

# 基于ICA盲源分离的声表面波无线 传感器信号抗干扰方法

吴润发 史汝川

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院 上海 200240)

**摘要:** 针对声表面波传感器无线信号易受环境中同频信号干扰的问题,设计了基于独立分量分析(ICA)盲源分离的抗干扰算法。该算法对传感器和同频干扰的混合信号进行分离,然后基于分离信号波形的衰减和等幅特征对信号进行判别。MATLAB仿真结果表明,算法能够有效分离混合信号并且保留了源信号的时域波形特征和频域信息。将抗干扰算法在基于数字信号处理器的信号采集和处理平台上实现并进行分离实验,设置不同的传感器信号和干扰信号强度并记录分离和判别结果,实验结果表明,在源信号的信号强度较为接近(信扰比在0.8~1.4范围内)且噪声影响可忽略的情况下,可达到95%以上的传感器信号准确判别率,有效地抑制了同频干扰。

**关键词:** 声表面波;无线传感器;同频干扰;ICA;盲源分离

**中图分类号:** TN98      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.4010

## Anti-interference method for signal of wireless surface acoustic wave sensor based on ICA blind source separation

Wu Runfa Shi Ruchuan

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the wireless signal of surface acoustic wave sensor is easily interfered by the same frequency signal in the environment, an anti-interference algorithm based on ICA blind source separation theory is designed. This algorithm separates the mixed signal of the sensor and the same frequency interference, and then distinguishes the signal based on the attenuation and constant amplitude characteristics of the separated signal waveform. MATLAB simulation results show that the algorithm can effectively separate mixed signals and retain the time-domain waveform characteristics and frequency-domain information of the source signal. The anti-interference algorithm is implemented on a DSP-based signal acquisition and processing platform on which signal separation experiments are carried out. Different sensor signals and interference signal amplitudes are set and the separation and discrimination results are recorded. The experimental results show that when the signal strength of the source signal is relatively close (the signal-to-interference ratio is in the range of 0.8~1.4) and the noise effect is negligible, an accurate discrimination rate of more than 95% of the sensor signal can be achieved, effectively suppressing the same frequency interference.

**Keywords:** surface acoustic wave; wireless sensor; co-channel interference; ICA; blind source separation

## 0 引言

声表面波(surface acoustic wave, SAW)传感器具有器件纯无源,信号无线传输、寿命长、免维护的特点,在高温、高电压、高速机械运动等复杂应用环境中具有极大的优势,因此在电力、钢铁、石油化工等工业领域备受关注<sup>[1-2]</sup>。

声表面波传感器按其器件工作原理主要分为两类:谐

振型和延迟线型。谐振型SAW传感器主要由叉指换能器(interdigital transducer, IDT)、反射栅和压电基片组成<sup>[3]</sup>。IDT是沉积在压电基片上形如叉指形状的金属电极,它将传感器天线接收到的激励电信号通过逆压电效应转换为声表面波,并在IDT与反射栅之间形成驻波产生谐振。当激励信号停止后, IDT利用基片压电效应将声表面波转换为电磁信号,通过天线发射出去<sup>[4-5]</sup>。当传感器感受的温度、

收稿日期:2020-11-18

• 178 •

压力等物理量变化时,其谐振频率也会按一定规律变化。阅读器接收传感器回波信号并解析出谐振频率值,就能计算出传感器检测的物理量。SAW 传感系统的信号处理关键是准确检测回波信号中的谐振频率,一种广泛采用的方法是利用快速傅里叶变换将回波时域信号转换为频域谱,由于回波信号中传感器谐振频率成分具有最大能量和持续时间,因此频谱最大值处的频率值即为传感器谐振频率。根据国家无线电管理委员会对微功率(短距离)无线电设备的频谱规划,无源无线谐振型 SAW 传感器工作在 430 MHz 的频段上,对讲机、工业遥控等同频设备均有可能对回波信号造成干扰<sup>[6]</sup>。当同频干扰信号被阅读器天线采集到时,频谱上则会出现除传感器谐振峰以外的干扰峰值,若干扰峰的强度达到检测阈值甚至强于传感器谐振峰,则阅读器会将干扰频率误检测为传感器谐振频率而计算出错误的温度数据。目前针对 SAW 传感系统的干扰数据问题主要有两类解决方案,第一类是重复查询及特征判别法,即对传感器进行重复查询后对回波信号进行干扰抵消处理,或基于信号特征判别类型<sup>[7-8]</sup>。这类算法往往基于明显的信号特征,在低信噪比和强干扰情况下不能适用。第二类是采用滤波算法将测量数据中的错误数据剔除,如基于自适应卡尔曼滤波算法和压缩感知理论对测量数据进行检错和纠错<sup>[9-10]</sup>。这类算法在直接对测量数据进行处理,干扰滤除效果明显,但算法计算量较大,耗时长。本文提出一种基于独立分量分析(independent component analysis, ICA)盲源分离的信号检测和判别算法,用于从时域混合信号中分离出声表面波传感器信号和同频干扰信号,进而准确判别传感器信号频率,抑制声表面波无线传感系统中的同频干扰。

## 1 SAW 传感器信号抗干扰算法

### 1.1 ICA 盲源分离

盲源分离(blind source separation, BSS),也称盲信号分离,是指在源信号以及信号混合参数未知或只知其少量先验知识的情况下,仅根据观测到的混合信号来估计源信号<sup>[11]</sup>。在声表面波传感系统中,传感器信号和干扰信号未知(仅知少量先验特征如时域信号包络形状)且混合参数未知,因此要从天线采集到的混合观测信号中分离出两个源信号属于盲源分离问题。ICA 是一种从多元(多维)数据中寻找具有统计独立和非高斯的因子或成分的盲源分离方法。ICA 盲源分离的假设条件是源信号相互统计独立且最多只允许一个源信号为高斯分布且观测信号的噪声可忽略不计<sup>[12]</sup>。由于传感器和干扰信号来自不同的信号发生过程,明显是相互独立的,且声表面波信号为非高斯信号,因此满足 ICA 盲源分离假设条件。

ICA 盲源分离的数学模型可描述如下:令  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  为  $n$  维随机观测向量,由  $n$  个未知独立源信号  $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T$  线性瞬时混合而成,即有如下线性混合

模型:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s} = \sum_{i=1}^n a_i s_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{A} = (a_1, a_2, \dots, a_n) \in R^{n \times n}$  为混合矩阵。为了尽可能真实地从混合信号中估计出源信号,需构建一个解混矩阵  $\mathbf{W}$ 。 $\mathbf{x}$  经  $\mathbf{W}$  线性变换后得到  $n$  维输出向量  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ , 则 ICA 的解混模型可表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{x} = \mathbf{W}\mathbf{A}\mathbf{s} \quad (2)$$

ICA 寻优过程需建立一个以  $\mathbf{W}$  为变元的目标函数,作为衡量分离成分独立性的判据,若某个  $\mathbf{W}$  能使目标函数达到极值,则此时的  $\mathbf{W}$  即为所求分离矩阵,此时分离信号具有最大的独立性且最接近源信号<sup>[13]</sup>。

### 1.2 FastICA 算法

快速独立成分分析(FastICA)算法又称固定点算法,是基于非高斯性最大化原理,以负熵作为目标函数,使用固定点迭代理论寻找分离成分非高斯性最大的快速 ICA 处理算法。

FastICA 的目标函数为负熵的近似<sup>[14]</sup>:

$$J(\mathbf{W}) = [E\{G(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\} - E\{G(v)\}]^2 \quad (3)$$

式中:  $v$  是具有零均值和单位方差的高斯随机变量;  $G$  是一个非平方的非线性函数,通常不同的函数适合不同的源信号特征,对于本文的亚高斯和超高斯源信号并存的情况,采用  $G(y) = \log_2 \cosh(y)$ ; 而  $J(\mathbf{W})$  的最大值在  $E\{G(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}$  的最大值处取到,且由于观测信号  $\mathbf{x}$  在解混前已经过白化处理,故分离矩阵  $\mathbf{W}$  为正交矩阵,即存在约束条件<sup>[15]</sup>:

$$E\{(\mathbf{W}^T \mathbf{x})^2\} = \|\mathbf{W}\|^2 = 1 \quad (4)$$

因此寻优问题转化为在此约束条件下求  $E\{G(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}$  的极大值。利用拉格朗日乘子法,令拉格朗日乘子为  $\lambda$ ,则有:

$$J(\mathbf{W}) = E\{G(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\} - \lambda(\|\mathbf{W}\|^2 - 1) \quad (5)$$

将式(5)对  $\mathbf{W}$  求导,并令其导数为 0,可得如下方程:

$$E\{xg(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\} + \beta \mathbf{W} = 0 \quad (6)$$

式中:函数  $g$  是函数  $G$  的导数,即  $g'(y) = 1 - \tanh^2(y)$ ,令方程左边为  $F$ ,则  $F$  的梯度为:

$$\frac{\partial F}{\partial \mathbf{W}} = E\{\mathbf{x} \mathbf{x}^T g'(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\} + \beta \mathbf{I} \approx E\{g'(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\} \mathbf{I} + \beta \mathbf{I} \quad (7)$$

由牛顿迭代法可得  $\mathbf{W}$  的迭代公式:

$$\mathbf{W}(k+1) = E\{xg(\mathbf{W}(k)^T \mathbf{x})\} - E\{g'(\mathbf{W}(k)^T \mathbf{x})\} \mathbf{W}(k) \quad (8)$$

总结 FastICA 算法步骤如下:

- 1) 观测信号预处理:去均值,白化;
- 2) 初始化正交解混矩阵  $\mathbf{W}(0)$ ;
- 3) 利用式(8)更新解混矩阵;
- 4) 归一化处理  $\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n+1) / \|\mathbf{W}(n+1)\|$ ;
- 5) 如果算法没有收敛,转到步骤 3)。

图 1、2 所示分别为天线采集的 435 MHz 频段声表面波温度传感器实际回传信号以及传感器使用现场的随机同

频干扰信号波形(由于声表面波传感系统信号采集周期短,所以采集到的同频干扰均呈现近似等幅特征),是经信号处理模块(阅读器)下变频和采样后的时域信号。图 3 所示为时域混合信号及其频谱,频谱峰值对应的频率即为传感器和干扰信号频率。可见由于两个信号频谱的相似性以及信号幅值的随机性,仅在频域无法区分出两者。利用 ICA 盲源分离算法对时域混合信号进行分离,首先将天线采集的实际观测信号导入 MATLAB 平台进行仿真实验。输入观测信号为两次连续采集的混合信号如图 3 所示,其中干扰信号为信号发生器产生的等幅正弦信号。在进行盲源分离算法处理前对信号进行了数字带滤波处理,以减少杂波信号和噪声对盲源分离效果的影响。图 4 所示为分离信号的时域和频谱,由于 ICA 盲源分离具有分离信号尺度的不确定性,所以分离信号仅保留了源信号的大致时域波形而丢失了原始幅度信息。频域上,分离信号频谱峰值频率和分离前信号频率保持一致,可见保留了源信号的主要频域特征。

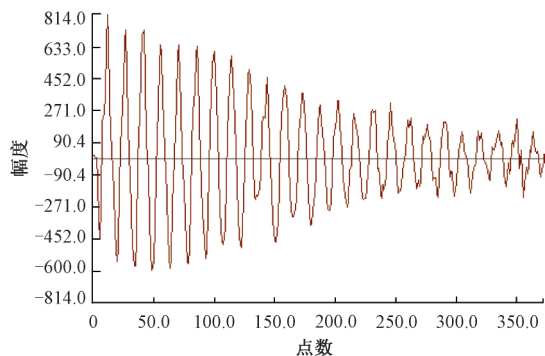


图 1 天线采集的实际 SAW 传感器回波信号

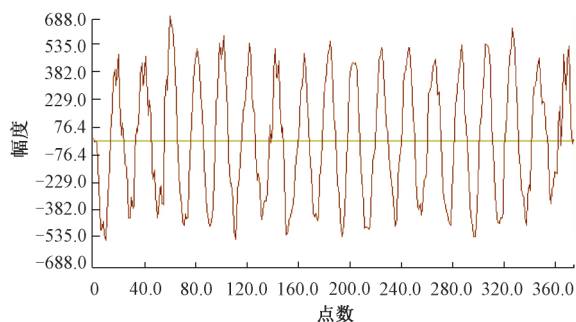


图 2 天线采集实际等幅同频干扰信号

为了准确获得传感器谐振频率,还需要从分离信号中找到传感器信号,很明显仅从分离信号的频域是无法判别的。而由于分离信号保留了源信号基本波形,从图 4 可大致看出,传感器信号频率 0.365 6 MHz(下变频后)对应的信号时域波形呈现衰减特征,而另一个信号基本呈现等幅特征,即为同频干扰信号。因此可通过分离信号时域波形的特征来判别信号种类。判别方法是:首先忽略信号边缘

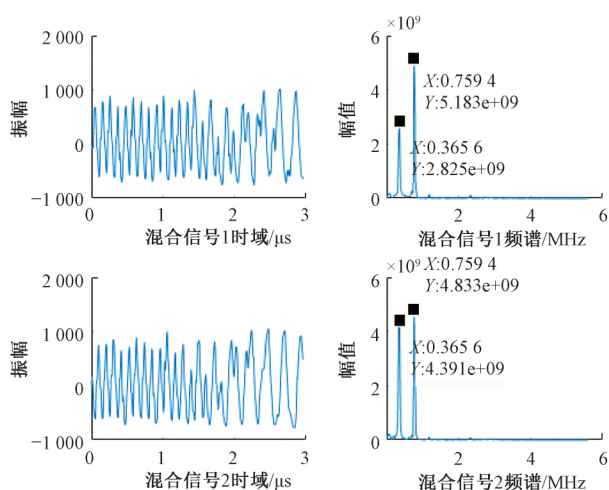


图 3 观测信号波形及频谱

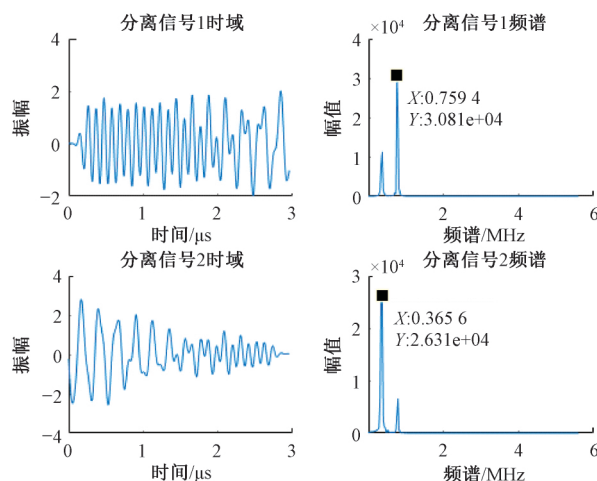


图 4 分离信号波形及频谱

部分对分离信号进行第一轮极大值搜索,然后对第一轮所有极大值进行第二轮极大值搜索,再对第二轮极大值进行平滑处理得到一条近似信号包络曲线如图 5 和 6 所示,对该曲线的首尾值求差值(绝对值),其中图 5 传感器信号对应差值较大(1.8),而图 6 等幅干扰信号对应差值较小(0.6)。

因此,可通过判断分离信号近似包络曲线的首尾值差值的大小作为判断信号的依据,但需要设定一个合适的门限值以提高检测准确度,即该差值大于该门限值时才可进行可靠地判别。

## 2 实验与分析

为获得合适的检测门限,将盲源分离算法在基于数字信号处理芯片(TI 公司 F28335)的阅读器平台上实现,利用声表面波温度传感器、阅读器、天线、信号发生器等设备搭建如图 7 所示测试环境对混合信号进行采集和分离实

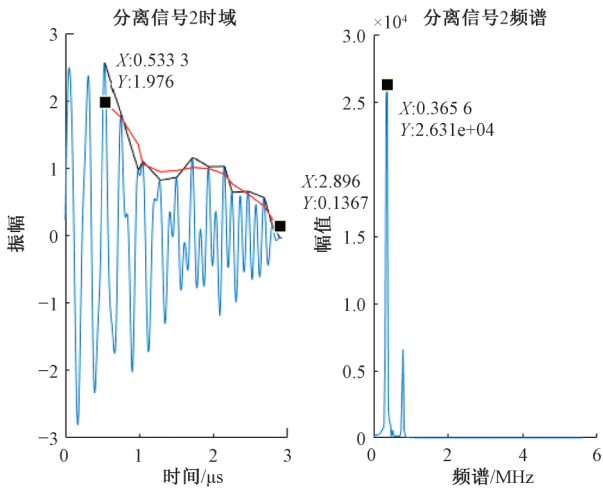


图 5 传感器信号近似包络曲线

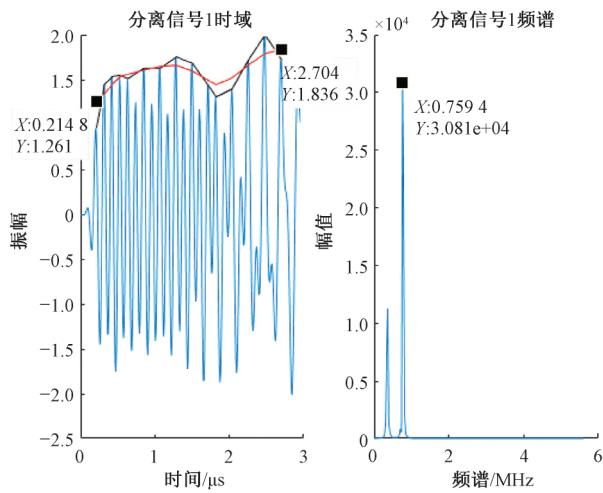


图 6 等幅干扰信号近似包络曲线

验。在不同传感器回波信号强度下(以传感器离天线距离  $d$  表示),通过信号发生器产生不同功率的干扰信号以产生不同大小的信扰比(传感器信号与干扰信号强度比,以频谱峰值幅度之比表示),得到分离信号近似包络曲线首尾差值分别为  $D_1, D_2$ ,则两者之差  $|D_1 - D_2|$  如图 8 所示。在同一读取距离下,信扰比较小时或较大时,源信号强度相差较大导致分离信号相似度较大,因此  $|D_1 - D_2|$  相对较小。当源信号的强度接近时,分离信号更接近源信号。且当传感距离越远时,天线接收的传感器信号强度普遍较弱(即信噪比小),此时噪声开始对信号分离产生较大影响。图 9 所示为图 8 实验条件下的传感器信号正确检测率,其结果与图 7 具有一定程度的一致性,当源信号的信号强度相近时(信扰比在  $0.8 \sim 1.4$  范围内),可达到 95% 以上的正确检测率,当源信号强度差别越大时,由于分离信号相似度大导致更容易出现误判。

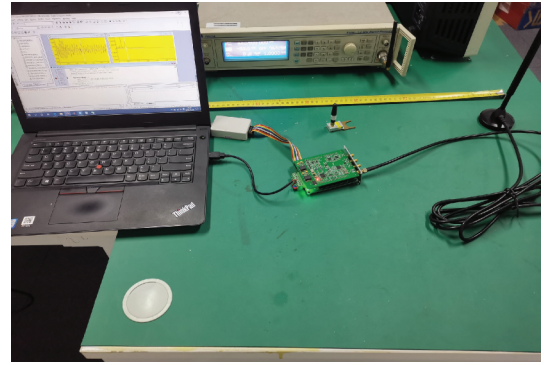


图 7 信号采集测试环境

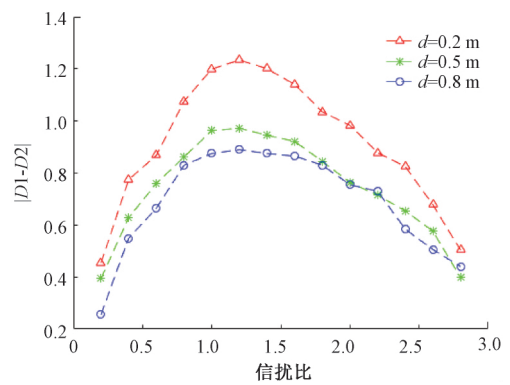
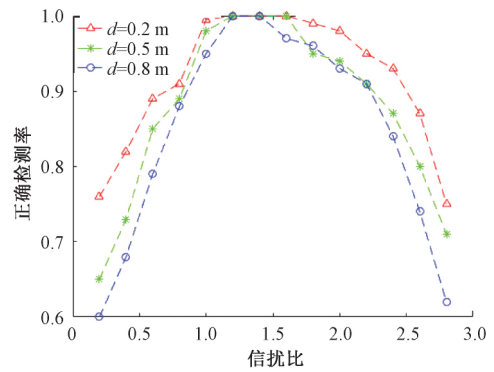

 图 8 不同信扰比和读取距离下的  $|D_1 - D_2|$ 


图 9 不同信扰比和读取距离下的传感器信号正确检测率

### 3 结 论

本文针对声表面波传感器系统易受环境中同频信号干扰的问题,从时域角度出发,利用 ICA 盲源分离理论设计算法对传感器和干扰信号的混合信号进行分离和判别。仿真结果表明,分离信号虽丢失了源信号的幅度信息但保留了源信号的大致时域波形,而且频域信息也与源信号基本一致。通过对分离信号绘制近似包络曲线得到曲线首尾差值,并通过判断差值的相对大小可有效判别传感器信号和干扰信号。搭建信号采集平台对混合信号进行了采集和分

离实验,实验结果表明在源信号的信号强度较为接近且噪声影响可忽略的情况下,本文的抗干扰算法可以有效判别真实传感器信号及其频率,达到了抑制同频干扰的作用。

#### 参考文献

- [1] 韦江波,滕学志,王俊石,等. 声表面波无源无线温度传感器产品研究进展[J]. 电子测量技术,2014,37(10): 95-99.
- [2] 韩韬,吉小军,李平,等. 声表面波无线无源传感器[J]. 上海交通大学学报,2018,52(10):1314-1323.
- [3] 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.
- [4] HAN T,ZHANG C R,HU Y, et al. Recent research results on wireless passive acoustic sensors for smart grids application [C]. 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium, Tours, 2016: 1-5.
- [5] 巩凡,宋倩倩,陈开鑫. 一种新型的无源无线 SAW 温度传感器的研究[J]. 压电与声光,2017,39(3):405-407.
- [6] 王小波,宋起柱,王俊峰,等. 微功率设备市场情况及规范管理研究[J]. 电信科学,2014,30(11):116-124.
- [7] 北京太行天启创新科技有限公司. 声表面波电力测温采集器的移相叠加抗干扰方法: CN201410673663. X[P]. 2015-03-04.
- [8] 邓富成,赵嫣菁,张辰,等. 声表面波温度传感器抗干扰技术研究[J]. 包装工程,2018,39(19):98-104.
- [9] 薛明喜,杨扬,张晨睿,等. 基于自适应 Kalman 滤波的 SAW 测温数据纠错方法[J]. 仪器仪表学报,2016,37(12):2766-2773.
- [10] LIU B, HAN T, ZHANG C R. Error correction method for passive and wireless resonant SAW temperature sensor[J]. IEEE Sensors Journal,2015,15(6): 3608-3614.
- [11] 李振璧,王康,姜媛媛. 盲源分离技术研究与方法综述[J]. 科学技术与工程,2017,17(14):141-147.
- [12] 邝亚云,王黎明,王佳琪. 基于快速独立分量分析的脑电信号去噪方法研究[J]. 国外电子测量技术,2018,37(11):1-4.
- [13] 吴佳佳,行鸿彦,孙江. 一种雨声信号的盲源分离处理方法[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(9):144-153.
- [14] 吴涛,姜迪,吴建德,等. 基于 CEEMD 和 FastICA 的滚动轴承故障诊断研究[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(4):186-194.
- [15] 王晴,王建新. AIS 信号的分离算法研究[J]. 电子测量技术,2020,43(16):87-93.

#### 作者简介

吴润发,硕士研究生,主要研究方向为声表面波无线传感器。

E-mail:1532970591@qq.com