

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416563

改进 DLMS 震动信号自适应滤波算法与 FPGA 实现*

马翔^{1,2} 李剑^{1,2} 贺斌^{1,2} 陈俞安^{1,2} 魏芦俊^{1,2}

(1. 中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室 太原 030051; 2. 中北大学信息探测与处理山西省重点实验室 太原 030051)

摘要: 在地下浅层爆炸震动信号滤波过程中, D-LMS 步长固定, 对时变信号处理不灵活, 易引发梯度噪声放大现象, 且其需要依赖有效信号或噪声的先验信息作为期望信号, 在地下浅层震动测试中这些信号通常未知。针对上述问题, 围绕地下浅层爆炸震动探测的需求, 对自适应滤波算法进行了研究, 结合归一化原理提出了改进 D-LMS 滤波算法, 并将其与传统算法在收敛速度、滤波精度方面进行了仿真对比, 结果表明此改进算法在震动测试自适应去噪中相比 D-LMS 算法滤波精度提高约 2.3 dB, 收敛速度提高约一倍。并将其部署于 ZYNQ PL 端, 设计了延迟模块、步长模块、系数更新模块、滤波模块和误差计算模块, 并封装成 IP 核, 嵌入采集系统进行地下浅层震动外场试验, 实验表明对实际震动信号, 滤波后信号明显优于未滤波信号, 证明了自适应滤波模块的有效性, 实现了震动信号的实时片上自适应去噪, 为地下浅层震动场重建提供了重要支撑。

关键词: 最小均方误差; 延时最小均方误差; 自适应滤波; 震动探测; ZYNQ; FPGA

中图分类号: TN713+.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Improved DLMS vibration signal adaptive filtering algorithm and
FPGA implementationMa Yixiang^{1,2} Li Jian^{1,2} He Bin^{1,2} Chen Yu'an^{1,2} Wei Lujun^{1,2}(1. State Key Laboratory of Dynamic Testing Technology, Collaborative Innovation Center, North University, Taiyuan 030051, China;
2. Shanxi Key Laboratory of Information Detection and Processing, North University, Taiyuan 030051, China)

Abstract: During the filtering process of explosion-induced vibration signals in shallow underground layers, the fixed step size of the D-LMS algorithm is not flexible enough for time-varying signal processing, which can easily lead to the amplification of gradient noise. Moreover, it relies on prior information about the effective signal or noise as the desired signal, which is usually unknown in shallow underground vibration testing. To address these issues and meet the needs of shallow underground explosion-induced vibration detection, an improved D-LMS filtering algorithm was developed based on normalization principles. This improved algorithm was compared with traditional algorithms in terms of convergence speed and filtering accuracy through simulations. The results showed that this improved algorithm achieved approximately 2.3 dB higher filtering accuracy and doubled convergence speed compared to the D-LMS algorithm in adaptive denoising of vibration testing. It was deployed on a ZYNQ programmable logic device, where modules for delay, step size, coefficient update, filtering, and error calculation were designed and encapsulated into an IP core. This core was integrated into the acquisition system for field tests of shallow underground vibrations. Experimental results demonstrated that the filtered signals were significantly better than unfiltered ones, confirming the effectiveness of the adaptive filtering module. This achieved real-time on-chip adaptive denoising of vibration signals, providing crucial support for the reconstruction of shallow underground vibration fields.

Keywords: least mean square; delay least mean square; adaptive filtering; vibration detection; ZYNQ; FPGA

0 引言

在地下浅层爆炸震动测试过程中, 高信噪比的爆炸震

动数据是后续数据分析的重要保障。由于震动测试环境的复杂性和不确定性, 所获取的震动信号中存在大量的噪声, 这些噪声会对后续的信号处理造成很大的干扰, 最小均

收稿日期: 2024-07-30

* 基金项目: 国家自然科学基金面上科学基金(62271453)、中央支持地方项目(YDZJSX2024D031)、山西省青年学术带头人项目(2024Q022)、山西省专利转化专项计划项目(202405004)资助

方误差 (least mean square, LMS) 自适应滤波算法凭借其结构简单、运算复杂度低、硬件资源消耗低等优点,被广泛应用于信号自适应去噪等领域^[1]。

LMS 算法是一种基于维纳滤波理论,采用瞬时值估计梯度矢量的算法,通过最小化误差信号的能量来更新权值系数的自适应滤波算法,自 1960 年提出后,凭借其算法简单、易实现等特点被广泛应用于回声消除、信号去噪等领域^[2-3]。但是其存在收敛速度慢、跟踪性能差等问题,因此,Ali 等^[4]对归一化最小均方算法 (normalized least mean squares, NLMS) 进行研究,该算法将输入信号的平方范数归一化处理,有效提高了算法的收敛速度,提高了算法鲁棒性。这两种算法在运行前都需要设定步长,步长较大时,收敛速度较快,稳态误差较大,反之收敛速度慢,稳态误差小。为解决此问题,学者们提出了许多可变步长的 LMS 算法 (variable step-size least mean squares, VSS-LMS)。Yu 等^[5]基于 Sigmoid 函数设计了新的步长规则;Zhang 等^[6]提出基于指数函数的变步长 LMS;Saeed 等^[7]以增量设置可变步长,能够适用于低信噪比情况;Huo 等^[8]基于反双曲正切函数实现步长因子的动态调整;李常虎等^[9]采用箕舌线更新步长因子;韦洪浪等^[10]利用双曲正弦函数构建变步长策略;Shahzad 等^[11]基于对数函数更新步长因子。上述方法基本遵循在运算前期采用较大的步长因子,随着算法的进行逐步将步长因子减小,以满足在达到较快收敛速度的前提下保持较小的稳态误差。

综上所述,LMS 自适应滤波算法及其改进算法在信号去噪领域均取得了显著成效。然而,这些算法都需要依赖有效信号或噪声的先验信息作为期望信号。在地下浅层震动测试中,这些信号通常是未知的,因此常规的 LMS 自适应滤波算法难以实现震动信号的自适应去噪。

1 改进 D-LMS 自适应滤波算法

爆炸震动信号是一种特殊的时变信号,其特性在传播过程中会发生显著变化^[12]。在靠近爆心的某一特定距离内,爆炸地震波的强度会迅速衰减,而距离更远时,衰减速度则会明显减缓。通过 LMS 自适应滤波技术,能够提高地下爆炸震动信号处理的效率和准确性。LMS 自适应滤波器结构图^[13]如图 1 所示。其中, $x(n)$ 为输入信号, $y(n)$ 为滤波器的输出信号, $d(n)$ 为期望信号, $e(n)$ 为误差信号。

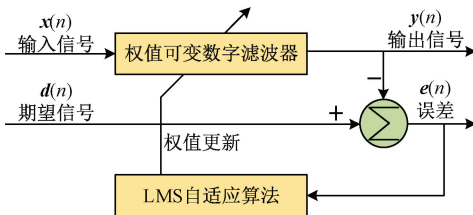


图 1 LMS 自适应滤波器结构图

Fig. 1 LMS adaptive filter structure diagram

LMS 自适应滤波算法通过最小化 $e(n)$ 的均方值更新滤波器权值,达成自适应滤波的效果。LMS 自适应滤波器的表达式如下:

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n) \quad (1)$$

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{d}(n) - \mathbf{y}(n) \quad (2)$$

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + 2\mu\mathbf{x}(n)\mathbf{e}(n) \quad (3)$$

其中, $\mathbf{w}(n)$ 是滤波器的权值向量, $\mathbf{x}(n)$ 是输入向量, $\mathbf{d}(n)$ 是期望向量, $\mathbf{y}(n)$ 是滤波器的输出向量, $\mathbf{e}(n)$ 是误差向量, μ 是步长因子,用来控制作用于滤波器系数矢量上的增量修正大小。

一般在使用 LMS 自适应滤波器进行信号降噪时,通常将测试信号中的有用信号或者噪声作为滤波器的输入,测试信号作为期望信号,这样滤波器的输出信号即为测试信号中的有用信号。然而在实际探测中,往往无法获得有用信号或噪声统计特性的先验信息^[14],为有效滤除环境噪声,实时获取高精度的爆炸震动波信号,本文设计了一种片上归一化延时最小均方误差 (normalized delay least mean squares, ND-LMS) 自适应滤波器。其模型图如图 2 所示,在 LMS 基础上,将传感器输出的原始信号作为期望信号,延迟一定点数 Δ 后作为自适应滤波器的输入信号,组成延时最小均方误差 (delay least mean squares, D-LMS)。同时将输入信号的平方范数归一化处理用于动态更新步长因子,将 LMS 自适应算法改进为 NLMS 自适应算法,在 D-LMS 基础上进一步组成 ND-LMS。

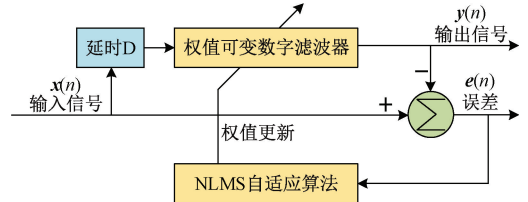


图 2 ND-LMS 自适应滤波器模型图

Fig. 2 ND-LMS adaptive filter model diagram

传感器的输出信号中包含有用的爆炸震动信号和无用的噪声信号,爆炸震动信号作为窄带信号,在延迟一定点数后,仍和原信号保持较好的相关性;而噪声信号作为宽带信号,延迟后的噪声信号与原噪声信号基本不相关。因此,当将传感器输出信号作为期望信号,延迟合适的点数 Δ 的原信号作为滤波器输入信号时,滤波器的输出信号即为有效爆炸震动信号的最佳估计^[15-16],即,D-LMS 能够较好地地实际测试中提高爆炸震动信号的信噪比。

但是在 D-LMS 算法中,步长因子 μ 是固定的,其值直接关系到滤波器的收敛速度和滤波效果。在实际的测试过程中,较大的步长会引发梯度噪声的放大现象,而较小的步长会导致收敛速度慢。为解决此问题,本文对输入向量的平方范数进行归一化处理,将固定步长因子的 LMS 自适应算法改进为根据输入信号实时调整步长的 NLMS 自适应算法,使步长因子 μ 在滤波的初始阶段较大,后期较小,在

保证较快收敛速度的同时也有较好的滤波效果。归一化的步长因子 μ 的更新公式为:

$$\mu(n) = \frac{1}{\|x(n)\|^2} = \frac{1}{x^T(n)x(n)} \quad (4)$$

将其代入式(3)中,得到 ND-LMS 算法的自适应滤波器权值更新公式为:

$$w(n+1) = w(n) + \frac{2}{x^T(n)x(n)}x(n)e(n) \quad (5)$$

2 滤波器关键参数选取

本文采用模拟地震子波对 ND-LMS 自适应滤波器进行性能测试。使用 MATLAB 生成一个阻尼拉伸正弦子波来表示地震震动信号,其表达式为:

$$L(t) = \frac{t^a \exp(-bt^c) \sin[2\pi f_p t / (1 + r_a t)]}{A_{\max}} \quad t \geq 0 \quad (6)$$

其中, f_p 为子峰值频率,即子波振幅谱最大值对应的频率; a, b, c, r_a 为给定的常数; $\sin[2\pi f_p t / (1 + r_a t)]$ 为拉伸正弦函数; $t^a \exp(-bt^c)$ 为阻尼包络; A_{\max} 为该阻尼包络的极大值。设定 $a = 1, b = 50, c = 1, r_a = 2, f_p = 60, A_{\max} = 0.98188$, 对其加入信噪比为 20 dB 的噪声。

ND-LMS 自适应滤波算法在进行 FPGA 硬件部署过程中,考虑到硬件实现的复杂度和滤波精度,需要对时延长度 Δ 、滤波器阶数 N 进行选取。

2.1 时延长度 $R_{xx}(\Delta)$

选择合适的时延长度保证延时后的信号中有效震动信号的相关性较高,无效噪声信号的相关性基本为 0。自相关函数的定义如下:

$$R_{xx}(\Delta) = E[x(n)x(n-\Delta)] \quad (7)$$

其中, $x(n)$ 表示原信号, $x(n-\Delta)$ 表示延时 Δ 个点后的信号。截取爆炸震动数据中有用震动信号和无用噪声信号各 512 点,分别计算自相关,运算结果图如图 3 所示。随着延时 Δ 的增大,有用震动相关系数越小,而无用噪声信号的相关系数则迅速衰减至 0。当 $\Delta=4$ 时,噪声的相关系数达到第一个最接近 0 的值,为 0.005 433,基本不再相关,而有用震动信号的相关系数为 0.997 2,仍保持高度相关。因此选定时延长度 $\Delta=4$ 。

2.2 滤波器阶数 N

选择合适的滤波器阶数 N ,在保证滤波效果的同时,尽量减小计算复杂度,节省硬件资源。

改变滤波器阶数 N 进行仿真,不同阶数信噪比对比图如图 4 所示,可以看出。当 $N \geq 14$ 时,信噪比已经基本稳定,综合滤波效果与硬件实现难度,选取滤波器阶数 $N = 16$ 。

3 改进 D-LMS 滤波器模块设计

通过上述分析,ND-LMS 自适应滤波算法能够较好地

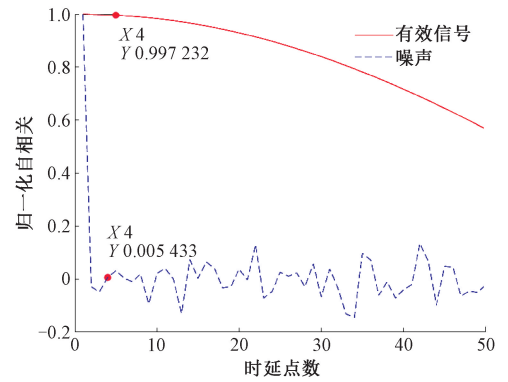


图 3 信号及噪声分别自相关结果图

Fig. 3 Signal and noise autocorrelation result plots

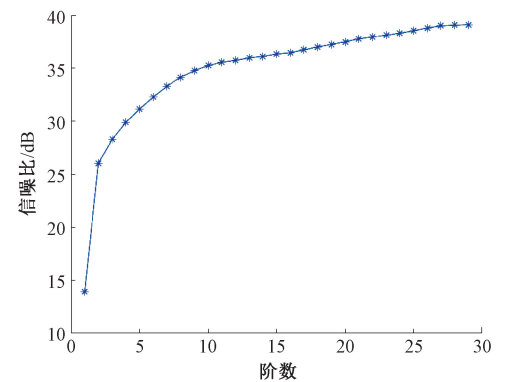


图 4 不同阶数信噪比对比图

Fig. 4 Comparison plot of signal-to-noise ratios at different orders

应用于地下浅层爆炸震动测试中,在保持较快收敛速度的同时拥有较高的滤波精度。本设计实验平台为 ZYNQ7020,在其 PL(programmable logic)部分设计片上自适应滤波模块。ZYNQ 芯片的 PL 部分集成了大量 25×18 乘法器、48 位累加器和预加法器等资源,能使其实现高效的数学运算,从而达成实时片上信号处理的目标。在 ZYNQ 上实现 ND-LMS 自适应滤波算法,具体实现流程如图 5 所示。

在 VIVADO 工具下,使用 Verilog 语言依次实现各模块功能,设计完成的 RTL 图如图 6 所示,其中, $data_in[23:0]$ 表示爆炸震动信号的输入, $data_o[23:0]$ 表示去噪后的信号, $error_o[23:0]$ 表示误差信号;延迟模块对输入信号延时 4 个点,作为 ND-LMS 滤波器的输入;步长模块用于更新滤波器的步长;系数更新模块用于更新滤波器的抽头系数;滤波模块用于对输入信号进行滤波,该模块完成对信号与滤波器抽头系数的相乘相加;误差计算模块用于计算信号误差。

最终封装完成的 ND-LMS 自适应滤波器 IP 核如图 7 所示。

综合实现后的资源占用情况如表 1 所示,可以看出所占资源较少,能部署于边缘端。其中由于 IP 核的 IO 端口

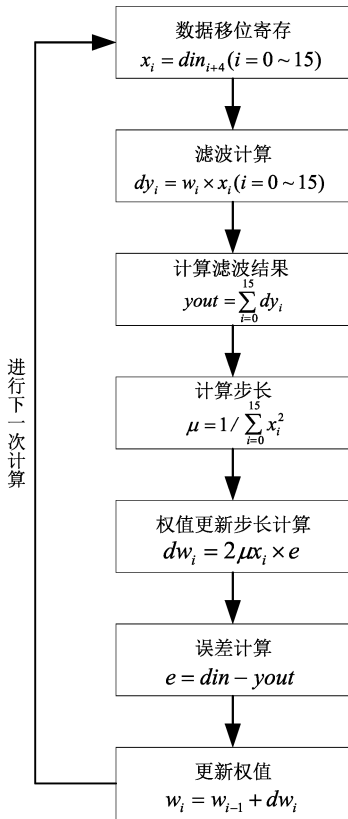


图 5 ND-LMS 自适应滤波器实现流程图

Fig. 5 ND-LMS adaptive filter implementation flowchart

实际使用时均为内部端口, IO 资源占用并无太大参考意义。

4 实验结果与分析

4.1 仿真测试

对添加高斯白噪声的模拟爆炸震动信号滤波, 其中, 最高峰之前加噪后信噪比为 10 dB, 最高峰之后加噪后信噪比为 20 dB, 使用阶数 16、延时点数 4 及步长因子 0.5 的 ND-LMS 滤波器, 结果如图 8 所示, 可知, ND-LMS 能随着时间变化自适应调整滤波器系数。

对 LMS、D-LMS 和 ND-LMS 方法进行对比, 将滤波器阶数统一设置为 16, 将 ND-LMS 和 D-LMS 滤波器的延时点数设置为 4, D-LMS 和 LMS 滤波器的步长因子设置为 0.5, 采用这 3 种算法分别对爆炸震动信号进行 1 000 次自适应滤波。滤波后的波形如图 9 所示, 其误差收敛曲线如图 10 所示。计算滤波后的信号的信噪比, 3 种算法的平均信噪比如表 2 所示。

结合图 9、10 和表 2, 可以看出, ND-LMS 算法的收敛速度和收敛精度明显优于 LMS 算法和 D-LMS 算法。D-LMS 算法在约 120 点后趋于平稳, ND-LMS 算法在约 60 点后趋于平稳。ND-LMS 相比 D-LMS 收敛速度提高约一倍, 滤波后的信号信噪比提高了约 2.3 dB。ND-LMS 明显改善了 D-LMS 收敛速度慢的缺点, 拥有更高的精度, 能够更好地完成爆炸震动信号的自适应去噪。

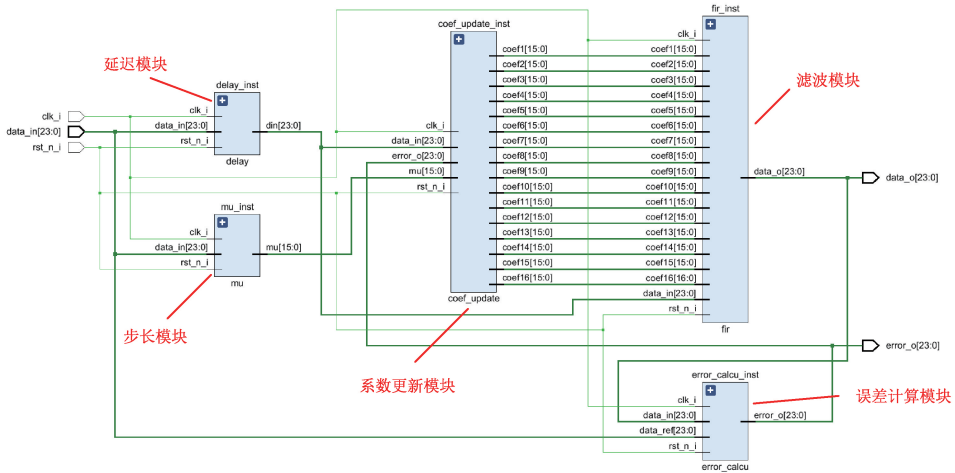


图 6 ND-LMS 硬件实现 RTL 图

Fig. 6 ND-LMS hardware implementation RTL schematic

4.2 外场实验测试

对搭载自适应滤波模块的震动探测系统进行外场实验测试, 验证自适应滤波模块的性能和有效性。

采用 8 个三轴加速度传感器进行实验, 其中, 1 # 至 4 # 传感器所用采集系统搭载了自适应滤波模块; 5 # 至 8 # 传感器所用采集系统未对震动信号进行处理, 直接将原始震动信号上传。外场实验传感器布置图如图 11 所

示, 采用 TDIS3800 可控冲击震源作为击打震源, 在距震源正东和正西方向 5 m 处各埋设 4 个震动传感器, 所有传感器保持方向一致, 理想情况下, 这些传感器测得的信号特性应该相同。最后将所有数据导入 MATLAB 中进行分析。现场布置图如图 12 所示。

测试完成后, 以传感器的 z 轴为例, 绘制 8 个传感器叠加的波形图和幅频特性图, 如图 13 和 14 所示, 可以看出,

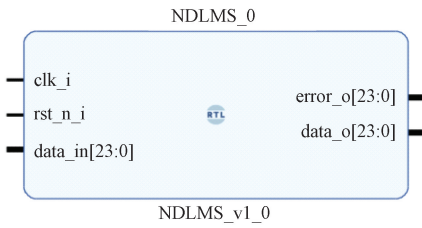


图 7 ND-LMS 自适应滤波器 IP 核

Fig. 7 ND-LMS adaptive filter IP core

表 1 ND-LMS IP 核资源占用情况

Table 1 ND-LMS IP core resource utilization

资源	占用资源数量	可用	占用总资源百分比
LUT	308	53 200	0.58
LUTRAM	24	17 400	0.14
FF	441	106 400	0.41
DSP	19	220	8.64
IO	74	125	59.20

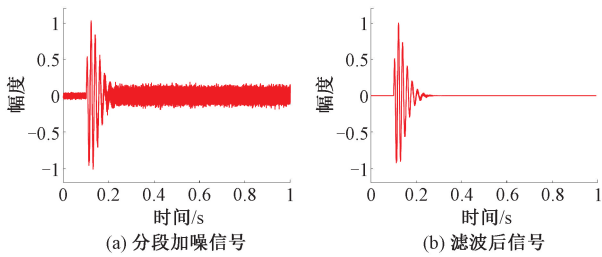


图 8 时变信号滤波前后对比

Fig. 8 Comparison of time-varying signal before and after filtering

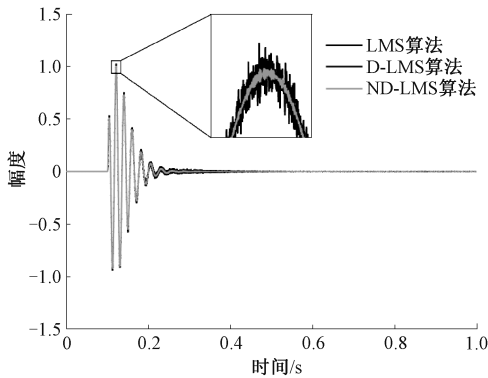


图 9 不同 LMS 算法去噪结果对比

Fig. 9 Comparison of denoising results using different LMS algorithms

8 个传感器获取的波形信号形状基本一致,震动波能量处于相同频带范围内,主要集中于 0~300 Hz 内。

将 1# 传感器获取信号作为参考,其他传感器信号分别与 1# 传感器数据作互相关,互相关系数值如图 15 所

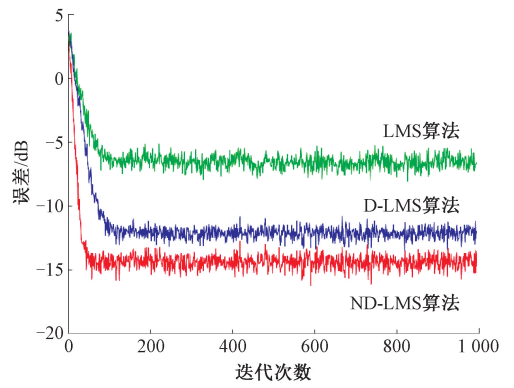


图 10 不同 LMS 算法误差收敛曲线

Fig. 10 Error convergence curves of different LMS algorithms

表 2 不同 LMS 算法去噪结果信噪比对比

Table 2 Comparison of signal-to-noise ratio in denoising results using different LMS algorithms

算法	平均信噪比/dB
LMS	28.441 2
D-LMS	31.427 5
ND-LMS	33.756 0

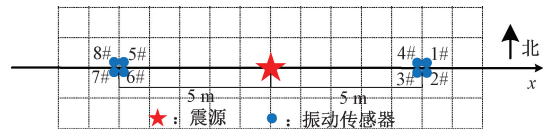


图 11 外场实验传感器布设图

Fig. 11 Field experiment sensor deployment diagram

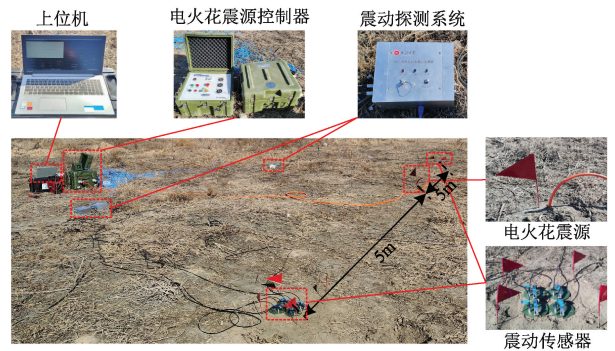


图 12 外场实验现场布设图

Fig. 12 Field experiment site deployment diagram

示,2#~4# 传感器的数据与 1# 传感器的相关系数均在 95% 以上,表明 4 个传感器获取的震动信号高度相关;而 5#~8# 传感器与 1# 传感器的相关系数集中于 75%~85% 之间,仍具有较高的相关性。5#~8# 传感器与 1#~4# 传感器获取的信号差异一方面来源于测试环境土地的非一致性,另一方面是由于 1#~4# 传感器经过片上信号预处理,5#~8# 传感器未经过任何处理。由此可

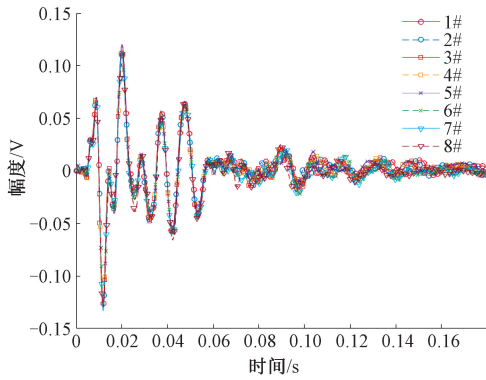


图 13 各传感器 z 轴叠加时域图

Fig. 13 Time domain superposition plot of sensor z-axis data

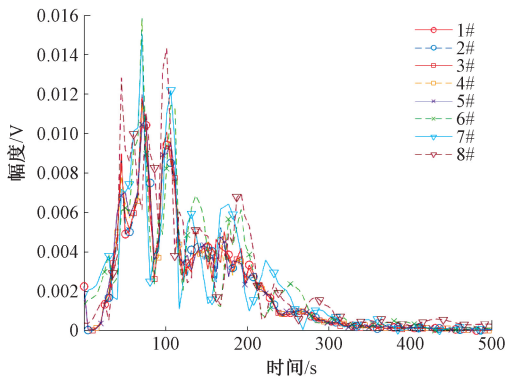


图 14 各传感器 z 轴叠加频谱图

Fig. 14 Spectral superposition plot of sensor z-axis data

见,片上预处理能对不同的传感器自适应调整滤波器系数,使其整体与标准传感器保持一致。

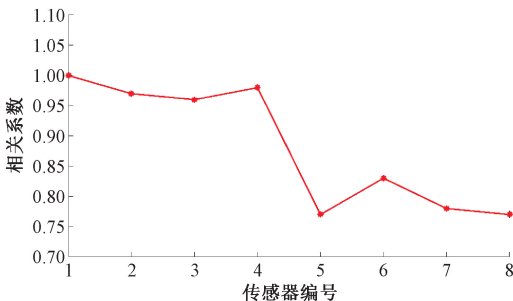


图 15 各传感器与 1# 传感器互相关系数图

Fig. 15 Cross-correlation coefficient plot between each sensor and sensor #1

抽取 1# 传感器和 5# 传感器的 z 轴波形,并进行局部放大,结果如图 16 所示,可以看出,1# 传感器的信号未经过片上处理,存在较多的毛刺,噪声较大;5# 传感器的信号经过片上自适应滤波,几乎看不到毛刺存在,信号质量较高。经过滤波,信噪比提升了约 9 dB,表明片上 ND-LMS 自适应滤波能够有效去除环境噪声,提高信号信噪比。

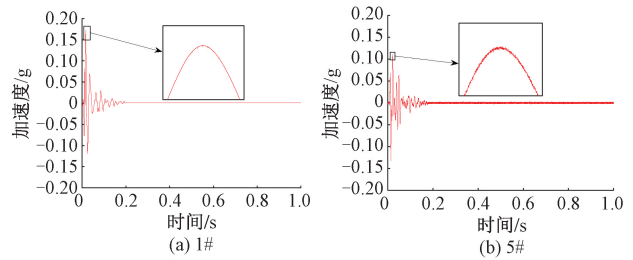


图 16 传感器实测信号对比图

Fig. 16 Comparison plot of sensor measured signals

5 结 论

本文以地下浅层爆炸震动测试为背景,针对测试过程中对震动信号高信噪比获取的需求,设计了基于 ZYNQ 的 ND-LMS 滤波模块,对爆炸震动信号的滤波效果相比 D-LMS 信噪比提升约 2.3 dB,收敛速度提高约 1 倍,明显优于 LMS 和 D-LMS,并证明了其有效性和可行性,实现了更优的片上实时自适应滤波模块。

参考文献

- [1] 甄国涌,王森,程茜茜.一种改进的 LMS 自适应滤波算法[J].舰船电子工程,2023,43(12):76-79,118.
ZHEN G Y, WANG S, CHENG X X. An improved LMS adaptive filtering algorithm[J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(12): 76-79,118.
- [2] YU C, GU R, WANG Y Y. The application of improved variable step-size LMS algorithm in sonar signal processing [C]. 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference(ITNEC), 2020: 1856-1860.
- [3] 徐金石,杨立东.基于多窗谱减和 LMS 在工厂中的去噪实现[J].电子测量技术,2021,44(24):66-71.
XU J SH, YANG L D. Implementation of denoising in factory based on multi-window spectral subtraction and LMS[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(24): 66-71.
- [4] ALI A, MOINUDDIN M, AL-NAFFOURI T Y. NLMS is more robust to input-correlation than LMS: A proof[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2022, 29: 279-283.
- [5] YU W, CHENG Q, GUAN S H. Improved variable step-size least mean square algorithm based on sigmoid function[J]. Procedia Computer Science, 2022, 199: 1466-1473.
- [6] ZHANG H L, ZHANG Y M, LIU C, et al. Research on variable step size LMS algorithm based on exponential function [C]. 2023 5th International Conference on Electronics and Communication, Network and Computer Technology(ECNCT), 2023:

- 164-167.
- [7] SAEED M O B, PASHA S A, ZERGUINE A. A variable step-size incremental LMS solution for low SNR applications [J]. *Signal Processing*, 2021, 178: 107730.
- [8] HUO Y L, AN Y Q, GONG Q, et al. Variable step size LMS algorithm based on inverse hyperbolic tangent function[J]. *Transactions of Beijing institute of Technology*, 2022, 42(10): 1051-1058.
- [9] 李常虎, 伍松, 魏晟弘, 等. 箕舌线变步长 LMS 算法的分析与改进[J]. *广西科技大学学报*, 2022, 33(4): 57-62.
- LI CH H, WU S, WEI SH H, et al. Analysis and improvement of the dipper LMS algorithm with variable step size[J]. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*, 2022, 33(4): 57-62.
- [10] 韦洪浪, 余伟, 赵黎, 等. 基于双曲正弦函数设计变步长的 LMS 算法[J]. *计算机仿真*, 2023, 40(11): 336-340, 451.
- WEI H L, YU W, ZHAO L, et al. Design of LMS algorithm with variable step-size based on hyperbolic sine function [J]. *Computer Simulation*, 2023, 40(11): 336-340, 451.
- [11] SHAHZAD K, WANG R, JAMSHID J. A novel approach to geometric algebra-based variable step-size LMS adaptive filtering algorithm[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2024, 18(1): 837-846.
- [12] 孙苗, 吴静, 吴立, 等. 基于 CEEMDAN•MPE-NHT 的爆破地震波信号时频分析[J]. *爆破*, 2023, 40(4): 183-191.
- SUN M, WU J, WU L, et al. Time-frequency analysis of blasting seismic signals based on CEEMDAN MPE-NHT[J]. *Blasting*, 2023, 40(4): 183-191.
- [13] 刘建涛, 席闯, 姜海洋. 基于 LMS 算法的自适应滤波器性能分析[J]. *舰船电子工程*, 2021, 41(12): 36-39.
- LIU J T, XI CH, JIANG H Y. Performance analysis of adaptive filter based on LMS algorithm[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2021, 41(12): 36-39.
- [14] FERDIADI Y, BASIR, SAHRAN, et al. Simulation of active noise reduction using LMS algorithm: Synthetic and field data[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1951(1): 012042.
- [15] 刘泽鹏, 苏新彦, 孔庆珊, 等. FPGA 的 D-LMS 自适应滤波器设计[J]. *单片机与嵌入式系统应用*, 2020, 20(10): 43-45.
- LIU Z P, SU X Y, KONG Q SH, et al. Adaptive filter design of D-LMS based on FPGA [J]. *Microcontrollers and Embedded Systems*, 2020, 20(10): 43-45.
- [16] LI J, LI M J, MENG M, et al. The on-chip D-LMS filter design method of wireless sensor node based on FPGA[J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020: 1-16.

作者简介

马翔翔, 硕士研究生, 主要研究方向为 FPGA 数据采集与处理。

E-mail: 1109822025@qq.com

李剑(通信作者), 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为多维信号获取系统嵌入式开发、阵列化信号处理与重建等。

E-mail: lijian@nuc.edu.cn