

# 一种基于奇异值分解的 SAW 传感器频率估计算法

肖学蕊<sup>1,2</sup>, 李红浪<sup>2</sup>, 陈淑芬<sup>1</sup>, 蔡飞达<sup>2</sup>, 柯亚兵<sup>2</sup>, 田亚会<sup>2</sup>, 邹正峰<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 2. 中国科学院 声学研究所, 北京 100190)

**摘要:**在声表面波(SAW)谐振式无线传感器的频率估计中, 该文提出了一种奇异值分解(SVD)与快速傅里叶变换(FFT)相结合的频率估计算法。首先采用重复采样的方法对无线 SAW 谐振器回波信号进行提取, 然后在 FFT 之前利用 SVD 法去除回波信号中的白噪声, 最后通过高斯曲线拟合法对 FFT 算出的频率进行校正。运用该算法得到的频率均方误差为  $1.53 \times 10^3$ , 而直接用 FFT 算法均方误差为  $2.38 \times 10^3$ , 均方误差减小了 55%。可见, 利用该 SVD 与 FFT 相结合的频率估计算法在准确度、稳定性方面都有很大改善, 且该算法操作简单, 易于实现。

**关键词:**声表面波(SAW); 谐振器; 频率估计; 傅里叶变换(FFT); 奇异值分解(SVD)

**中图分类号:** TN384      **文献标识码:** A

## A SAW Sensor Frequency Estimation Algorithm Based on Singular Value Decomposition

XIAO Xuerui<sup>1,2</sup>, LI Honglang<sup>2</sup>, CHEN Shufen<sup>1</sup>, CAI Feida<sup>2</sup>, KE Yabing<sup>2</sup>,  
TIAN Yahui<sup>2</sup>, ZHOU Zhengfeng<sup>1</sup>

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The fast fourier transform (FFT) frequency estimation algorithm combined with the singular value decomposition(SVD) is proposed in this paper, which is used to estimate the frequency of the surface acoustic wave (SAW) resonant sensor. The echo signal of wireless SAW resonator is extracted by the method of repeated sampling. The SVD method is used to remove the white noise in echo signal before FFT, and the Gauss curve fitting method is applied to calibrate the frequency calculated by FFT. The mean square error(MSE) applying the proposed algorithm is  $1.53 \times 10^3$ , while the MSE directly applying FFT algorithm is  $2.38 \times 10^3$ , which is reduced by 55%. Thus, using the frequency estimation algorithm combining the SVD and FFT, the accuracy and stability are greatly improved, and the algorithm is simple to operate and easy to implement.

**Key words:** SAW; resonator; frequency estimation; FFT; SVD

### 0 引言

声表面波(SAW)无线无源传感器因其在无线无源、适应恶劣环境等方面具有普通传感器不能实现的优点而受到人们的关注, 成为未来传感系统的发展方向<sup>[1]</sup>。谐振式传感器具有损耗低, 品质因数(Q)值高及分辨率高等优势而广泛应用于高灵敏度压力、温度、扭矩的测量<sup>[2-3]</sup>。因为 SAW 谐振式传感器的温度、压力等参量与 SAW 传感器的谐振频率有关, 所以, 对 SAW 谐振器传感信号的频率估计成为研究的关键问题。

在信号处理领域, 频率估计的算法有很多, 早期

利用最大似然估计法(MLE)或最小二乘法(WLS)通过构建函数模型来直接计算频率参数, 这类方法因未知参数过多, 很难找到合适的模型拟合待测信号, 初值的选取也较难, 同时, 这类方法计算复杂, 运算量大<sup>[4]</sup>。文献[5]提到用希尔伯特(Hilbert)变换法测量电力信号频率, 但这种方法适用于随时间变化的瞬时频率估计。在无线 SAW 回波信号频率估计的相关文章中, C. Droit 利用基于快速傅里叶变换(FFT)的 3 点拟合方法估计无线 SAW 传感器的频率<sup>[6]</sup>, 该方法运行速度快, 但频率分辨率有待提高, 且频率稳定性也未提及。为提高准确性和稳定

收稿日期: 2016-08-24

基金项目: 国家重点研发基金资助项目(No. 2016YFB0402705); 青岛橡胶行业智库联合基金资助项目(EVE-KJ-ZK-005); 国家自然科学基金资助项目(11304346)

作者简介: 肖学蕊(1991-), 女, 河北保定人, 硕士生, 主要从事声表面波传感器信号处理的研究。通信作者: 李红浪(1976-), 男, 湖北武汉人, 研究员, 主要从事声表面波理论基础和仿真方法以及传感器结构的应用研究。

性,Boquan Liu 等利用奇异值分解(SVD)和 WLS 相结合的算法估计回波信号的谐振频率<sup>[7]</sup>,但该方法在 WLS 部分实现过程较复杂。SVD 法因其去噪效果明显,易于实现,越来越受研究者的青睐,FFT 法因其运算速度快,算法参数不敏感仍被广泛使用。

本文考虑到两种算法的优点,首先用 SVD 对采样信号进行降噪处理,然后利用 FFT 法估计采样信号的频率,在利用 FFT 过程中对采样信号作了补零处理,克服了“栅栏效应”,之后用高斯曲线拟合校正频率值。该算法不仅使准确性及频率分辨率有所提高,更重要的是在频率稳定性方面有了明显改善,从而使输出结果更加稳定、可靠。

## 1 SAW 无线回波信号的产生

图 1 为 SAW 无线无源传感器系统。本系统采用具有强大信号处理能力的数字信号处理器(DSP)控制器的读写器负责管理 SAW 谐振器的无线询问过程。该过程首先通过读写器天线发射一个窄带射频脉冲信号,其频率接近其中一个 SAW 谐振器的谐振频率峰值。在 SAW 谐振器受到无线激励后,将携带了参数信息的频率信号再传输给读写器。专用射频电路从发射模式切换到接收模式,从而能够捕捉到返回的射频信号<sup>[8]</sup>。



图 1 无线无源 SAW 传感系统

图 2 为读写器射频接收系统框图。射频电路的接收通路包括一个低噪声放大器(LNA),后接单边带(SSB)混频器,将 433 MHz 的信号经过两次下变频后从射频电路传送到 DSP 中,然后被 DSP 内部的模数转换器(ADC)采样<sup>[9]</sup>。这一询问过程反复执行多次,从而可以将一个 SAW 单元的多个响应信号组合成时间同步的方式。得到的采样信号进入 DSP,最后进行频率估计得到相关参数信息。



图 2 射频接收系统框图

## 2 SAW 无线回波信号的频率估计

### 2.1 回波信号 SVD 降噪处理

SVD 技术不同于传统的信号分析思想,它将包含信号信息的矩阵分解到一系列奇异值和奇异值矢量对应的信号子空间中,不同子空间反映了信号的不同成分和特征。单次采样的数据构成信号矩阵  $\mathbf{A}$ ,即

$$\mathbf{A} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad \cdots \quad x_k]$$

$$k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

利用矩阵重构将  $\mathbf{A}$  写成  $\mathbf{B}$  的形式,基于信号的重构矩阵 SVD 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,是阻尼振荡的正弦信号,故可提取能量较大奇异值与其对应的奇异矢量达到降噪的效果<sup>[10]</sup>。

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

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

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。本文采用信息量的方法确定  $m$  和  $n$  的值,方法如下:取一系列不同的行数  $m$  构造矩阵,如式

$$\eta_i = \lambda_i / (\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_p) \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, p$$

利用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。如果不论  $m$  取何值,从某一信息量  $\eta_i$  开始的后续信息量都趋向于 0,则表明第  $i$  个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,选取前两个奇异值作为信号部分,其余奇异值作为噪声部分滤掉,则重构的信号变为式(3)所示。再将式(3)还原成时间序列,从而达到了降噪的效果

$\lambda_i$  为相应奇异值

$$\hat{\mathbf{B}} = [u_1 \quad u_2] \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2) [v_1 \quad v_2]^T \quad (4)$$

### 2.2 信号降噪后的 FFT 变换

对时间序列信号作  $N$  点的 FFT 可用式(4)表示,求得令  $|X_k|$  取最大值时的  $k$  值,记为  $k_{\max}$ ,则  $f = k_{\max} \times f_s / N$  ( $f_s$  为采样频率),即为所求频率。但由于采样时加窗截断和“栅栏效应”的存在,当信号频率与 FFT 离散频率不重合时,信号频谱发生泄漏,即使无噪声影响,信号真实频率仍落于主瓣内 2 根 FFT 谱线之间,导致频率估计无法满足精度要求。因原始信号数据长度较短,故将信号尾部补零,然后作  $N$  点的 FFT,这样相当于对 FFT 的结果作了插值,克服了“栅栏效应”。然后利用高斯拟合法对 FFT 频率进行校正,以提高精度。

$$X_k = \sum_{i=0}^{N-1} x_n e^{-j(2\pi/N)kn} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (5)$$

### 2.3 实验结果分析

将上面搭建的无线无源 SAW 传感系统置于稳定的环境中,连续采样 800 组数据,每组数据采样 70 个点,采样率为  $f_s$ 。单次采样的时间序列信号及 SVD 降噪后的信号对比图如图 3 所示。可见经过 SVD 降噪后的信号更接近阻尼振荡的正弦信号。对 SVD 降噪处理后的信号尾部补 442 个零点,然后作 512 点的 FFT,这样相当于对 FFT 的结果作了插值,克服了“栅栏效应”。图 4 为对降噪后信号做 FFT 的频谱图,因为频谱的主瓣更接近高斯函数,分别选取峰值左、右两侧各 6 个点作高斯拟合。最后求得高斯拟合后的对称轴位置  $f_0$ ,则  $f=f_0 \times f_s/N$ 。

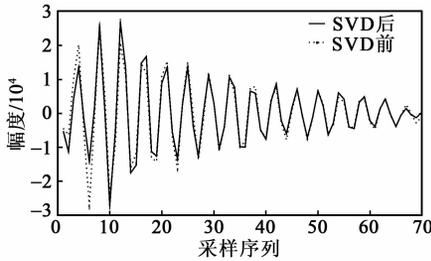


图 3 SVD 前、后采样信号时序图

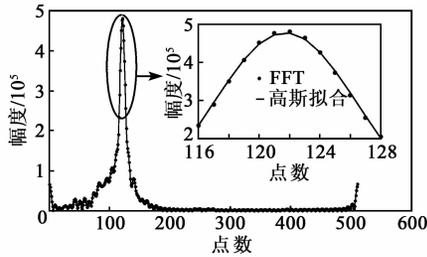


图 4 FFT 及高斯拟合频谱图

为进一步验证本文提出算法得到频率的稳定性,将采样的 800 组序列生成的信号分别用上面提到的算法及直接 FFT 算法对频率进行了估算。图 5 为用两种算法得到的频率比较图。经过计算得到利用新算法频率均方误差为  $1.53 \times 10^3$ ,直接 FFT 算法均方误差为  $2.38 \times 10^3$ 。

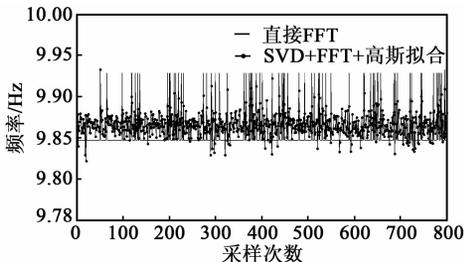


图 5 重复多次采样下两种算法的比较

### 3 结束语

本文针对无线无源谐振式 SAW 传感器在信号解调方面,传统的 FFT 法估计频率准确度不高,且出现频率不稳定的现象。本文提出 SVD 和 FFT 相

结合的算法,通过搭建实验测试平台,对无线无源传感系统 ADC 采集到的数据进行频率估计。通过将其频率均方差与 FFT 算法进行比较,分析了其稳定性,验证了此方法相比于 FFT 算法得到的频率更稳定可靠。本文算法的提出为 SAW 无线无源传感器信号解调提供了新方法。

#### 参考文献:

- [1] STEVENS D S, ANDLE J C, SABAH S, et al. Applications of wireless temperature measurement using SAW resonators[C]//S. l.: Fourth International Symposium on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems, 2010.
- [2] DROIT C, MARTIN G, BALLANDRAS S, et al. A frequency modulated wireless interrogation system exploiting narrowband acoustic resonator for remote physical quantity measurement [J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(1): 014701.
- [3] 傅洋, 韩韬, 刘伯权. 谐振式 SAW 无线传感系统的测量不确定度分析[J]. 压电与声光, 2014, 36(5): 698-701. FU Yang, HAN Tao, LIU Boquan. Measurement uncertainty analysis of resonant saw wireless sensor system[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(5): 698-701.
- [4] ZIELINSKI T P, DUDA K. Frequency and damping estimation methods-An overview[J]. Metrol Meas Syst, 2011, 18(4): 505-528.
- [5] 汤海. 基于改进 Hilbert 变换的电力信号频率测量方法[J]. 电子元器件应用, 2010, 12(9): 41-44. TANG Hai. Power signal frequency measurement method based on improved Hilbert transform[J]. Electronic Component & Device Applications, 2010, 12(9): 41-44.
- [6] DROIT C, FRIEDT J M. An algorithm for automating fast and accurate measurements of the resonance frequencies of SAW sensors[C]//S. l.: EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum, 2010(13): 1-8.
- [7] LIU Boquan, ZHANG Chenrui, HAN Tao. An improved performance frequency estimation algorithm for passive wireless SAW resonant sensors [J]. Sensors, 2014(14): 22261-22273.
- [8] 郭霄鹏. 应用于燃气管道的声表面波应变传感器的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [9] 傅洋. 声表面波无线无源温度传感系统的优化设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [10] 胡卫红, 舒泓, 梁宇光. 基于奇异值分解的电能质量信号去噪 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 31-34. HU Weihong, SHU Hong, LUAN Yuguang. Power quality signal is denoising based on singular value decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 31-34.