

图文信息技术

基于 SVD-Rife 算法的声表面波应变传感器高精度解调方法设计

刘亚军, 白召, 王韵霏, 金依欣, 刘宏业, 范彦平
(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: **目的** 提出一种可用于储运材料表面应变检测的声表面波 (SAW) 检测方法, 设计一种基于 SVD-Rife 算法的高精度 SAW 应变传感器解调方法。**方法** 利用 SVD 方法实现对 SAW 谐振器回波信号去噪, 以提高解调精度; 基于 Rife 算法设计一种谱细分估计方法, 该方法可减少系统的硬件要求, 提高谱估计精度。**结果** 对设计的解调方法进行了仿真和实验, 仿真结果表明估计方差得到改善, 最大误差为 0.25 kHz。对提出的 SAW 应变传感器进行了实验, 得到的传感器线性度为 1.45%, 重复性为 1.09%, 与传统的解调方法相比线性度得到改善。**结论** 实验结果显示所设计的解调方法可用于储运材料表面应变的检测。

关键词: 声表面波 (SAW); SVD 去噪; Rife 算法; 频率估计

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)09-0215-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.09.033

Design of High Precision Demodulation Method for Surface Acoustic Wave Strain Sensor Based on SVD-Rife Algorithms

LIU Ya-jun, BAI Zhao, WANG Yun-fei, JIN Yi-xin, LIU Hong-ye, FAN Yan-ping

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a surface acoustic wave (SAW) method for surface strain detection of packaging materials and design a demodulation method of SAW strain sensor with high precision based on SVD-Rife algorithm. SVD method was used to denoise the SAW resonator echo signal in order to improve the demodulation accuracy. Based on Rife algorithm, a spectral subdivision estimation method was designed, which could lower the hardware requirements of the system and improve the spectral estimation accuracy. The demodulation method designed was simulated and experimented. The simulation results showed that, the estimated variance was improved and the maximum error was 0.25 kHz. Finally, the proposed SAW strain sensor was tested. The linearity of the sensor was 1.45% and the repeatability was 1.09%. Compared with the traditional demodulation method, the linearity of the sensor was improved. The experimental results show that the demodulation method designed can be used to detect the surface strain of packaging materials.

KEY WORDS: SAW; SVD; Rife algorithm; frequency estimation

收稿日期: 2019-10-13

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (51705325, 51705326)

作者简介: 刘亚军 (1995—), 男, 上海理工大学硕士生, 主攻 SAWR 回波信号解调方法。

通信作者: 范彦平 (1983—), 男, 博士, 上海理工大学副教授, 主要研究方向为声表面波传感器及信号处理。

一些特殊物品,例如易燃、易爆强腐蚀性的危险化学品,在运输和储存过程中需要对其状态进行实时监测。储运材料表面的应变是一个重要参数,可以反映内部物质的所处状态,因此,对储运材料表面的应变检测具有非常重要的意义。国内外学者已提出了许多储运材料表面应变的检测方法,如微波法^[1]、纳米技术^[2]、光纤法^[3]、应变片法等。目前的检测方法不能很好地用于储运材料表面应变检测,特别是危险化学品储运材料。微波法易受温度、气压等影响;纳米法原理复杂,且使用的石墨烯材料成本较高而无法大规模工程应用;光纤的微弯损耗影响大,且光纤易断,需要光路链接;应变片测试过程中需要供电,易漏电、维护不便。

声表面波(SAW)传感器无线无源特性特别适合易燃易爆场合的物理量检测,同时具有测量精度高、体积小、准数字输出等特点,因此,可把SAW传感器用于储运材料表面应变的检测。SAW传感器的本质是被检测物理量的变化会引起SAW谐振器(SAWR)的频率变化,通过测量SAWR回波信号的频率变化量可得到被测量的大小。由于SAW传感器本身没有能量放大的机制,SAWR回波信号能量非常弱,并且持续时间很短。此外,无线信道和接收单元中的噪声也会增加频率估计的难度,因此,利用声表面波技术实现储运材料表面应变检测还需解决SAWR回波信号解调问题,文中就提出一种基于SVD-Rife算法的SAWR回波信号高精度解调方法。

1 理论分析

1.1 SAW应变传感器敏感机理

声表面波(SAW)应变传感器工作在射频频段,便于集成在无线系统中,具有无线无源的独特优势^[4-5],可应用于危险化学品等的储运材料表面力学量检测。SAW应变传感器主要由阅读器和敏感单元2部分组成,见图1。阅读器通过天线发射一定带宽的

射频信号,被SAW器件上天线接收,并激励出SAW。当激励信号停止后,SAW通过压电基片的压电效应又转换电信号,该信号经谐振器上的天线辐射出而被阅读器所接收。如果当储运材料表面应变发生变化时,传递到SAW器件基片上的应变也跟着变化,从而导致声表面波的频率发生相应的变化,这种变化可以提取出来标定储运材料表面应变的变化,从而实现储运材料表面应变的测量^[6]。

2.2 SVD降噪理论

SAW谐振器回波信号中包含大量噪声,为了提高解调精度需要对回波信号去噪。奇异值分解(SVD)是一种有效的信号处理方法,通过观察数据对矩阵进行奇异值分解,可以有效地将信号与噪声分开。设回波信号构成信号矩阵A,即:

$$A = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_k] \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中: x_1, x_2, \dots, x_k 为离散的回波信号点; N 为回波信号点数量。利用矩阵重构将A写成B的形式,基于信号的重构矩阵奇异值分解技术是一种能量分析方法(能量较大的信号对应较大的奇异值,能量较小的信号对应较小的奇异值)。该回波信号信噪比较高,是阻尼振动的正弦信号,故可提取能量较大的奇异值与其对应的奇异矢量达到降噪的目的^[7]。

首先将原始信号A利用时间序列重构吸引子轨迹矩阵构成 $m \times n$ 矩阵B,即:

$$B = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_n \\ x_{n+1} & x_{n+2} & x_{n+3} & \dots & x_{2n} \\ x_{2n+1} & x_{2n+2} & x_{2n+3} & \dots & x_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{(m-1)n+1} & x_{(m-1)n+2} & x_{(m-1)n+3} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

SVD的分离效果因 m, n 的取值不同有很大区别,因此如何选择 m, n 是一个关键问题^[8]。文中采用信息量的方法确定 m, n 的值,方法如下:取一系列不同的行数 m 构造矩阵,见式(3)。

$$\eta_i = \lambda_i / (\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p) \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (3)$$

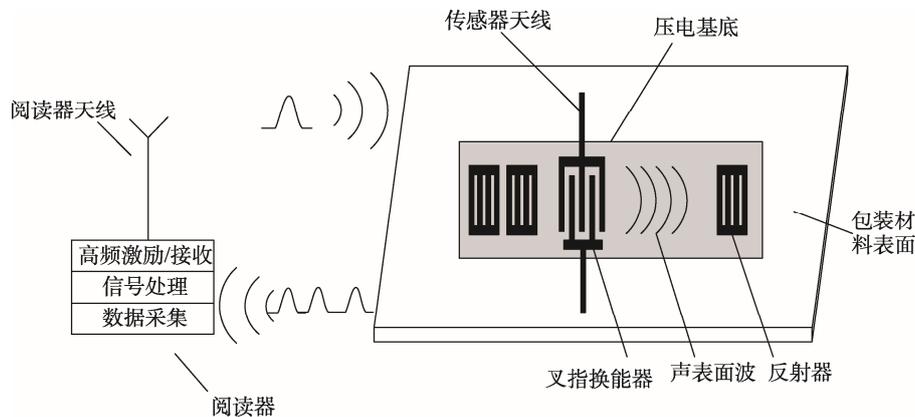


图1 SAW应变传感器组成及工作原理

Fig.1 Composition and working principle of SAW strain sensor

式中： $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ 为矩阵 B 的非零奇异值； η_i 为第 i 个非零奇异值 λ_i 对应的信息量。相应矩阵的奇异值计算各分量信号的信息量，并观察它们的变化趋势。当信息量 η_i 开始趋于 0 时，这表明第 i 各分量之后的其他分量并无多大意义，此时可确定矩阵行数 $m=i$ ，则 $n=\text{int}(N/m)$ 。根据经验，选取前 2 个奇异值作为信号部分，其余奇异值作为噪声部分过滤掉，则重构的信号变成式 (3)。再将式 (3) 还原成时间序列，从而达到了降噪的效果^[9]。

$$\hat{B} = U \text{diag}(\lambda_1 \ \lambda_2 \ \dots \ \lambda_i) V^T = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_i] \text{diag}(\lambda_1 \ \lambda_2 \ \dots \ \lambda_i) [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_i]^T \tag{4}$$

式中：矩阵 U, V 分别为 $m \times m, n \times n$ 维正交矩阵； u_i, v_i 分别为 U, V 的第 i 个行向量。

SAWR 回波信号是一个衰减震荡信号。为了验证所述方法的有效性，生成一个 SAWR 回波信号 $y(n) = \sin(2\pi \cdot f \cdot n / f_s) \cdot e^{-0.007n}$ ，信号频率 $f=968 \text{ kHz}$ ，采样频率 $f_s=6.25 \text{ MHz}$ 信号点数 $N_0=350$ ，信号波形见图 2，加入信噪比为 6 dB 的高斯白噪声后，波形见图 2b。为了提高回波信号频率估计精度，减少信道噪声干扰，通常先对回波信号进行限幅放大，见图 2c。对该信号进行 SVD 去噪后得到的信号波形见图 2d。SAWR 回波信号解调的本质是找到最大谱对应的频

率值而非最大谱值的绝对幅值。通过对比图 2d 与图 2c 可以发现，虽然去噪后的信号出现了波形和幅值的畸变，但此时信号已经出现有规律的周期变化特征，噪声得到抑制，这说明所设计的去噪方法可以有效地去除白噪声干扰，有利于提高信号频率估计结果。

衰减震荡信号在不同的信噪比下，SVD 与小波去噪方法的处理结果见图 3。从图 3 中可以发现小波去噪方法对信噪比在 2 以内的信号去噪效果好于 SVD 去噪，但是随着信噪比增大，小波分解去噪的效果变差，而 SVD 去噪的峰值信噪比始终保持在 51 dB 左右，去噪效果更加稳定，适合对实际信号去噪。

2.3 Rife 算法原理及改进

为了从去噪后的回波信号中准确提取出应变信息，需要对信号进行频率估计。目前许多学者采用 FFT 法实现对 SAWR 回波信号频率的解调^[10-12]。因 FFT 算法的精度与 FFT 变换点数有关，点数越多，估计精度越高，但是计算耗时越长，对系统要求越高^[13]，由于 SAW 阅读器中的 DSP 资源有限，因此不能进行长度很长的 FFT 运算。Rife 算法是一种基于 FFT 插值的高精度频率估计方法，对硬件要求低，可在较少计算点数下实现频率高精度估计，因此，该方法可用于 SAWR 回波信号的解调。

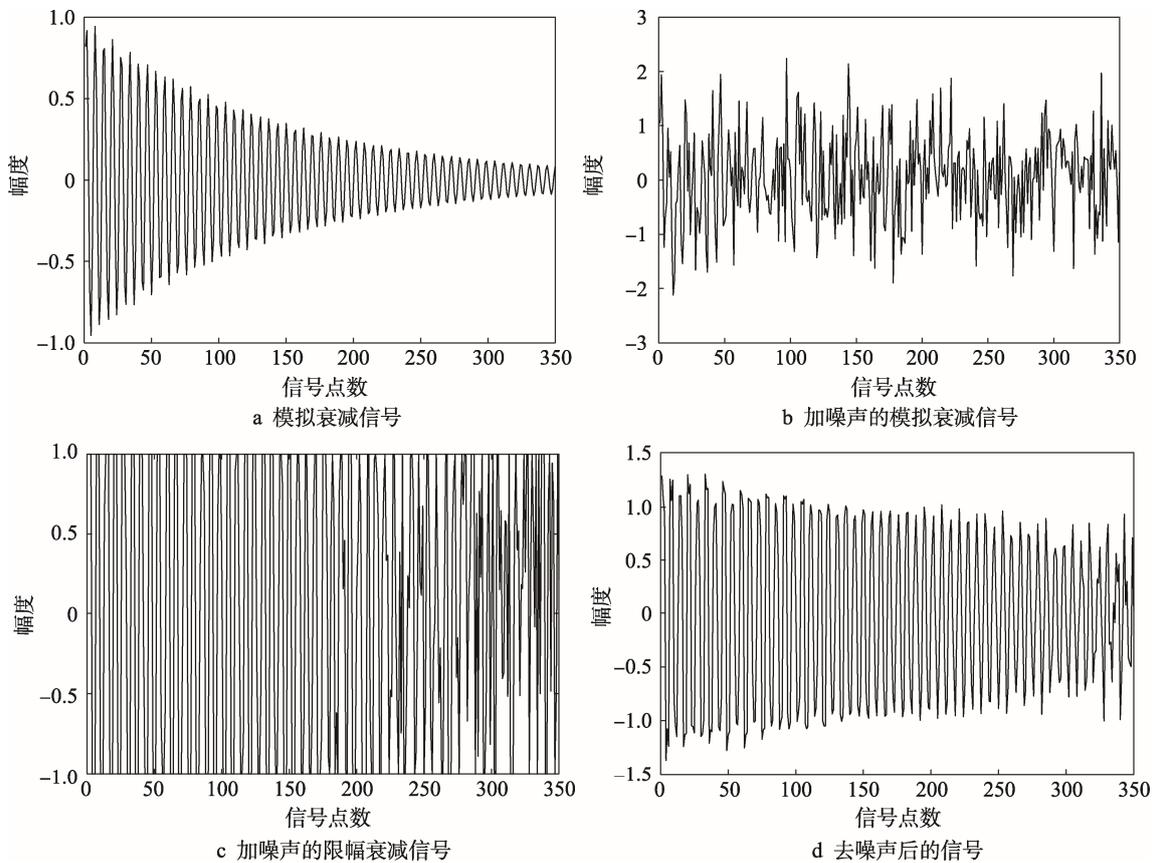


图 2 信号去噪波形
Fig.2 Signal denoising waveform

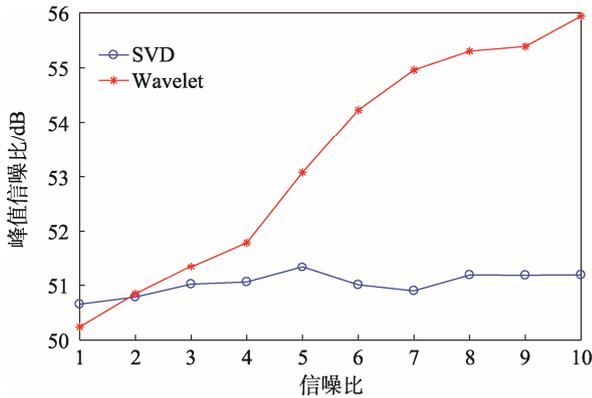


图3 去噪效果比较
Fig.3 Comparison of denoising effects

设一个信号的表达式为：

$$x(n) = Ae^{j\omega_0 n} e^{j2\pi f n \Delta t} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (5)$$

式中： A 为信号幅值； f 为频率； ω_0 为初相位。

并设 $X(k)$ 为其频谱，幅值最大对应的值为 k_0 。Rife 算法给出了利用被测频点相邻 2 根谱线估算正弦波频谱的公式，即^[14]：

$$\hat{f} = \left(k_0 + r \frac{|X(k_0 + r)|}{|X(k_0)| + |X(k_0 + r)|} \right) \frac{f_s}{N} \quad (6)$$

式中： N 为信号 FFT 的点数，且 $N=1024$ ；信号采样频率 $f_s=6.25$ MHz； r 为频移修正符号，其判断依据为：

$$r = \begin{cases} 1 & |X(k_0 + 1)| \leq |X(k_0 - 1)| \\ -1 & |X(k_0 + 1)| > |X(k_0 - 1)| \end{cases} \quad (7)$$

当频率靠近最大幅值附近时，Rife 算法的估计结果误差较大。为此，对 Rife 算法进行了改进。当估计频率值靠近量化频点处时，则把估计的频点移动到其相邻 2 个频点的中心区域内，再对频移后的信号进行 Rife 算法估计，可得到较高的频率估计精度。中心区域划分的大小很重要，如果划分过大会导致结果与改进前 Rife 算法无异，如果过小则会大大增加程序运行时间。FFT 算法的中心区域宽度根据标准差的相对大小设在 1 kHz 左右，经过计算， $(3\Delta f/7, 4\Delta f/7)$ 作为改进后 Rife 算法的中心区域满足条件，即被估计频率需满足式 8)

$$\frac{3}{7}\Delta f < \left| \hat{f} - \frac{k_0}{N} f_s \right| < \frac{4}{7}\Delta f \quad (8)$$

如果不满足在中心范围的条件，则需要对频谱搬移以提高运算精度。其向左或者向右移动的量化频率值 δ_k 见式 (9)

$$\delta_k = \frac{1}{2} - \frac{|X(k_0 + r)|}{|X(k_0)| + |X(k_0 - r)|} \quad (9)$$

频移后得到的频率计算公式为：

$$\hat{f}_L = (k_0 + r\delta_k) \frac{f_s}{N} \quad (10)$$

3 仿真及结果分析

3.1 模拟实验

为了验证 SVD-Rife 算法的有效性，对 2.2 节生成的信号进行了谱估计，并与几种常用频率估计方法（FFT 法、Welch 法^[15]、Multitaper 法^[16]、AR 参数模型法^[17]、MUSIC 算法^[18]）进行了对比，得到的结果见表 1。

表 1 常用频率估计结果方法对比
Tab.1 Comparison of common methods for frequency estimation

方法	平均值/kHz	标准差/kHz
FFT	967.9565	1.0061
Welch	968.8110	2.7234
MUSIC	968.3838	2.9059
Multitaper	968.5669	4.8063
AR 参数模型	963.7549	2.6765
Ours	967.7540	0.2677

由表 1 中数据可知，SVD-Rife 法方差仅为 FFT 方法的 25%，频率估计的平均值与预设值相比误差在 0.5 kHz 以内，证明算法在理论上可行。

为了进一步验证所设计的算法，对不同信噪比的信号进行了仿真实验，得到的结果见图 4—5。

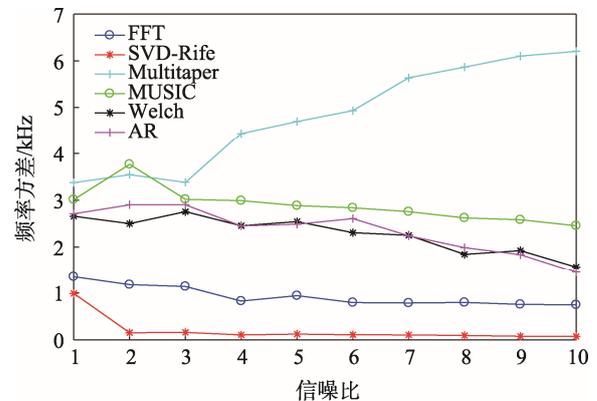


图4 频率估计方差对比
Fig.4 Comparison of estimated frequency variance

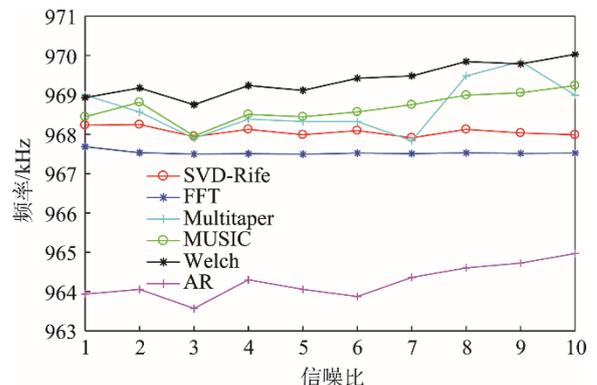


图5 频率估计平均值对比
Fig.5 Comparison of estimated frequency mean

由图 5 可知，在信噪比从 1—10 变化过程中，文中设计的 SVD-Rife 算法的方差都在 1 kHz 以内，从信噪比为 2 开始方差都低于 0.3 kHz，而其他方法的方差普遍高于 1 kHz。此外，文中设计的方法在不同信噪比下得到的信号均值与设定频率值最接近，这在一定程度上证明了所设计方法的有效性。

3.2 SAW 应变测量及结果分析

为进一步验证所设计的 SAWR 回波信号解调算法的有效性，对 7 个不同频率的 SAW 器件进行了阅读，并与其他解调方法进行了对比。阅读次数是 100，

得到的结果见表 2。

从表 2—3 中数据可以看出，SVD-Rife 算法的估计实际信号频率的准确性和稳定性都与估计模拟信号时表现相同，均优于其他方法，进一步证明了此方法的有效性。

把设计的 SVD-Rife 算法用于实际应变的检测。声表面波应变传感器系统见图 6。阅读器根据设计的回波信号解调算法对应变进行解调。通过调整悬臂梁上悬挂砝码可实现不同应变的加载，并分别用 FFT 法和文中设计的方法对应变进行了解调，见图 7—8。

表 2 7 种不同谐振器频率估计值
Tab.2 Estimated frequency of 7 different resonators

谐振器序号	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号
SVD-Rife	434 237.18	435 101.06	436 177.18	437 217.18	437 613.28	438 019.01	438 944.50
FFT	434 236.50	435 101.99	436 176.39	437 216.84	437 613.60	438 019.51	438 944.50
Multitaper	434 236.60	435 101.95	436 176.53	437 216.80	437 613.24	438 019.57	438 944.43
MUSIC	434 237.07	435 104.44	436 176.30	437 215.84	437 614.38	438 017.66	438 944.78
Welch	434 237.20	435 103.21	436 176.88	437 215.63	437 614.30	438 019.11	438 944.57
AR	434 236.51	435 099.84	436 176.01	437 217.96	437 615.47	438 019.30	438 945.59

表 3 7 种不同谐振器频率估计方差
Tab.3 Estimated frequency variance of 7 different resonators

谐振器序号	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号
SVD-Rife	0.0041	0.0036	0.0039	0.0019	0.0024	0.0021	0.0020
FFT	0.6086	0.1832	0.5858	0.5770	0.3055	0.2790	0.0867
Multitaper	0.1671	0.1821	0.1503	0.4431	0.3320	0.2381	0.3577
MUSIC	2.7199	2.1797	2.7532	2.7831	2.208	4.6518	1.9696
Welch	2.7349	2.1701	2.7434	2.6281	2.6776	3.1102	1.8897
AR	2.7787	0.0165	2.7233	2.5484	0.0208	2.4360	0.0147



图 6 SAW 回波信号阅读器硬件系统实物连接
Fig.6 Physical connection diagram of SAW echo signal reader hardware system

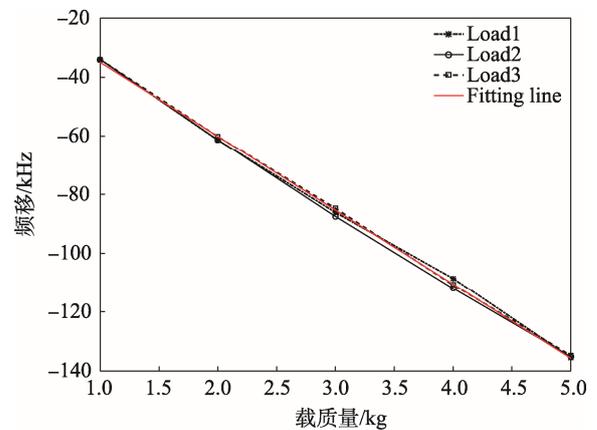


图 7 FFT 解调结果
Fig.7 FFT demodulation results

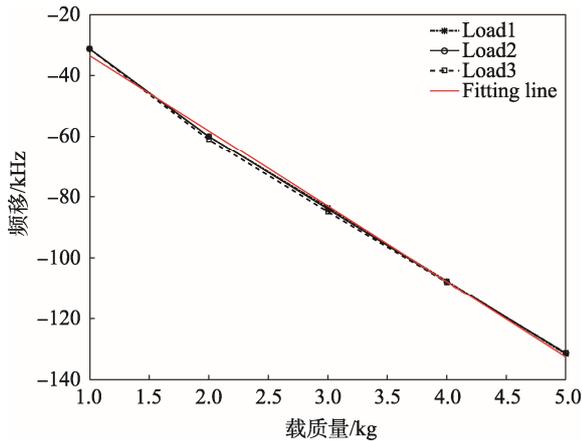


图8 SVD-Rife 算法解调结果
Fig.8 SVD-Rife demodulation results

从图7和8中可以得到,FFT法的线性度为0.78%,重复性3.54%,而SVD-Rife法的线性度为1.45%,重复性为1.09%。从该结果可以发现,SVD-Rife算法得到的线性度接近FFT算法,但重复性得到极大改善,可以更好地应用于储运材料表面的应变检测。

4 结语

提出了一种基于SAW技术的储运材料表面应变检测方法,该方法具有无线无源的特点。同时,设计了一种基于SVD_Rife算法的高精度SAWR回波信号频率算法。首先通过SVD分解降噪,以增大包含有效应变信息的回波信号与信道噪声的信噪比,再利用改进的Rife算法实现对去噪后的回波信号频率估计。仿真结果表明,所设计的算法的频率估计标准差为FFT法的1/3左右,而实际SAW回波信号估计的方差为FFT法的1/100左右,这说明设计的算法可以提高频率估计精度,同时也解决了由于接收SAW回波信号的阅读器DSP资源有限,不能进行长度很长的FFT运算问题。应变检测实验进一步证实了SVD-Rife算法对于应变检测的线性度与FFT算法接近,重复性得到极大改善,实验结果表明所设计方法可用于储运材料表面应变检测。

参考文献:

- [1] 何存富, 闫天婷, 宋国荣, 等. 微带贴片天线应变传感器优化设计研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 361—367.
HE Cun-fu, YAN Tian-ting, SONG Guo-rong, et al. Optimization Design of Strain Sensor for Microstrip Patch Antenna[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 361—367.
- [2] 张冬至, 周兰娟, 刘润华. 石墨烯薄膜应变检测实验装置的设计与应用[J]. 仪器设备研制与开发, 2016, 35(9): 72—75.
ZHANG Dong-zhi, ZHOU Lan-juan, LIU Run-hua. Design and Application of Graphene Film Strain Detection Experimental Device[J]. Development and Development of Instruments and Equipment, 2016, 35(9): 72—75.
- [3] 黄睿, 袁慎芳, 陶宝祺. 用于编织复合材料应变检测的光纤微弯传感器[J]. 压电与声光, 2012, 24(5): 351—353.
HUANG Rui, YUAN Shen-fang, TAO Bao-qi. Fiber Optic Microbend Sensor for Strain Detection of Braided Composites[J]. Piezoelectricity and Acousto-optic, 2012, 24(5): 351—353.
- [4] 杨嫣红, 王志伟. 缓冲包装材料及其性能研究进展[J]. 包装工程, 2002, 23(4): 96—100.
YANG Yan-hong, WANG Zhi-wei. Research Progress of Cushioning Packaging Materials and Their Properties[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(4): 96—100.
- [5] 周岩, 肖世富. 刚体碰撞约束柔性体局部撞击载荷特征分析[J]. 包装工程, 2019, 40(13): 150—159.
ZHOU Yan, XIAO Shi-fu. Characteristic Analysis of Local Impact Load of Flexible Body Constrained by Rigid Body Collision[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(13): 150—159.
- [6] 白天, 闫磊, 孙凤举. 无源无线声表面波压力传感器校准技术研究[J]. 宇航计测技术, 2019, 39(4): 22—27.
BAI Tian, YAN Lei, SUN Feng-ju. Calibration Technology of Passive Wireless Surface Acoustic Wave Pressure Sensor[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2019, 39(4): 22—27.
- [7] 郭晴, 叶会英. 基于奇异值分解的自混合干涉信号降噪算法[J]. 现代电子技术, 2019, 42(9): 26—30.
GUO Qing, YE Hui-ying. Self-mixing Interference Signal Denoising Algorithm Based on Singular Value Decomposition[J]. Modern Electronic Technology, 2019, 42(9): 26—30.
- [8] KANJILAL P P, PALIT S. On Multiple Pattern Extraction Using Singular Value Decomposition[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Signal Processing, 1995, 43(6): 1536—1540.
- [9] 张晓涛, 李伟光. 基于奇异值和奇异向量的振动信号降噪方法[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(3): 553—558.
ZHANG Xiao-tao, LI Wei-guang. Noise Reduction Method of Vibration Signal Based on Singular Value and Singular Vector[J]. Vibration, Testing and Diagnosis, 2018, 38(3): 553—558.
- [10] SLOBODAN D. An Accurate Method for Frequency Estimation of a Real Sinusoid[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(7): 915—918.
- [11] ABU S M, SHAIKH A F, RAJIB G. Noise Robust

- Formant Frequency Estimation Method Based on Spectral Model of Repeated Autocorrelation of Speech[J]. *IEEE/ACM Transaction on Audio, Speech, and Language Processing*, 2017, 25(6): 1357—1370.
- [12] THOMAS L H, BERNARD H F, BHASKAR D R. Superfast Line Spectral Estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(10): 2511—2526.
- [13] YE S L, SUN J D, ELISA A. On the Estimation of the Parameters of a Real Sinusoid in Noise[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2017, 24(5): 638—642.
- [14] RIFE D C, BOORSTIN R R. Multiple Tone Parameter Estimation from Discrete-time Observation[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1974, 55(9): 1389—1410.
- [15] ZHANG J W, WANG F G, ZHONG Z D. Continuous Phase Modulation Classification via Baum-welch Algorithm[J]. *IEEE Communication Letters*, 2018, 22(7): 1390—1393.
- [16] KHAN M A, PIERRE J W. Detection of Periodic Forced Oscillations in Power Systems Using Multitaper Approach[J]. *IEEE Transaction on Power Systems*, 2019, 34(2): 1086—1094.
- [17] TADESSE G. Representing a Cascade of Complex Gaussian AR Models by a Single Laplace AR Model [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2014, 12(5): 110—114.
- [18] HALAY N, TODROS K. MSE based Optimization of the Measure-transformed MUSIC Algorithm[J]. *Signal Processing*, 2019, 23(4): 150—163.