

基于自适应滤波的随掘地震去噪方法研究

高 川¹, 郭立全²

¹安徽皖北煤电集团有限责任公司, 安徽 宿州

²安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年5月19日; 录用日期: 2025年6月14日; 发布日期: 2025年7月9日

摘 要

针对煤矿巷道盾构随掘地震信号受环境噪声干扰严重的问题, 提出一种基于自适应滤波的随掘地震信号去噪方法。首先通过设计基于自适应滤波算法的滤波器, 通过动态更新滤波器权重实现干扰噪声的自适应抵消, 并引入滑动窗口能量检测机制自适应调节收敛步长, 平衡稳态误差与收敛速度。数值模拟结果表明: 该方法在输入信噪比为10.43 dB的干扰条件下, 输出信噪比提升至39.41 dB, 验证了本文所提算法可以抑制随掘地震信号中的干扰噪声, 为后续处理提供高信噪比地震数据。

关键词

随掘地震, 去噪, 自适应滤波

Research on Seismic Signal Denoising Method for Tunneling Drilling Based on Adaptive Filtering

Chuan Gao¹, Liquan Guo²

¹Anhui Wanbei Coal and Electricity Group Co., Ltd., Suzhou Anhui

²School of Geoscience and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: May 19th, 2025; accepted: Jun. 14th, 2025; published: Jul. 9th, 2025

Abstract

Aiming at the problem that the seismic signals during tunneling drilling in coal mines are severely interfered with by environmental noise, a seismic signal denoising method for tunneling drilling based on adaptive filtering is proposed. Firstly, a filter based on the adaptive filtering algorithm is designed. The interference noise is adaptively cancelled by dynamically updating the filter weights,

and a sliding window energy detection mechanism is introduced to adaptively adjust the convergence step size, balancing the steady-state error and convergence speed. The numerical simulation results show that under the interference condition with an input signal-to-noise ratio of 10.43 dB, the output signal-to-noise ratio is increased to 39.41 dB, verifying that the proposed algorithm can suppress the interference noise in the seismic signals during tunneling drilling and provide high signal-to-noise ratio seismic data for subsequent processing.

Keywords

Tunneling Drilling Seismic, Denoising, Adaptive Filtering

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着煤矿智能化建设的大力推进,采掘工作面智能化不断升级[1]-[3]。传统超前探测在施工时为提高采集数据质量,降低现场环境的噪声干扰,需要停止掘进生产活动,降低了掘进的效率;而现有盾构施工要求满足不停采连续监测的需求,因此随掘地震探测技术应运而生。与常规地震勘探相比,随掘地震探测具有安全、实时、探掘同步等优势,保障了掘进的效率[4][5]。但由于在掘进的过程中环境复杂,盾构机械本身的振动和电磁干扰等因素影响,随掘地震采集的信号存在噪声干扰,很大程度上降低了数据的信噪比,影响随掘地震超前探的效果。为提升随掘地震数据的信噪比,不少学者对此进行了研究。程久龙等[6]对人工蜂群算法做出改进,并将其作为独立分析方法的优化算法,能够较好地分离随掘地震记录中的有效信号和干扰噪声信号;刘强[7]基于 L1 范数约束反演的煤矿随掘噪声压制方法,分别运用模拟数据和实际数据证实了其去噪结果的优势;董烈乾等采用自适应中值滤波方法压制混叠噪声[8];张庆淮等用加权偏振滤波压制 OBN 纵波分量中的地震噪声[9];高川等采用煤田地震属性滤波识别小断层[10];黄友亮等采用基于自适应中值滤波对高炉渣颗粒进行去噪[11]。

以上地震滤波只对某一类地震信号噪声压制效果较好,无法动态自适应调整参数以滤除随掘地震信号采集过程中随时间变化的随机噪声信号。为解决随掘地震连续信号噪声干扰问题,本文提出一种基于自适应滤波算法的信号去噪技术,通过设计基于自适应滤波算法的滤波器,通过动态更新滤波器权重实现干扰噪声的自适应抵消,提高信号的信噪比,为后续数据处理提供保障。

2. 自适应滤波方法原理

地震自适应滤波是一种基于自适应算法的信号处理技术,主要用于从含噪地震信号中提取有效信号。其核心思想是输入信号通过参数可调数字滤波器后产生输出信号,将其与期望信号进行比较,形成误差信号,通过自适应算法对滤波器参数进行调整,最终使误差信号的均方值最小。自适应滤波可以利用前一时刻已得的滤波器参数的结果,自动调节当前时刻的滤波器参数,以适应信号和噪声未知的或随时间变化的统计特性,从而实现最优滤波。

假设含噪信号 $D(n)$ 由输入信号 $X(n)$ 和含噪信号 $N(n)$ 构成,其表达式为:

$$D(n) = X(n) + N(n) \quad (1)$$

输出信号则表示为:

$$Y(n) = \sum_{i=0}^M W_i(n) X(n-k) \quad (2)$$

引入自适应权系数 $\omega(n)$, 则式(2)可以表达为:

$$Y(n) = D^T(n) \omega(n) \quad (3)$$

误差信号 $e(n)$ 则表示为:

$$e(n) = D(n) - Y(n) = D(n) - D^T(n) \omega(n) \quad (4)$$

采用式(4)的均方根误差作为信号评价标准, 其计算公式如下:

$$\begin{aligned} \phi(n) = & E[D^2(n)] + \dots \\ & \dots + \omega^T(n) E[X(n) X^T(n)] \omega(n) - \dots \\ & \dots - 2E[D(n) X^T(n)] \omega(n) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\phi(n)$ 表示均方误差。

令 $P = E[D(n) X(n)]$, 则式(5)可以表示为:

$$\phi(n) = E[D^2(n)] + \omega^T R \omega - 2P^T \omega \quad (6)$$

对 $\phi(n)$ 关于 ω 求导并令其为零得最佳维纳解 ω^* :

$$\omega^* = R^{-1} P \quad (7)$$

采用最小均方根算法求解式(7), 得到迭代公式:

$$\omega(n+1) = \omega(n) + 2\mu e(n) X(n) \quad (8)$$

式中: $\omega(n+1)$ 为下一时刻权矢量, $\omega(n)$ 为当前权矢量, $2\mu X(n)$ 为加权系数。

3. 数值模拟

利用合成的连续随机信号模拟随掘地震测试数据。模拟信号 1 信号的长度 $T = 2000$ 如图 1(a), 加入噪声 $n(t) = 0.2 * \text{rand}(1, 2000)$, 得到得含噪信号如图 1(b)所示。

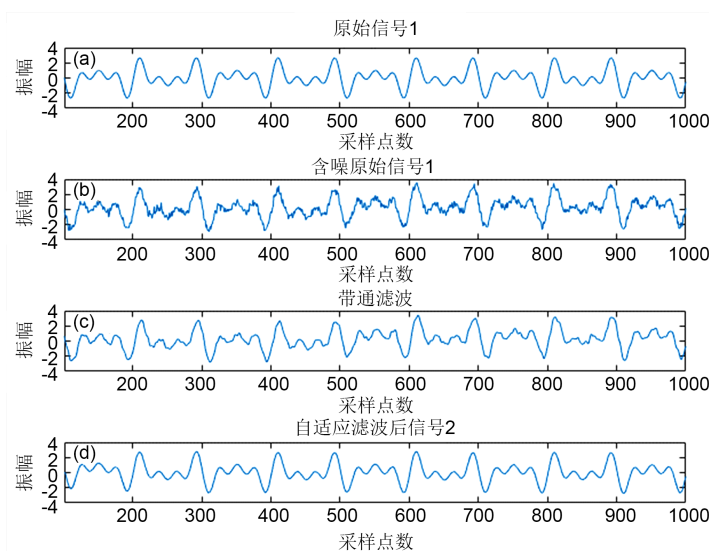


Figure 1. Comparison of different filtering effects of synthetic signal 1
图 1. 合成信号 1 不同滤波效果对比

分别采用常规带通滤波与自适应滤波对合成得连续信号去噪结果进行对比, 图 1(c)与图 1(d)的对比结果表明, 自适应滤波对含噪的连续随机信号去噪效果明显由于带通滤波, 其滤波后的信号特征轮廓与真实不含噪信号相一致, 反观带通滤波只保留的信号的主要特征轮廓, 在局部信号的细节恢复效果较差, “毛刺”信号较多, 而自适应滤波则可以保留真实信号的信号特征, 去噪后的信号更为光滑。此外, 为了更直观显示本文自适应滤波算法的优势, 引入信噪比评价准则, 表 1 显示自适应滤波后的信噪比由原来的 9.81 dB 提高到 44.43 dB, 高于带通滤波的 24.02 dB, 验证本文算法的准确性。

Table 1. Signal-to-noise ratio of different filtering algorithms
表 1. 不同滤波算法的信噪比

	原始信号(单位 dB)	带通滤波(单位 dB)	自适应滤波(单位 dB)
合成信号 1	9.81	24.02	44.43
合成信号 2	21.12	33.47	50.85

模拟随掘地震数据的合成信号 2 取信号的长度 $T = 2000$ 如图 2(a), 加入噪声 $n(t) = 0.5 \cdot \text{rand}(1, 2000)$, 得到的含噪信号如图 2(b)所示。

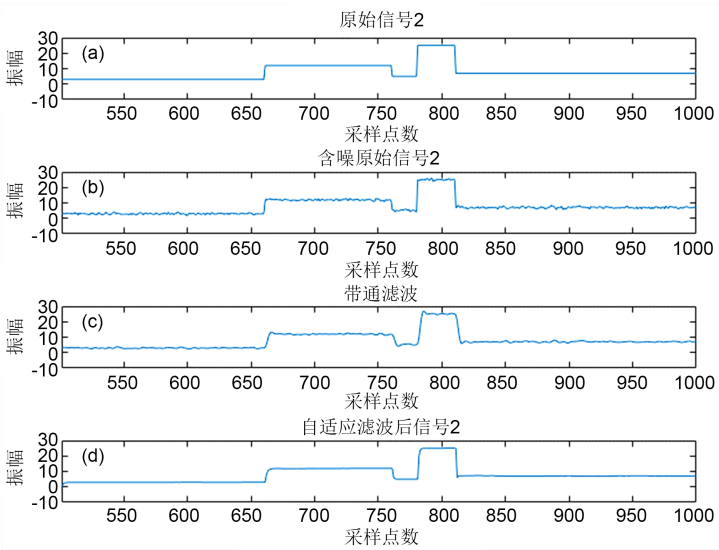


Figure 2. Comparison of different filtering effects of synthetic signal 2
图 2. 合成信号 2 不同滤波效果对比

分别采用常规带通滤波与自适应滤波对合成的连续信号去噪结果进行对比, 图 2(c)与图 2(d)的对比结果表明, 自适应滤波对含噪的连续随机信号去噪效果明显优于带通滤波, 在 $T = 0.657 \text{ s} \sim 0.666 \text{ s}$ 范围内, “台阶状”信号特征还原效果强于带通滤波, 在 $T = 0.780 \text{ s} \sim 0.810 \text{ s}$ 范围内, 其“马鞍状”特征恢复效果比常规滤波效果更佳, 更为平滑。此外, 为了更直观显示本文自适应滤波算法的优势, 引入信噪比评价准则, 表 1 显示自适应滤波后的信噪比由原来的 21.12 dB 提高到 50.85 dB, 高于带通滤波的 33.47 dB, 验证本文算法的准确性。

4. 结论

本文采用自适应滤波对连续随机信号进行滤波去噪, 较常规滤波算法获取的信噪比更高, 验证了本文所提算法的可行性。

参考文献

- [1] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.
- [2] 袁亮, 张平松. TBM 施工岩巷掘探一体化技术研究进展与思考[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 21-32.
- [3] 张平松, 李圣林, 郭立全. 矿井随掘地震震源时间函数及其模拟数据脉冲化处理研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 361-368.
- [4] 金丹. 随掘地震实时采集数据同步时差校正方法[J]. 煤田地质与勘探, 53(3): 190-196.
- [5] 邓立博. 煤矿随掘地震探测技术在隧道领域的应用研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44(3): 125-128.
- [6] 程久龙, 程鹏, 李亚豪. 基于 IABC-ICA 的随掘地震去噪方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 413-422.
- [7] 刘强. L1 范数约束的随掘地震噪声衰减[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2699-2705.
- [8] 董烈乾, 汪长辉, 李长芬, 等. 利用自适应中值滤波方法压制混叠噪声[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(4): 1475-1479.
- [9] 张庆淮, 王明星, 路交通. 用加权偏振滤波压制 OBN 纵波分量中的地震噪声[J]. 石油物探, 2023, 62(3): 462-470.
- [10] 高川, 陈炳心. 煤田地震属性滤波在小断层识别中的应用[J]. 能源与环境, 2024(2): 29-31.
- [11] 黄友亮, 孙广彤, 战胜, 等. 基于自适应中值滤波高炉渣颗粒小波去噪[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(9): 141-145.