

· 抗干扰专题 ·

DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2021.08.012

基于箕舌线样条插值算法抑制脉冲干扰

郭文燕^{1,2},智永锋^{*1,2}

(1. 西北工业大学 自动化学院, 西安 710072; 2. 机电动态控制重点实验室, 西安 710065)

摘要:针对在非高斯环境下,基于最小均方算法估算系统权值较差的问题,研究了一种新的箕舌线三次样条插值算法抑制脉冲干扰。通过引入鲁棒性较强的箕舌线函数,与样条插值算法结合,形成箕舌线样条插值算法。仿真实验表明:文中所提算法能够精确估计系统权值,较有效地抑制了脉冲干扰。

关键词:非线性自适应滤波;样条插值;脉冲干扰

中图分类号:TN972 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-7859(2021)08-0071-04

引用格式:郭文燕,智永锋. 基于箕舌线样条插值算法抑制脉冲干扰[J]. 现代雷达, 2021, 43(8): 71-74.

GUO Wenyan, ZHI Yongfeng. Vorsoria spline interpolation algorithm against impulsive interference[J]. Modern Radar, 2021, 43(8): 71-74.

Vorsoria Spline Interpolation Algorithm against Impulsive Interference

GUO Wenyan^{1,2},ZHI Yongfeng^{*1,2}

(1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory, Xi'an 710065, China)

Abstract:In the non-Gaussian environments, system weight estimation based on the least mean square algorithm is poor, so a new vorsoria cubic spline interpolation algorithm is studied to against impulsive interference. The vorsoria function is introduced because of strong robustness, then vorsoria spline interpolation algorithm is formed by combining the vorsoria function with spline interpolation algorithm. Simulation results show that the proposed algorithm can precisely estimate the system weight and effectively suppress impulsive interference.

Key words:nonlinear adaptive filter; spline interpolation; impulsive interference

0 引言

在电子对抗中,各种压制性的噪声干扰从雷达天线方向图的主瓣方向进入雷达接收机,使目标信号被干扰信号淹没,严重影响精确制导精度。主瓣干扰抑制是现代雷达需要解决的重要问题之一。大量的研究表明在雷达探测实际领域的应用中,往往存在许多具有脉冲幅度特性的非高斯干扰^[1]。存在于信号或噪声中的非高斯特性往往会导致基于最小均方(LMS)算法估计系统权值的空时自适应信号处理^[2]抑制干扰效果退化。一些研究者根据信号的非高斯特性,研究了根据 Volterra^[3]级数算法展开的自适应算法,但存在随着阶次的增长需要大量的自由参数问题。根据神经

网络^[4]算法建模则存在较高的计算成本问题。样条插值算法^[5]具有较低的计算复杂度,并已应用于雷达信号设计中^[6]。

为了达到更好的干扰抑制效果,本文从提升自适应信号处理估计系统权值精确性方面进行研究,引入鲁棒性较强的箕舌线函数^[7],与样条插值算法结合,形成箕舌线样条插值算法,抑制贴合实际的 Alpha 稳定分布非高斯干扰。本文仅考虑在实信号环境下的算法推导,复信号时将实部和虚部分别按照实信号的算法推导。仿真实验表明:本文所提算法能够精确估计系统权值,可以较好地抑制脉冲干扰。

1 箕舌线样条插值算法

箕舌线维纳型样条模块由线性模块和非线性无记忆模块组合形成,箕舌线样条插值算法的框架如图1所示。线性模块由有限脉冲响应(FIR)滤波器组成,

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U20B2040,61671379);
深圳市科技创新委员会资助项目(JCYJ20170815161351983);机电动态控制重点实验室开放课题基金资助项目(6142601200605)

收稿日期:2021-06-30 **修订日期:**2021-07-17

输入信号表示为 $\mathbf{x}_n \in \mathbb{R}^{M \times 1} = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-M+1)]^T$, 其中, M 为 FIR 滤波器的阶数。FIR 滤波器的输出定义为 $s(n) = \mathbf{w}(n)^T \cdot \mathbf{x}_n$, 其中, 在 n 时刻, FIR 滤波器的权重向量表示为 $\mathbf{w}(n) = [w_0, w_1, \dots, w_{M-1}]^T$ 。

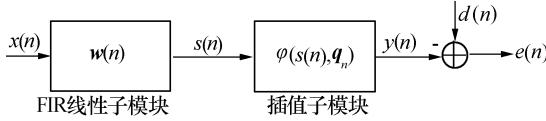


图 1 算法框架

非线性插值子模块由线性模块输出寻址和局部低阶多项式样条曲线插值组成。线性模块输出寻址中, 局部参数 u 和跨度指数 i 的计算过程表示为

$$u = \frac{s(n)}{\Delta x} - \left\lfloor \frac{s(n)}{\Delta x} \right\rfloor \quad (1)$$

$$i = \left\lfloor \frac{s(n)}{\Delta x} \right\rfloor + \frac{Q-1}{2} \quad (2)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 为取整算子; $\Delta x = q_{x,i} - q_{x,i+1}$ 为恒定采样步长; Q 为控制点 $\mathbf{q}_{i,n}$ 的总数。样条函数 $\varphi_i(u)$ 定义为 P 阶局部多项式, 令 $P=3$, 为三次样条曲线, 输出 $y(n)$ 可以表示为

$$y(n) = \varphi_i(u) = \mathbf{u}^T \mathbf{C} \mathbf{q}_{i,n} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{u}_n = [u_n^3, u_n^2, u_n, 1]^T$; $\mathbf{q}_{i,n} = [q_i, q_{i+1}, q_{i+2}, q_{i+3}]^T$, q_k 表示第 k 个控制点; \mathbf{C} 是一个 4×4 的样条基矩阵, 取决于样条基函数的类型, 选用 B 样条^[8]。

$$\mathbf{C} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

误差函数表示为

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (5)$$

式中: $d(n)$ 为系统的期望信号。

标准箕舌线函数的定义为

$$f(e(n)) = \frac{8a^3}{4a^2 + e(n)^2} = 2a \frac{1}{1 + (e(n)/2a)^2} \quad (6)$$

式中: $e(n)$ 表示误差; $a>0$ 表示箕舌线函数生成的圆的半径, 该圆的圆心为 $(0, a)$, 随着半径 a 增大, 箕舌线函数会越来越陡峭。

将标准的箕舌线函数扩展为广义箕舌线函数, 可

表示为

$$f(e(n)) = 2a \frac{1}{1 + |e(n)/2a|^p} = 2a \frac{1}{1 + \tau |e(n)|^p} \quad (7)$$

式中: $p>0$ 为广义箕舌线函数形状参数, 并且 $\tau = (2a)^{-p}$ 。当 $p=2$ 时, 式(7)退化为标准的箕舌线函数。

使用广义箕舌线函数作为代价函数^[9]

$$J(e(n)) = J(\mathbf{w}(n), \mathbf{q}_{i,n}) = E \left[\frac{1}{1 + \tau |e(n)|^p} \right] \quad (8)$$

计算 $e(n)$ 的梯度为

$$e_d(n) = \nabla J(\mathbf{w}(n), \mathbf{q}_{i,n}) = \tau p \frac{1}{(1 + \tau |e(n)|^p)^2} |e(n)|^{p-1} \text{sgn}(e(n)) \quad (9)$$

使得代价函数最小化, 对权值 \mathbf{w} 和控制点 \mathbf{q} 使用梯度下降运算, 可得

$$\nabla_{\mathbf{w}} J(\mathbf{w}(n), \mathbf{q}_{i,n}) = -e_d(n) \frac{\partial s(n)}{\partial \mathbf{u}_n} \frac{\partial \mathbf{u}_n}{\partial y(n)} \frac{\partial y(n)}{\partial \mathbf{w}(n)} = -e_d(n) \varphi'_i(u) \frac{1}{\Delta x} \mathbf{x}_n \quad (10)$$

$$\nabla_{\mathbf{q}_{i,n}} J(\mathbf{w}(n), \mathbf{q}_{i,n}) = -e_d(n) \frac{\partial s(n)}{\partial \mathbf{q}_{i,n}} = -e_d(n) \mathbf{C}^T \mathbf{u}_n \quad (11)$$

利用箕舌线样条插值算法得到权值 \mathbf{w} 和控制点 \mathbf{q} 的迭代更新公式为

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu_w e_d(n) \dot{\varphi}_i(u) \mathbf{x}_n \quad (12)$$

$$\mathbf{q}_{i,n+1} = \mathbf{q}_{i,n} + \mu_q e_d(n) \mathbf{C}^T \mathbf{u}_n \quad (13)$$

式中: μ_w, μ_q 分别表示权值 \mathbf{w} 和控制点 \mathbf{q} 的学习率。

2 脉冲干扰

本文脉冲干扰由 Alpha 稳定分布表示, $\alpha \in (0, 2]$ 代表稳定性指标的特性指数, 确定脉冲强度, $\beta \in [-1, 1]$ 是对称参数, $l>0$ 是色散参数, δ 是位置参数^[10], 可

以表示为

$$f(t) = \exp \{ j\delta t - t |t|^\alpha [1 + j\beta \operatorname{sgn}(t) S(t, \alpha)] \} \quad (14)$$

其中

$$S(t, \alpha) = \begin{cases} \tan(\alpha\pi/2), & \alpha \neq 1 \\ (2/\pi)\lg|t|, & \alpha = 1 \end{cases} \quad (15)$$

本实验脉冲干扰的参数设置为: $\alpha = 1.6, \beta = 0, \gamma = 0.05, \delta = 0$ 。

3 仿真结果

在仿真系统中, 利用给出的箕舌线样条插值算法进行实验。假设未知系统的线性权重为 $w^* = [0.6, -0.4, 0.25, -0.15, 0.1]^T$, 非线性部分为 $q^* = \{-2, -1.8, \dots, -1.0, -0.8, -0.91, 0.42, -0.01, -0.1, 0.1, -0.15, 0.58, 1.2, 1.0, 1.2, \dots, 2.0\}$, 滤波系统的权值初始化为 $w_0 = [1, 0, 0, 0, 0]^T$, 控制点初始化为 $-2 \sim 2$ 斜率为 1 的一条直线。

输入信号采用 50 000 个样本, 输入信号表示为

$$x(n) = rx(n-1) + \sqrt{1-r^2}\xi(n) \quad (16)$$

式中: $\xi(n)$ 为符合 $(0, 1)$ 分布的白高斯噪声; $r \in [0, 1]$ 为相关参数。在未知系统的输出端添加信噪比为 30 dB 的白噪声 $v(n)$, $r = 0.1, a = 0.35, p = 3$, 学习率设置为 $\mu_w = \mu_q = 0.01$ 。经过 100 次独立实验。

图 2 展示了利用箕舌线样条插值算法中非线性插值子模块的控制点优化结果, 从图中可以看出, 经过系统滤波的红色曲线能够较好地与期望蓝色曲线相一致。图 3 展示了采用箕舌线样条插值算法的线性 FIR 子模块的权重优化, 从图中可以看出, 滤波的权重值和期望的权重值相一致, 说明所提算法具有较好的估算系统权值的性能。

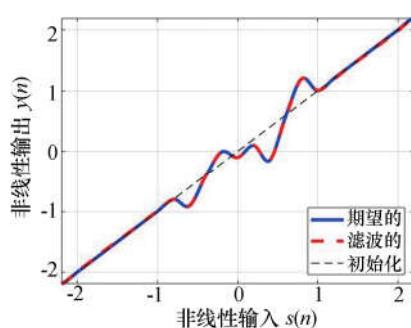


图 2 非线性插值子模块控制点优化

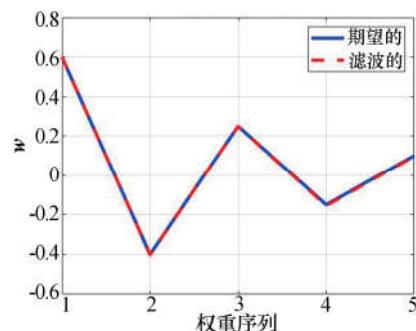


图 3 FIR 线性子模块权重优化

图 4 为箕舌线样条插值算法与最小均方样条插值算法抑制脉冲干扰后的误差曲线图, 从图中可知, 本文提出的算法展现出较好的抑制效果。

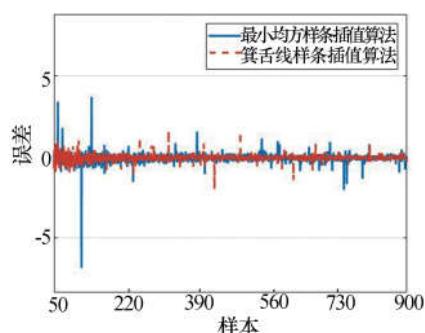


图 4 箕舌线样条插值算法与最小均方样条插值算法抑制脉冲干扰误差曲线对比

4 结束语

本文研究了基于箕舌线样条插值算法抑制脉冲干扰的方法, 通过引入箕舌线函数, 与样条插值算法相结合形成箕舌线样条插值算法。根据箕舌线样条插值算法估算的系统权值, 提升了系统的估算精度。仿真结果表明: 与最小均方样条插值算法相比, 本文提出的算法能够更好地抑制脉冲干扰。接下来, 本研究将会进一步探讨提出的算法对其他类型的非高斯干扰的抑制效果。

参 考 文 献

- [1] 赵集. Alpha 稳定分布环境下自适应滤波算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
ZHAO Ji. Research on adaptive filtering algorithms under Alpha stable distributed environments [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [2] 白尕太, 罗昀, 陈国斌, 等. 基于线性调频信号的空

- 时自适应杂波谱估计[J]. 电子信息对抗技术, 2021, 36(1): 14–17.
- BAI Gatai, LUO Yun, CHEN Guobin, et al. Chirp based space time clutter spectrum estimation for stap radar by sparse representation [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2021, 36(1): 14–17.
- [3] ZHAO H Q, ZHANG J S. A novel nonlinear adaptive filter using a pipelined second-order Volterra recurrent neural network[J]. Neural networks, 2009, 22(10): 1471–1483.
- [4] GUARNIERI S, PIAZZA F, UNCINI A. Multilayer feed-forward networks with adaptive spline activation function [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(3): 672–683.
- [5] SCARPINITI M, COMMUNIELLO D, PARISI R, et al. Nonlinear spline adaptive filtering[J]. Signal Processing, 2013, 93(4): 772–783.
- [6] 王 侠, 王进军, 杨战社. 基于三次样条插值的非线性调频雷达信号设计[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2017, 40(4): 797–803.
- WANG Xia, WANG Jinjun, YANG Zhanshe. Nonlinear frequency modulation radar signal design based on the cubic spline interpolated[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2017, 40(4): 797–803.
- [7] 张薇薇. 箕舌线自适应滤波算法的分析与改进[J]. 西安邮电大学学报, 2013, 18(1): 74–77.
- ZHANG Weiwei. On tongue-like curve adaptive filtering algorithm[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2013, 18(1): 74–77.
- [8] 梁 锐, 魏阳杰. 自适应 B 样条小波函数模糊距离测量 [J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(3): 503–515.
- LIANG Rui, WEI Yangjie. Adaptive distance measurement method with blur of B-spline wavelet function[J]. Journal of Image and Graphics, 2021, 26(3): 503–515.
- [9] HUANG F Y, ZHANG J S, ZHANG S. Maximum vorsoria criterion-based robust adaptive filtering algorithm[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2017, 64(10): 1252–1256.
- [10] 芦 璐. Alpha 稳定分布噪声环境下的自适应滤波算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- LU Lu. Adaptive filtering algorithm in the presence of Alpha stable noise[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

作者简介:

郭文燕 女, 1991 年生, 博士研究生, 研究方向为信号处理;

智永锋 男, 1979 年生, 博士, 教授, 研究方向为信号处理、雷达抗干扰处理等。