

基于 L1 范数自适应匹配滤波的重叠超声信号分离研究

侯懿桃¹ 王黎明¹ 聂鹏飞¹ 简晓煜¹ 张楠¹ 贾彩琴²

(1. 中北大学信息与通信工程学院 太原 030051; 2. 中北大学大数据学院 太原 030051)

摘要:在使用低频超声 TOF 技术对大厚度多层复合介质测厚时,超声反射回波之间容易出现有效回波和近表面干扰波重叠现象且难以分离,从而影响 TOF 的测量精度。针对此类问题,提出了基于 L1 范数的自适应匹配方法,基于时空域中近表面干扰表现出规律一致性,而有效回波则展现出推移特性的不同特征,在时空域对采集的超声阵列信号进行自适应匹配处理,实现有效回波和近表面干扰波的分离,从而增强有效回波的分辨率。仿真数据处理结果证明了所提方法的有效性,信噪比提高了 3 dB。实验结果表明,该方法能高效解决重叠超声信号分离的问题,在固体火箭发动机测厚场景中展现出广阔的应用前景。

关键词:低频超声;大厚度多层介质;L1 范数自适应匹配;重叠信号分离

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on overlapping ultrasound signal separation based on L1 norm adaptive matched filtering

Hou Yitao¹ Wang Liming¹ Nie Pengfei¹ Lin Xiaoyu¹ Zhang Nan¹ Jia Caiqin²

(1. College of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Big Data College, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: When using low-frequency ultrasonic TOF technology to measure the thickness of thick multi-layer composite media, there is a tendency for valid echoes and near surface interference waves to overlap and be difficult to separate between ultrasonic reflection echoes, which affects the measurement accuracy of TOF. In response to such problems, this article proposes an adaptive matched filtering processing method based on L1 norm. Based on the spatiotemporal consistency of near-surface interference, effective echoes exhibit distinct transition characteristics. In the spatiotemporal domain, the collected ultrasound array signals are adaptively matched to achieve the separation of effective echoes and near surface interference waves, thereby enhancing the resolution of effective echoes. The simulation data processing has demonstrated the effectiveness of the proposed method, with a 3 dB increase in signal-to-noise ratio. The experimental results show that this method can efficiently solve the problem of overlapping ultrasonic signal separation, and has shown broad application prospects in thickness measurement scenarios of solid rocket engines.

Keywords: low-frequency ultrasound; large thickness multi-layer media; L1 norm adaptive matching; overlapping signal separation

0 引言

采用低频超声 TOF 技术对多层复合结构进行测厚时,会存在干扰波和有效信号重叠的问题,使回波隐含信息难以准确获取。因此,研究重叠信号分离方法对提高超

声检测精度至关重要。目前,对于重叠信号的分离方法大体上包括反卷积方法、信号稀疏表示方法以及盲分离方法。

超声反射法中超声信号可视为系统脉冲响应和材料反射序列卷积的结果,反卷积可以看作一个具有稀疏性假

设的非凸优化问题,其中的回波响应及反射序列均不明确。Li等^[1]提出一种稀疏最小熵反卷积方法,恢复出了镀锌板超声缺陷检测信号中的反射序列,并实现了界面回波与缺陷回波的有效分离。何智成等^[2]同样采用最小熵反卷积实现了焊点超声信号的多回波分离。Gao等^[3]采用反卷积方法分离 TOFD 重叠回波,使用 ADMM 结合盲增益校准来获得超声脉冲回波响应的初始近似值,并通过 PALM 算法加快了迭代的收敛速度,鲁棒性强。孔垂硕等^[4]利用盲反卷积信号复原算法重建超声合成孔径信号,提高了超声合成孔径图像分辨率。Hourani等^[5]通过构建变分框架对从超声传感器获得的超声图像进行反卷积,优化了超声图像质量。王岳宁等^[6]通过反卷积算法对采集到的原始信号进行处理,再将处理后的信号按照延时求和成像算法重建为图像,此方法可以减轻信号间的重叠,最终减轻图像中的重叠,令图像中的微小结构和细节信息得以展现。Yi等^[7]基于盲信号处理提出了一种改进的基于自适应广义形态滤波器的频域盲目反卷积算法,该算法降低了噪声信号分离的复杂度,但滤波可能导致估计结果不准确。但在实际应用中,由于存在材料晶粒散射和声波衰减效应等影响因素,接收到的回波信号会产生不同程度的波形变化且无规律性,此时重叠的多个回波将不能共用同一个系统脉冲响应进行反卷积处理,由此产生了局限性。

基于过完备字典的稀疏表示问题是一个非凸问题,目前,其求解方法主要有基追踪^[8]、FOCUSS方法^[9]等凸松弛算法,以及一些贪婪追踪算法,如匹配追踪^[10]和其衍生出的正交匹配追踪、基于智能优化算法的追踪方法等。Mor等^[11]在利用匹配追踪算法进行层状胶接接头退化检测的基础上,设计了一个仅包含接头退化前采集信号的小字典库,然后依据设定的物理模型对字典原子进行更新,以获得退化开始后回波信号的估计值,证明了该方法分解重叠回波的有效性。Javad等^[12]针对导波重叠信号的提取问题,提出了基于频散的匹配追踪稀疏表示(SDMP)算法,在信噪比较低时,也能将隐藏在导波信号中的缺陷回波成功分离,且分解结果具有较强稀疏性。张敏婧^[13]基于 Nakagami 模型设计符合超声回波信号特征的过完备原子字典,对传统的正交匹配追踪算法做出改进,提高了回波近似精确度,使得重叠信号分离效果得到改善。在对低频超声重叠信号处理应用中,信号组成成分较杂乱,导致必备的过完备字典难以生成,因此,信号稀疏表示方法并不能很好地适用于本研究信号的处理。

基于 ICA 的盲源信号分离算法作为一种分离重叠信号的有效方法,诸多学者对其进行研究改进^[14-17]。Zeng等^[18]提出弱相关源信号的分离算法,对只能处理不相关源信号的盲源分离法进行改进。奚琦^[19]在多源动态嘈杂场景中语音识别问题,提出了基于盲源聚类的自适应波束形成算法,提升了信号分离识别处理精度。黄珊等^[20]针对带噪重叠信号,提出了一种基于稀疏编码和 EFICA 的盲分离方法,能有效将带噪声的重叠信号进行盲分离。

孟庆港等^[21]构建了盲源解混模型,经过解混分离后,可以分离出大部分的噪声扰动,获取较为纯净的有效信号,直接有助于匹配定位精度提高。

以上各种重叠信号分离处理方法主要基于信号在时域和频域的特征有显著差别,而使用低频超声 TOF 法测厚时,采集的单个回波信号在经过处理后无论在时域还是在频域上,都未表现出明显的特征差异,因此这些方法并不适用于此类重叠信号的分离中。对采集到的多条信号构成的阵列信号进行分析发现近表面干扰波在时空域呈现出一定的规律性,而有效超声回波信号显示出了不一样的向后推移特性。结合二维时空域的差异性,先前学者在分离重叠信号时采用了 L2 范数匹配滤波算法,但阵列信号图像由于过平滑引起失真,效果不佳。因此,本文将基于 L1 范数的自适应匹配滤波算法应用于超声重叠回波信号的分离上,通过仿真数据和实验数据的处理结果对比分析,验证了该算法的有效性。

1 L1 范数自适应相减算法

采集的超声信号是由表面直达干扰波、噪声干扰以及有效的回波共同构成的,为了对该信号进行处理以消除干扰,介绍了一种基于 L1 范数的自适应相减算法来压制直达干扰波的能量,从而恢复出有效底面回波。

通过 L1 范数自适应匹配相减,将滤波算子作用于干扰波模型得到预测干扰波,经过匹配处理后的预测干扰波与实际的直达干扰波在振幅和相位上更接近,原始回波数据在与其作差后得到有效波数据阵列,从而获得更好的压制效果。上述 2D 自适应匹配算法的数学模型为:

$$D_s = D - Mf \quad (1)$$

式中: D 代表原始的超声信号数据阵列; M 代表由杂波干扰信号组成的数据矩阵; D_s 表示经过匹配滤波处理后的有效波数据阵列; f 则代表 2D 匹配滤波算子。

上述过程可以通过引入能量最小化来实现,即:

$$\operatorname{argmin} \|D - Mf\|_1 \quad (2)$$

对 f 求偏导,令偏导等于 0,可得:

$$M^T M f = M^T D \quad (3)$$

则 L1 范数下 2D 匹配滤波算子为:

$$f = (M^T M)^{-1} M^T D \quad (4)$$

通过梯度下降法优化滤波算子矩阵 f ,使目标函数最小化,目标函数由两部分组成,数据残差的平方和和滤波算子矩阵的正则化项:

$$C = \sum \|r\|_F^2 + \lambda \|f\|_1 \quad (5)$$

其中数据残差 r 表示为:

$$r = S - D \cdot f \quad (6)$$

λ 表示 L1 范数的正则化参数,用于平衡数据残差和滤波算子的 L1 范数在目标函数中的权重。

计算梯度 $g = \operatorname{sign}(r) + 2 \cdot \lambda \cdot f$,以更新滤波算子,则更新后的滤波算子为:

$$f_1 = f - l \cdot g \quad (7)$$

式中： l 用来调整参数更新的步长，平衡算法的收敛速度与稳定性，以达到较好的收敛性能。

2 仿真实验数据处理

本文针对的研究对象为以固体火箭发动机为代表的多层复合材料结构工件，为研究推进剂的燃烧规律，在COMSOL构建一个二维模型如图1所示，激励探头和接收探头采用压电材料，一发一收布局以模拟换能器发射和接受超声信号；多层复合材料构件部分共分3层，由上至下分别为钢壳层、绝热层和推进剂层，整个模型长度设为600 mm，其中，钢壳层与绝热层共设厚度10 mm，为模拟厚度变化的状态，推进剂层初始厚度设置为199 mm，之后的仿真模型中推进剂层厚度以2 mm依次减小，以模拟实际的厚度变化。

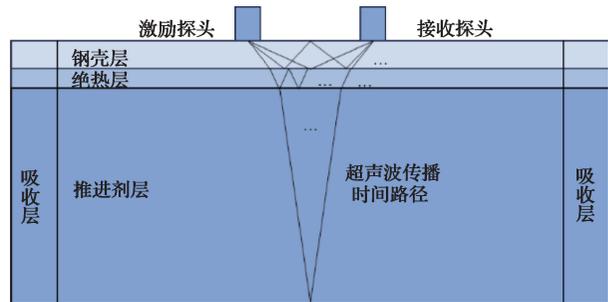


图1 多层结构模型

Fig. 1 Multi-layer structural model

为了使仿真过程尽可能接近于实际检测效果，手动添加仿真材料的相关属性参数，包括材料密度、压力波速度、剪切波速度和声阻抗等，仿真中模型各层介质材料属性及参数如表1所示。

表1 模型介质材料属性参数

Table 1 Model medium material property parameters

材料层	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	压力波速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	剪切波速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	声阻抗/($\times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
钢壳层	7 800	5 900	3 230	45.3
绝热层	970	1 603	926	1.2
推进剂层	1 670	1 757	962	2.8

为更好地模拟超声波在多层结构介质中的传播规律，选用阻尼余弦子波作为激励源模拟低频超声信号，其表达式为：

$$y = \cos(2\pi f_0 t) \exp[-B(f_0 t)^2] \quad (5)$$

式中：信号主频率 $f_0 = 50 \text{ kHz}$ ， $B = 0.1$ 为阻尼常数，激励源阻尼余弦子波的波形图及频谱图如图2所示。

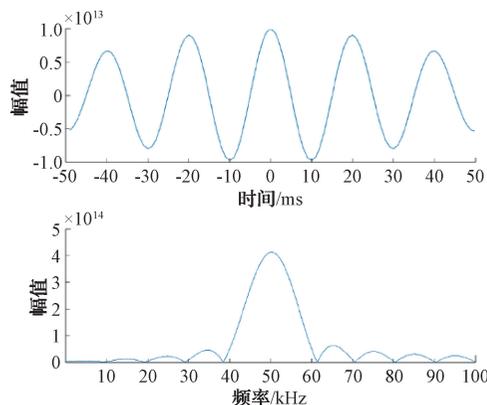


图2 激励源信号及其频谱

Fig. 2 Excitation source signal and its spectrum

将多物理场模型仿真获得的推进剂层厚度从199降至1 mm依次变化的100组低频超声信号数据以阵列形式呈现可得低频超声信号阵列能量图如图3所示，可以看出，钢壳层直达波能量与底面回波能量差异很大，大能量的直达波干扰信号会影响到对有效的底面回波信号的识

别与提取，因此，需要对钢壳直达波信号能量进行压制，从低频超声回波数据中分离出有效的底面回波信号。

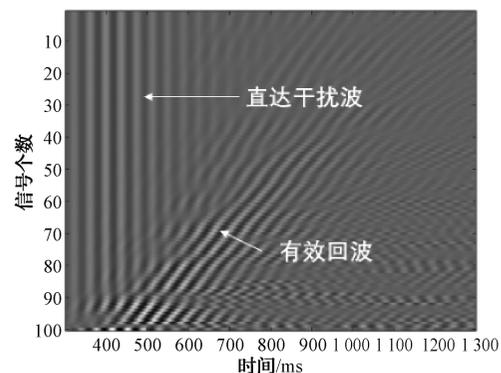


图3 低频超声仿真信号阵列能量图

Fig. 3 Energy diagram of low-frequency ultrasound simulation signal array

以此阵列信号作为原始超声回波信号模型 D 使用 L_2 、 L_1 范数自适应匹配算法进行分离处理，选取厚度为199 mm时的干扰杂波和有效回波未重叠的信号构建杂波模型 M ，设置 L_2 自适应匹配滤波器正则化参数 $\lambda_2 = 0.01$ ， L_1 自适应匹配滤波器步长 $l = 0.02$ ，正则化参数 $\lambda_1 = 0.01$ 。处理后信号能量结果如图4所示，从能量结果图可以看出，在信号重叠较小时， L_2 、 L_1 范数自适应匹配算法都能在一定程度上压制掉大能量的钢壳直达干扰波，但当信号重叠较大时， L_1 范数自适应匹配算法分离效

果更好,保留了更完整的有效底面回波数据。

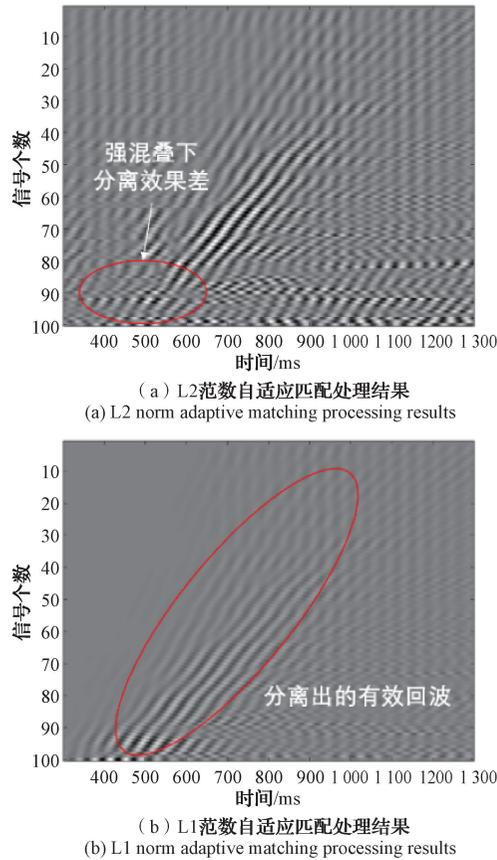


图4 仿真数据处理结果

Fig. 4 Simulation data processing result chart

选取干扰杂波和有效波出现重叠现象的厚度分别为39、25和13 mm的信号,截取3个信号的第0.1~0.5 ms的信号进行处理前后的波形对比,以分析自适应匹配处理的分离效果,结果如图5所示。

由图5可以看出,相较于L2自适应匹配方法,L1自适应匹配方法对钢壳层直达干扰波的压制效果更显著,在解决强重叠信号的分离问题时,有效回波信号的提取效果更佳。

为了进一步验证算法的有效性,引入信噪比(SNR)来衡量处理前后信号与干扰噪声之间相对强度。计算自适应匹配前原始信号 D 和干扰信号 M 的信号能量 E_D 和 E_M ,进而计算出处理前的信噪比:

$$SNR_{\text{处理前}} = 10 \log \frac{E_D}{E_M} = 4.6 \text{ dB}$$

自适应匹配处理后,得到处理后的数据 d ,利用 d 中未重叠的一条信号构建出自适应匹配处理后的杂波信号 m ,计算出 d 和 m 的信号能量 E_d 和 E_m ,得到算法处理后的信噪比:

$$SNR_{\text{L2}} = 10 \log \frac{E_d}{E_{m2}} = 5.7 \text{ dB}$$

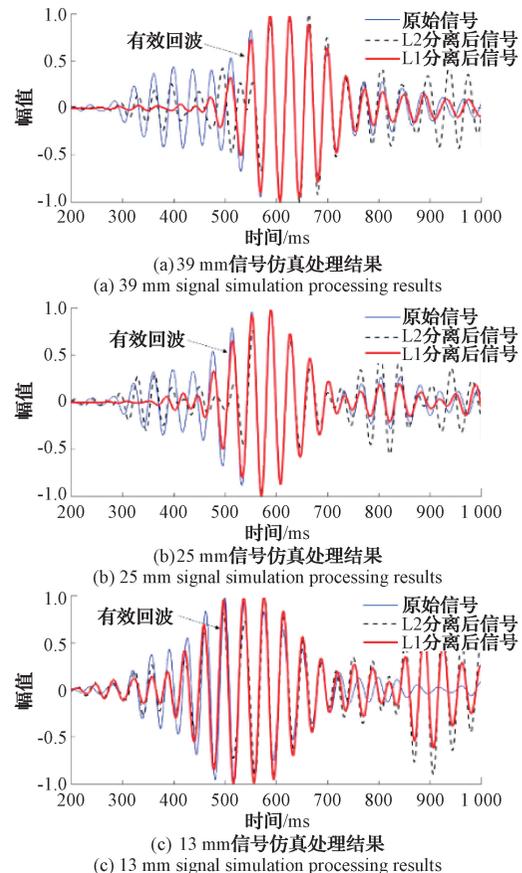


图5 仿真处理结果波形对比

Fig. 5 Comparison of waveform of simulation processing results

$$SNR_{\text{L1}} = 10 \log \frac{E_d}{E_{m1}} = 7.6 \text{ dB}$$

对比处理前后信噪比可知,L1自适应匹配方法较L2自适应匹配方法信噪比高1.9 dB,信号的质量得到改善,噪声强度降低了,从而使得噪声在信号中的影响减弱,对有效回波信号的识别更准确。

3 实验数据处理

在激励频率50 kHz、采样率6.25 MHz条件下,开展了面向大厚度模型点火检测实验,以验证算法有效性与实用性。采集了带噪超声回波信号并将其在时空域绘制成能量图,在燃烧过程中复合材料厚度会随着燃烧时间变化,因实验环境带来了剧烈噪声,各种超声信号成分均被淹没在强噪声下,进行去噪预处理后,原始低频超声信号阵列能量图如图6(a)所示,规律的直达杂波干扰非常明显,而且材料厚度存在明显后移现象。

对预处理后的原始超声实测阵列信号 D 使用L2、L1范数自适应匹配算法进行分离处理,选取未燃烧的信号构建杂波模型 M ,设置L2自适应匹配滤波正则化参数 λ_2 为0.01,L1自适应匹配滤波器步长为0.008,L1正则化参数

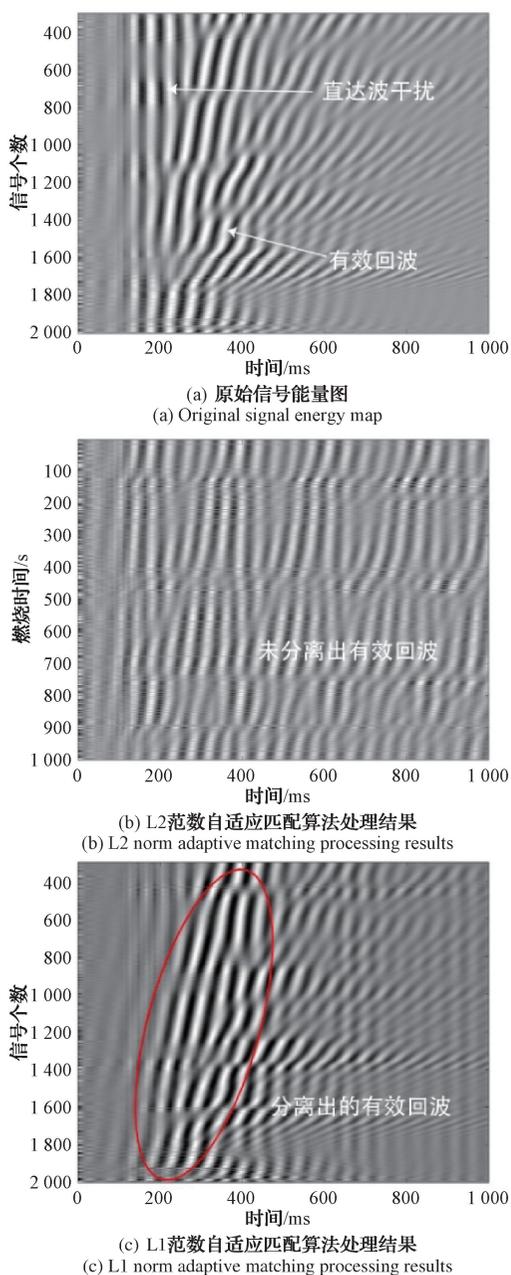


图6 实验信号处理结果能量对比

Fig. 6 Energy comparison of experimental signal processing results

λ_1 为 0.01, 图6所示为实验原始信号和经过处理后信号的能量结果对比。

由图6可以看出, 经过两种自适应匹配算法处理后, L2自适应匹配算法未分离出有效回波, L1自适应匹配算法在压制规律性高能钢壳层直达干扰波上表现出优越性, 更好地实现了逐渐推移的有效底面回波信号的清晰重建。选取经过处理后工作时间第15、30和40s的信号数据进行分离处理前后的波形对比, 如图7所示。

由图7可以看出, 基于L1范数的自适应匹配滤波算

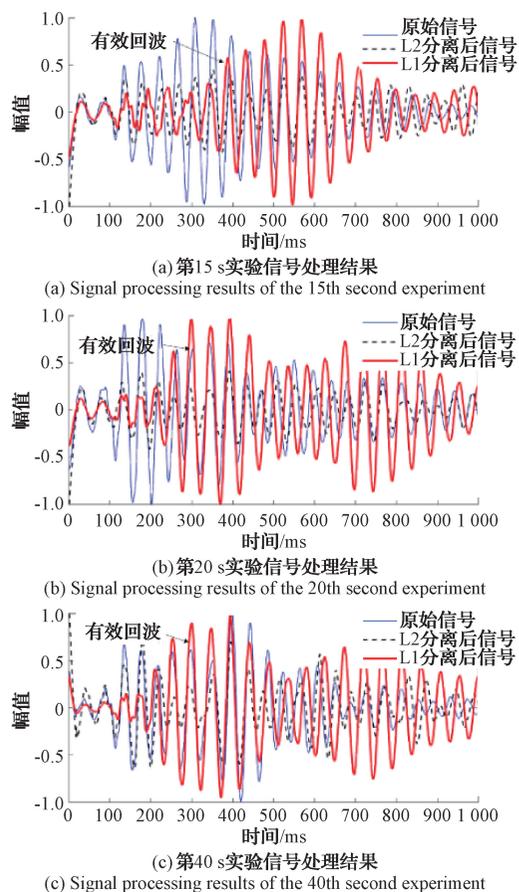


图7 实验信号处理结果波形对比

Fig. 7 Comparison of waveform of experimental signal processing results

法对实际场景中的信号分离处理效果比L2自适应匹配算法更好, 验证了此算法适用于对大厚度多层复合结构工件进行低频超声测厚的实测场景中。

4 结论

利用频率差异特征分离重叠信号是常用的分离手段, 然而采用低频超声TOF技术对大厚度多层复合结构工件测厚时, 采集到的重叠信号并没有明显的频率差异。本文根据此类重叠信号中近表面干扰波的规律性和有效底面回波的推移变化特性, 从时空角度出发, 采用基于L2、L1范数的自适应匹配滤波方法, 对采集到的信号进行处理, 分离干扰波和有效波。通过对仿真数据和实验数据的处理结果表明, L1自适应匹配算法较L2自适应匹配算法不仅更有效地压制了近表面干扰波, 同时也更好的保护了有效回波, 重叠信号分离效果更显著, 能解决固体火箭发动机测厚场景中的信号重叠问题, 有良好的应用前景。

参考文献

- [1] LI M, LI X, GAO C X, et al. Acoustic microscopy signal processing method for detecting near-surface

- defects in metal materials [J]. *NDT and E International*, 2019, 103: 130-144.
- [2] 何智成, 汲彦军, 成艾国. 基于最小熵解卷积的汽车点焊质量超声评价[J]. *焊接学报*, 2018, 39(8): 59-65, 132.
- HE ZH CH, JI Y J, CHENG AI G. Ultrasonic evaluation of automotive spot welding quality based on minimum entropy deconvolution [J] *Journal of Welding*, 2018, 39 (8): 59-65, 132.
- [3] GAO X Y, SHI Y B, DU K, et al. Sparse blind deconvolution with nonconvex optimization for ultrasonic NDT application [J]. *Sensors*, 2020, 20(23): 6946.
- [4] 孔垂硕, 罗林, 李金龙, 等. 基于盲反卷积的超声合成孔径图像复原[J]. *电子制作*, 2018(7): 92-94.
- KONG CH SH, LUO L, LI J L, et al. Ultrasound synthetic aperture image restoration based on blind deconvolution[J]. *Electronic Production*, 2018 (7): 92-94.
- [5] HOURANI M, BASARAB A, KOUAMÉ D, et al. Ultrasound image deconvolution using fundamental and harmonic images [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2021, 68(4): 993-1006.
- [6] 王岳宁, 郭成雯, 王育昕, 等. 基于反卷积算法的超声图像优化方法[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2023, 59(2): 247-255.
- WANG Y N, GUO CH W, WANG Y X, et al. Ultrasound image optimization method based on deconvolution [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2023, 59 (2): 247-255.
- [7] YI Z G, PAN N, GUO Y. Mechanical compound faults extraction based on improved frequency domain blind deconvolution algorithm[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 113: 180-188.
- [8] ADDI F A, BENTBIB A H, JBILOU K. Tensor sparse representation via Einstein product [J]. *Computational and Applied Mathematics*, 2024, 43(4): 222.
- [9] XIE K, SHI M, WANG P, et al. A multilayer FOCUSS approach for sparse representation [J]. *Cluster Computing*, 2017, 20(2): 1325-1332.
- [10] LIU C Y, ZHANG F, QIU W, et al. A perturbation analysis based on group sparse representation with orthogonal matching pursuit [J]. *Journal of Inverse and Ill-posed Problems*, 2020, 29(5): 653-674.
- [11] MOR E, ALADJEM M, AZOULAY A. A sparse approximation method for ultrasonic monitoring the degradation of adhesive joints [J]. *NDT and E International*, 2018, 98: 17-26.
- [12] JAVAD R, PETER T, FANG Z. Sparse and dispersion-based matching pursuit for minimizing the dispersion effect occurring when using guided wave for pipe inspection[J]. *Materials*, 2017, 10(6): 622.
- [13] 张敏婧. 基于稀疏表示的低频超声重叠信号分离方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- ZHANG M J. Research on separation method of low frequency ultrasound overlapping signals based on sparse representation [D]. Taiyuan: Central North University, 2022.
- [14] PARIMALA G A, VIJAYAN S. Upgrading sparse NMF algorithm for blind source separation through adaptive parameterized hybrid kernel based approach[J]. *Measurement*, 2019, 143: 11-21.
- [15] GAO L, DING P, ZHENG N, et al. Enhanced NMF separation of mixed signals in strong noise environment [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 84649-84657.
- [16] MIKA D, BUDZIK G, JOZWIK J. Single channel source separation with ICA-based time-frequency decomposition[J]. *Sensors*, 2020, 20(7): 1-16.
- [17] LI Y, WANG Y, DONG Q. A novel mixing matrix estimation algorithm in instantaneous underdetermined blind source separation [J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2020, 14(5): 1001-1008.
- [18] ZENG T, LIU C. A two-stage separation algorithm for weak correlation source signals [J]. *Wireless Personal Communications*, 2021, 117 (3): 2441-2452.
- [19] 奚琦. 基于盲源分离的自适应波束形成算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- XI Q. Research of adaptive beamforming algorithm based on blind source separation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [20] 黄珊, 杜庆治. 带噪重叠语音信号盲分离算法研究[J]. *软件导刊*, 2018, 17(1): 74-76, 80.
- HUANG SH, DU Q ZH. Research on blind separation algorithm for noisy overlapping speech signals [J]. *Software Guide*, 2018, 17 (1): 74-76, 80.

- [21] 孟庆港,汪金花,王赛楠,等. MEMS IMU 实测磁信号 MNMF 盲源分离降噪及匹配定位分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 1-15 [2024-07-12]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230186>.
MENG Q G, WANG J H, WANG S N, et al. MEMS IMU measured magnetic signal MNMF blind source separation, noise reduction, and matching localization analysis [J/OL]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 1-15 [2024-

07-12]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230186>.

作者简介

侯懿桃,硕士研究生,主要研究方向为超声信号处理。
E-mail:Hyt19834040247@163.com

王黎明(通信作者),博士,教授,博士生导师,主要研究方向为无损检测技术。
E-mail:wlm@nuc.edu.cn