误码率仿真

采用本文给出的限幅器设计方法，结合一组未知分布的实测大气噪声数据，进行低频通信处理的仿真验证。将实测大气噪声作为噪声，加入仿真的MSK信号，各码元的采样点数 $M=512$ 。定义信噪比为 $SNR = E_s/\sigma^2$ ， E_s 为单码元信号能量。在线性相关检测之前，采用不同的非线性处理方法进行预处理。其中，线性相关表示未做任何非线性处理；削波器-S α S、置零器-S α S表示假设噪声服从S α S分布、估计其参数、仿真其PDF、再优化设计削波器或置零器；削波器-Class A、置零器-Class A表示假设噪声服从Class A分布、估计其参数、仿真其PDF、再优化设计削波器或置零器；削波器-KDE、置零器-KDE表示噪声分布未知、结合KDE估计方法自适应设计削波器或置零器。

图5为各处理方法在不同信噪比下的误码率曲线。首先说明，该组实测数据在2类模型下的参数估计结果：S α S模型假设下 $\alpha=1.55$ ， $\gamma=0.13$ ；Class A模型假设下 $A=0.42$ ， $\Gamma=0.68$ ， $\sigma^2=0.27$ 。由图5可见，削波器-KDE、削波器-S α S性能最好，说明该数据较符合S α S分布。其次，3种假设下的设计削波器均优于置零器-KDE、置零器-S α S、置零器-Class A等，可见削波器比置零器更适合处理该组噪声。注意，当假设噪声服从Class A分布时，两

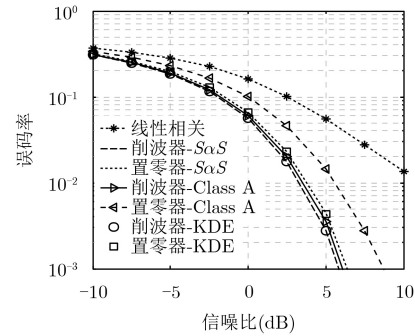


图5 实测数据的误码率性能

类限幅器的性能均低于S α S假设，说明在未知噪声分布的处理中，模型选取是否得当直接影响性能优劣。

综上可知，结合KDE方法可以实现设计的限幅器对未知分布噪声的抑制，且性能损失非常小；模型选择错误会造成非线性处理的性能下降，而结合KDE估计方法可有效地避免这类问题。

7 结束语

针对脉冲型噪声的抑制处理，本文提出了两类限幅器的自适应设计方法。该方法以效能函数为优化目标，并采用自适应迭代算法搜索最佳门限，进而得到最优削波器和最优置零器。对S α S分布和Class A分布的仿真表明了所提方法的有效性。针对未知噪声分布情况，本文提出与概率密度函数估计方法结合使用，设计方法能够在估计误差容许范围内稳健地达到近似最优性能。因此，本文方法不需要具体的噪声模型，可用于不同分布和未知分布的脉冲型噪声抑制，相比传统非线性方法具有更广的应用范围。

参考文献

- [1] KAY S M. Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume II: Detection Theory[M]. Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall, Inc., 1993: 94–115.
- [2] DAVIS R R and CLAVIER O. Impulsive noise: A brief review[J]. *Elsevier Hearing Research*, 2017, 349: 34–36. doi: 10.1016/j.heares.2016.10.020.
- [3] LI Xutao, SUN Jun, WANG Shouyong, et al. Near-optimal detection with constant false alarm ratio in varying impulsive interference[J]. *IET Signal Processing*, 2013, 7(9): 824–832. doi: 10.1049/iet-spr.2013.0024.
- [4] MILLER J and THOMAS J. Detectors for discrete-time signals in non-Gaussian noise[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1972, 18(2): 241–250. doi: 10.1109/TIT.1972.1054787.
- [5] VADALI S R K, RAY P, MULA S, et al. Linear detection of a weak signal in additive Cauchy noise[J]. *IEEE*

- Transactions on Communications*, 2017, 65(3): 1061–1076. doi: [10.1109/TCOMM.2016.2647599](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2647599).
- [6] WANG Pingbo, LIU Feng, CAI Zhiming, *et al.* G-Filter's Gaussianization function for interference background[C]. International Conference on Signal Acquisition and Processing, Nanjing, China, 2010: 76–79. doi: [10.1109/ICSAP.2010.77](https://doi.org/10.1109/ICSAP.2010.77).
- [7] 罗忠涛, 卢鹏, 张杨勇, 等. 基于高斯化-广义匹配的脉冲型噪声处理方法研究[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(12): 2928–2935. doi: [10.11999/JEIT180191](https://doi.org/10.11999/JEIT180191).
LUO Zhongtao, LU Peng, ZHANG Yangyong, *et al.* A novel method for nonlinear processing in impulsive noise based on gaussianization and generalized matching[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(12): 2928–2935. doi: [10.11999/JEIT180191](https://doi.org/10.11999/JEIT180191).
- [8] OH H and NAM H. Design and performance analysis of nonlinearity preprocessors in an impulsive noise environment[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(1): 364–376. doi: [10.1109/TVT.2016.2547889](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2547889).
- [9] OH H, NAM H, and PARK S. Adaptive threshold blanker in an impulsive noise environment[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, 56(5): 1045–1052. doi: [10.1109/TEM.2014.2311853](https://doi.org/10.1109/TEM.2014.2311853).
- [10] KOLODZIEJSKI K R and BETZ J W. Detection of weak random signals in IID non-Gaussian noise[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2000, 48(2): 222–230. doi: [10.1109/26.823555](https://doi.org/10.1109/26.823555).doi:[10.1109/26.823555](https://doi.org/10.1109/26.823555).
- [11] ZHANG Guoyong, WANG Jun, YANG Guosheng, *et al.* Nonlinear processing for correlation detection in symmetric alpha-stable noise[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2018, 25(1): 120–124. doi: [10.1109/LSP.2017.2776317](https://doi.org/10.1109/LSP.2017.2776317).
- [12] 张杨勇, 刘勇. 低频段大气噪声及处理技术[J]. 舰船科学技术, 2008, 30(S1): 85–88. doi: [10.3404/j.issn.1672-7649.2008.S021](https://doi.org/10.3404/j.issn.1672-7649.2008.S021).
ZHANG Yangyong and LIU Yong. Atmospheric-noise at low frequency and its processing technique[J]. *Ship Science & Technology*, 2008, 30(S1): 85–88. doi: [10.3404/j.issn.1672-7649.2008.S021](https://doi.org/10.3404/j.issn.1672-7649.2008.S021).
- [13] MODESTINO J W and NINGO A Y. Detection of weak signals in narrowband non-Gaussian noise[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1979, 25(5): 592–600. doi: [10.1109/TIT.1979.1056086](https://doi.org/10.1109/TIT.1979.1056086).
- [14] KURUOGLU E E, FITZGERALD W J, and RAYNER P J W. Near optimal detection of signals in impulsive noise modeled with a symmetric alpha-stable distribution[J]. *IEEE Communications Letters*, 1998, 2(10): 282–284. doi: [10.1109/4234.725224](https://doi.org/10.1109/4234.725224).
- [15] VASTOLA K. Threshold detection in narrow-band non-Gaussian noise[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1984, 32(2): 134–139. doi: [10.1109/TCOM.1984.1096037](https://doi.org/10.1109/TCOM.1984.1096037).
- [16] CHONG E K D and ZAK S H. An Introduction to Optimization[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2014: 105–108.
- [17] NOCEDAL J and WRIGHT S J. Numerical Optimization[M]. New York NY, US: Springer-Verlag Inc., 1999: 35–62.
- [18] SCALES L E. Introduction to Non-Linear Optimization[M]. London, UK: Macmillan Publishers, 1985: 31–34.
- [19] SAMIYUDDIN M and EL-SAYYAD G M. On nonparametric kernel density estimates[J]. *Biometrika*, 1990, 77(4): 865–874. doi: [10.1093/77.4.865](https://doi.org/10.1093/77.4.865).
- [20] SILVERMAN B W. Density Estimation for Statistics and Data Analysis[M]. London, UK: Chapman & Hall, 1986: 45–48.
- [21] HE Jiai, DU Panpan, and CHEN Xing. Parameter estimation of communication signal in alpha-stable distribution noise environment[C]. Computational Intelligence and Security, Hong Kong, China, 2017: 15–18. doi: [10.1109/CIS.2017.00047](https://doi.org/10.1109/CIS.2017.00047).
- [22] BIBALAN M H, AMINDAVAR H, and AMIRMAZLAGHANI M. Characteristic function based parameter estimation of skewed alpha-stable distribution: An analytical approach[J]. *Elsevier Signal Processing*, 2017, 130: 323–336. doi: [10.1016/j.sigpro.2016.07.020](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.07.020).
- [23] MIDDLETON D. Procedures for determining the parameters of the first-order canonical models of Class A and Class B electromagnetic interference[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, 21(3): 190–208. doi: [10.1109/TEM.1979.303731](https://doi.org/10.1109/TEM.1979.303731).
- [24] AXELL E, ELIARDSSON P, TENGSTRAND S, *et al.* Power control in interference channels with Class A impulse noise[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017, 6(1): 102–105. doi: [10.1109/LWC.2016.2634529](https://doi.org/10.1109/LWC.2016.2634529).
- 罗忠涛: 男, 1984年生, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为统计信号处理与数字图像处理.
- 卢 鹏: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为低频噪声分析与低频通信信号处理.
- 张杨勇: 男, 1983年生, 高级工程师, 研究方向为低频通信技术与信号处理.
- 张 刚: 男, 1976年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为微弱信号检测与混沌信号处理.