

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.02.021

球形麦克风阵列时频故障信号定位算法研究*

邓昌建 蒋世奇 蔚泽峰 明祥林

(成都信息工程大学 控制工程学院 成都 610225)

摘要:针对广义互相关算法在强噪声环境下,设备故障时频声音信号定位困难的问题,提出一种结合图像分析与短时傅里叶变换(STFT)的时频信号子空间延时(TFSD)估计算法。利用STFT域中的噪声与信号特征,结合STFT域中不同麦克风测量数据的相关信息,使用滤波、谱减等方法进行信号、噪声区域分离,构建信号主成分区域,通过反演构造信号子空间,从而进行端点识别,延时值估计,实现声源定位。仿真结果表明,即使在加性噪声幅度远大于故障信号的2倍,也能实现准确的延时估计,延时估计误差和5 m×5 m范围的定位误差小于10%,实测也证实了该结果的正确性。

关键词: 麦克风阵列;短时傅里叶变换域;信号子空间;反演

中图分类号: TN929.52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Research on location algorithm of time-frequency fault signal based on spherical microphone array

Deng Changjian Jiang Shiqi Wei Zefeng Ming Xiangling

(College of Control Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: To solve the location problem of the time-frequency sound signal of equipment fault under the high noise environment when using algorithm of GCC, the time-frequency subspace delay (TFSD) estimation algorithm which combine short-time Fourier transform (STFT) domain and image analysis is proposed. The characteristics of noise and signal in STFT domain is used, meanwhile the correlation information of different microphone is considered, the principle signal subspace is formed using the method of filter or spectral subtraction to separate area of signal and noise subspace. Based on signal subspace, the signal in time domain is inverted, then the endpoint detection is undertaken, the delay is estimated and the sound source is located. The simulation results demonstrate that the time delay can be estimated accurately even the amplitude of additive noise is more than two times of signal, the estimation error of delay and location in area of 5 m×5 m, this results are proved by measurement.

Keywords: microphone array; short-time Fourier transform; signal subspace; inversion

1 引言

使用麦克风阵列对设备故障的声音信号进行定位,能在对现有设施不产生影响的情况下完成测量,具有方便可靠的特点。目前的研究包括 Bjelic 等^[1]使用麦克风阵列进行了驱动电机的故障检测,得出了正常电机工作的频率一般是电源频率、电源频率的两倍,当电机出现损

坏时,振动和噪声频谱将在电源频率的谐波上出现旁瓣。徐康乐等^[2]设计了民用飞机的主起落架的工作模型,比较了 BeamForming 算法及 CLEAN-PSF 算法,并使用了麦克风阵列进行声源识别。陈正武等^[3]研究了基于麦克风阵列的声学风洞测试技术,重点分析了麦克风阵列的频谱主瓣和旁瓣性能。刘建平等^[4]使用 GCC-PHAT 对汽笛声进行了定位。这些研究表明,噪声环境下时频信号的延时估计精度是影响定位精度的主要因素之一^[5-6]。

收稿日期:2016-07 Received Date: 2016-07

* 基金项目:四川省教育厅自然科学基金重点项目(14ZA0172)资助

目前的延时估计研究,做如下的假设:麦克风阵列各麦克风的间距一般不大于最高频率信号的一半波长;另外对于故障声源满足能量具有小的时频支撑域,而这些时频支撑域几乎互不交叠。在这些假设下,延时估计多采用 Knapp 和 Carter 的广义互相关法,如 GCC-PHAT^[7]。其他的改进方法如倒谱预滤波的时延估计算法 GCC-CEP,该方法通过反卷积去除接收信号中的混响,然后再用 GCC 法估计时延^[8];相位数据线性回归方法,它根据相位与角频率的线性关系,其斜率即为时延,运用线性回归的方法得到时延估计^[9];自适应时延估计法,该算法基于最小均方误差的准则,用其中一个通道的信号经过自适应滤波去逼近另一个通道的信号,收敛后可得到时延估计^[10];自适应特征值分解 AEDA 算法,它同时估计了两个通道的冲激响应,可有效地估计出两路接收信号中的直达信号时间差^[11];基于可控波束形成的声源定位算法 SRP. PHAT,它是一种可实现的可控波束形成定位算法^[12]。其中 SRP. PHAT 是 GCC-PHAT 的自然推广,是目前应用最广泛的算法之一^[13-14]。

由于有些故障信号本身就是典型的时频变化信号,或者是弹性反射波测试的线性调频波,其频率范围在 10 ~ 2 000 Hz 居多;而接收电路与处理方法是而非线性的,上面的算法不太适合^[15-17]。基于此,本文对实际环境的复杂的时频信号,大噪声背景下的调频 CHIRP 的定位算法进行理论和仿真分析,提出了以时频变化距离最小的时频信号子空间(TFSD)进行延时估计的算法。

2 问题的描述

2.1 广义互相关(GCC)计算与使用局限

Knapp 等人研究的 GCC 法,基于一个前提是在小的时间窗内,信号和噪声是平稳的、延时和信号的变化也是缓慢的。

这样,两个独立声音传感器的接收信号 $x_1(t), x_2(t)$ 可以表示为:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= s_1(t) + n_1(t) \\ x_2(t) &= \alpha \cdot s_1(t) + n_2(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $s_1(t)$ 是信号, $n_1(t), n_2(t)$ 是噪声,它们是不相关的, α 是相对衰减因子。由于测量的限制,延时 τ 使用相关函数(2)来估计。

$$R_{x_1x_2}(\tau) = E[x_1(t)x_2(t-\tau)] \quad (2)$$

对一个各态历经过程,对一个时间段 T , 其估计满足:

$$\hat{R}_{x_1x_2}(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_{\tau}^T x_1(t)x_2(t-\tau) dt \quad (3)$$

为使估计值更好, Knapp 等人提出采用对 $x_1(t), x_2(t)$ 滤波后再估计时延的广义互相关方法。其最为典

型的 GCC-PHAT 的计算如下:

$$\begin{aligned} R_{uv}(\tau) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{u,v}(\omega) X_u(\omega) X_v^*(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{u,v}(\omega) G_{x_x}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $x_u(t), x_v(t)$ 麦克风接收信号,其傅里叶变换 $X_u(\omega), X_v(\omega)$; 互功率谱 $G_{x_x}(\omega)$, 权函数 $\Psi_{u,v}(\omega)$ 。

从上面的分析可以看出,对于实际环境的复杂的时频信号,大噪声背景下的调频 CHIRP 等时频信号,具有非平稳特性,不能满足式(1) ~ (4)。

2.2 STFT 域的信号表示

分析时频信号,常采用 STFT 方法。

$$\begin{aligned} STFT\{x(t)\}(\tau, \omega) &\equiv X(\tau, \omega) = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t-\tau) e^{-j\omega t} dt \end{aligned} \quad (5)$$

而

$$spectrogram\{x(t)\}(\tau, \omega) \equiv |X(\tau, \omega)|^2 \quad (6)$$

式(5)中: $x(t)$ 是一个非平稳信号,它与角频率 ω 与时间窗的参数 τ 有关; $w(t-\tau)$ 为窗函数,一般选用汉明或矩形窗。

不失一般性,即使是非平稳的各态历经故障声音信号,可以假设为:频率具有短时连续性,时间具有短时持续性特征。

$$x(f_n, A_f) \rightarrow x(f'_n, A'_f); t_1 - t_0 < T_s \quad (7)$$

即使是在噪声大的情况,突然出现时频信号故障,它的短时傅里叶变换(STFT)的声谱图具有明显的时间信息,但信息包含在整体图像中,需要找到支撑域提取有效信息。因此本文提出结合图像分析与 STFT 域的 TFSD 估计算法。

3 TFSD 估计算法

TFSD 估计算法要解决如下几个问题:

- 1) 信号和噪声分离;
- 2) 信号子空间确定;
- 3) 端点值测定;
- 4) 延时的估计。

3.1 信号和噪声分离

有两类的分离方法,一类是先滤波后分离;另一种是直接分离。目前有 4 种基于谱减法的噪声谱的信号估计处理方法,使用线性递归处理噪声谱信息,由于本文主要考虑延时相关,采用了直接用 STFT 计算噪声(其结果是 1 个随机 2 维复向量)。

$$STFT\{n(t)\}(\tau, \omega) \equiv N(\tau, \omega) =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} n(t)w(t - \tau) e^{-j\omega t} dt \quad (8)$$

式中: $n(t)$ 是噪声信号,其他参数的含义与式(5)类似。从物理意义上,高斯白噪声的均值为0,而二阶统计量是一常量,快速傅里叶变换(FFT)的幅度谱也是在整个频谱范围的变化随机值,而且近似正态分布。图像特征表现为二维噪声谱,随机分布。因此本文采用区域相似度进行噪声二维随机谱识别与剔除。这一步处理(式(8))也可以用滤波式(9)完成。

$$\begin{aligned} x_1(t) &= s_1(t) + n_1(t) \\ \rightarrow y_1(t) &= H_1(t) \cdot (s_1(t) + n_1(t)) \\ \rightarrow STFT\{y_1(t)\}(\tau, \omega) \end{aligned} \quad (9)$$

其中滤波满足:

$$STFT\{H_1 \cdot n(t)\}(\tau, \omega) \xrightarrow{\text{以概率1趋近}} \delta < \varepsilon \quad (10)$$

式中: ε 是某精度下的小数。

3.2 信号子空间确定

在信号存在的区域,包括目标信号、噪声、其他不相关信号。该区域的特征存在信号的信息,需要加重这部分信息的内容,实际就是将信号空间分解为信号子空间和噪声子空间,而在信号子空间进行处理。

对于1维信号通常采用最陡梯度法来确定信号子空间,对于区域2维信号采用目标信号的加重,噪声与不相关信号剔除,而把信号投影在特定空间的方法。

可以提供的信息包括:1)两路信号具有相关性;2)测量信号中噪声和信号的不同特性;3)利用历史信息。

利用噪声和信号的不同特性,对式(1)的不同时刻在STFT域做声谱减法,如式(11),能对噪声加重而信号几乎为0。

$$\begin{aligned} abs(STFT\{x_1(t)\}(\tau, \omega) - STFT\{x'_1(t)\}(\tau, \omega)) &= \\ abs\left(\frac{STFT\{s_1(t)\}(\tau, \omega) - STFT\{s_1(t)\}(\tau, \omega) +}{STFT\{n_1(t)\}(\tau, \omega) - STFT\{n'_1(t)\}(\tau, \omega)}\right) &\approx \\ abs(STFT\{n_1(t)\}(\tau, \omega) - STFT\{n'_1(t)\}(\tau, \omega)) \end{aligned} \quad (11)$$

同理,两路信号的相关性,对式(1)的两路信号在STFT域做声谱减法,能对信号加重,如式(12)。

$$\begin{aligned} abs(STFT\{x_1(t)\}(\tau, \omega) - STFT\{x_2(t)\}(\tau, \omega)) &= \\ abs\left(\frac{STFT\{s_1(t)\}(\tau, \omega) - STFT\{s_1(t - \tau)\}(\tau, \omega) +}{STFT\{n_1(t)\}(\tau, \omega) - STFT\{n'_1(t)\}(\tau, \omega)}\right) &\approx \\ abs(STFT\{n_1(t)\}(\tau, \omega) - STFT\{n'_1(t)\}(\tau, \omega)) + \\ abs(STFT\{f_1(\tau)\}) \end{aligned} \quad (12)$$

则在信号至少于噪声接近的假设下,结合式(11)、(12)较大强度值的时间频率窗为信号子空间存在区域。TFSD时频信号子空间延时估计算法的第2步使用声谱相减、信号的确立来实现信号子空间的估计。

3.3 端点值测定

STFT域问题在于时间和频率的分辨率不足,一般情况下定位要求是在20~40kHz采样频率,对于球形分布,间距为1m的多传感器的球形麦克风阵列,低精度下最小的时间粒度为0.2~0.5ms。

TFSD估计算法的第3步利用第3.1、3.2节对信号预处理后,一种方法利用时频信号的强度大小和波形的连续特征,获取延时的粗粒度信息;另一种方法是采用图像识别,判断相同波形的曲线的位置信息,具体过程如下。

1)从时频分析中结果数组数据中获得单列的最大值,及前几个大值。

2)判断时频窗各列最大值的大小,和各自列中前几个大值的相关度;如满足相关判据,并且最大值能明显区别噪声;即端点识别。

3)取出特征信号的开始与结束列,满足相关条件,取开始与结束列的列数。

4)对于两路麦克风得到两个对应的列数,它们的差值即为粗粒度的延时值。

3.4 延时的估计

对于不同方向,其延时差会不同,对角方向的延时要定位需要微妙的测量。TFSD估计算法的第4步使用多路加权最小二乘的延时估计方法进行延时测量。

麦克风阵列的分布如图1所示。其权重按照延时的大小进行分配,即某方向延时大该方向的权重的方法进行分配。总的TFSD的算法过程如表1所示。

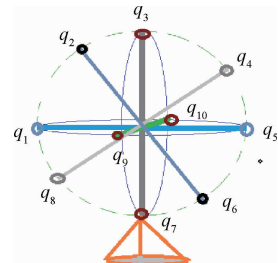


图1 球形麦克风阵列分布

Fig. 1 Distribution of spherical microphone array

表1 TFSD时频信号子空间延时估计算法

Table 1 TFSD time-frequency signal subspace delay time estimation algorithm

输入	多路采集数据 $x_i(t), i = 1, \dots, n$, 采样率等
第1步	滤波, 噪声、信号分离
第2步	时频信号区域确定
第3步	时频粗、细粒度结合估计, 信号子空间端点识别
第4步	延时加权估计
输出	多路麦克风的延时数据、空间方位角

4 数值仿真与分析

4.1 TFSD 算法的数值仿真

线性调频信号由起始频率 f_c 为 100 Hz, 本振信号的中心频率为 1 000 Hz, 线性调频的调制带宽为 2 000 Hz, 产生线性调频信号。两路麦克风滤波前波形如图 2 所示。

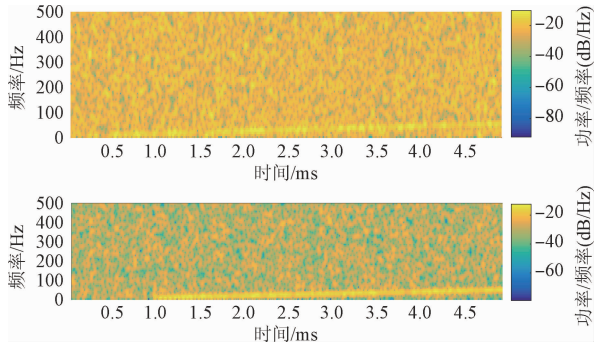


图 2 滤波前两个线性调频的 STFT 波形

Fig. 2 STFT waveforms of two LFM signals before filtering

使用小波滤波后, 其 STFT 图形如图 3 所示。

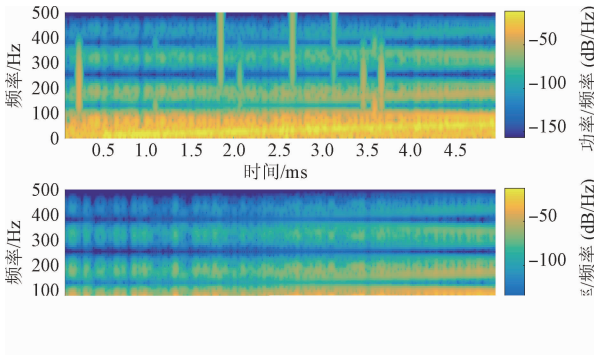


图 3 滤波后两个线性调频的 STFT 波形

Fig. 3 STFT waveforms of two LFM signals after filtering

对应于图 3 的不同噪声下, 其滤波后对应时域波形。对应于 STFT 强度大的区域, 其信号子空间主成分在该频率和时间的分布概率最大。

在 40 kHz 采样率的情况下, 采样 5 000 点, 设定两个麦克风的延时为 500 点, 粗粒度估计: STFT 的 FFT 计算窗为 2×512 点, 其频率分析的分辨率为 78.125 Hz, 其时间分析的分辨率为 0.0128 s, 重复测定的信号子空间为 [4, 5, 6] 和 [8, 9, 10] 的概率 > 90%, 粗粒度延时估计为 555.6 点。这里的 [4, 5, 6] 是第 1 路麦克风的经端点识别的信号列数, [8, 9, 10] 是第 2 路麦克风的经端点识别的信号列数。

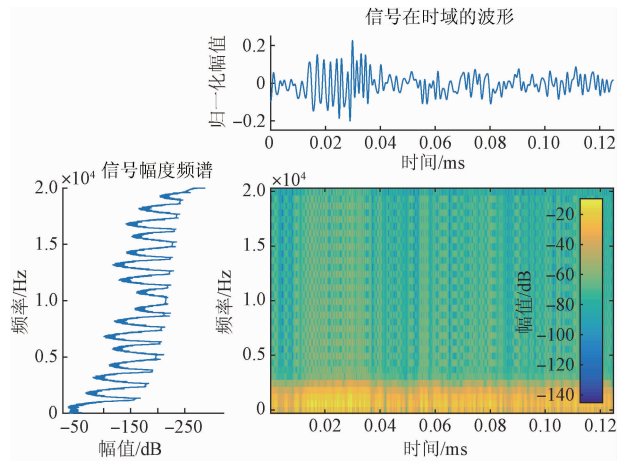


图 4 STFT 对应的时频域图形

Fig. 4 The time-frequency domain waveform of STFT

粗粒度的估计比较, STFT 的 FFT 计算窗为 2×32 点, 其频率分析的分辨率为 1 278 Hz, 其时间分析的分辨率为 0.8 ms, 用窗均值 (窗均值定义为每个窗函数对应实际时间的平均时间) 为粒度估计点, 测定信号开始的存在时间点为 378 ~ 455 点。

由于不同的窗宽, 其时间和频率的分辨率不同, 一般情况下, 是在保证信号时频特征明确可变的前提下, 选择较精细的时间分辨率。在实际做的时候, 是先保证 STFT 的 FFT 计算窗的估计点数尽量大, 当端点识别特征明确后, 降低计算窗的估计点数, 以获取较准确的粗粒度估计值。

据此确定信号区域, 在此区域内, 反演到时域, 得到子空间的波形如图 5 所示。其中图 5 中的下图比上图延时 500 点, 与实际符合。其中的细粒度的判别方法如下:

- 1) 识别最大值点, 有效的极值点 (比如前几个大的极值点);
- 2) 找到第一个相关极值点, 如图 5 的前 3 大的极值点中第 1 极值出现的位置;
- 3) 针对两路麦克风, 计算出它们的时间差;
- 4) 对多帧信号作平均, 得到延时值。

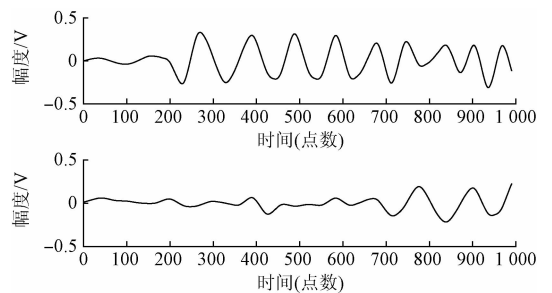


图 5 信号子空间区域的时域波形

Fig. 5 The time domain waveform in signal subspace

对其他常见的时频信号的数值结果与图2~5相似。

4.2 TFSD算法与其他算法的比较分析

与GCC-PHAT相比,TFSD结合时频信息,在噪声环境下表现了良好特性,图6所示为添加了加性白噪声,信噪比约为-14 dB的情况。该仿真采用了0.1 s的数据数据,采样频率为44 kHz。该算法每次测量两路数据,依据3.4节介绍的方法选择合适的数据。

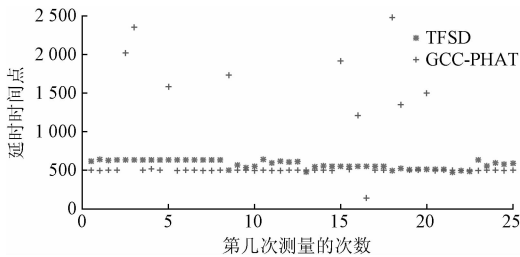


图6 信号子空间区域的时域波形

Fig. 6 The time domain waveform in signal subspace

由于TFSD算法采用了时频信息,直观性强,在实时监测情况、声音成像、故障分析上,优于目前目前GCC-PHAT算法。

在某大学实验室,通过使用9个麦克风,构成球形麦克风阵列,6只麦克风分别位于正方体的6个面上,其余3只麦克风位于6只的间隙里面且在同一个球面上,利用该算法,选择合适的方向的延时数据进行融合定位,定位误差在5 m × 5 m环境中,单方向误差小于10%。

模拟测试中线性调频的CHIRP信号通过Matlab编写产生,通过其声音发送程序把模拟故障信号通过音箱(音箱功率50 W)发送出去。

模拟测试步骤如下:1)设置发声位置,选择了5个位置(3.0,0)、(1.5,0)、(1.5,2.0)、(2.0,3.0)、(0,2.0),其中3表示x方向3 m,0表示y方向0 m,用米尺测量;2)让音箱发声持续约5 s进行测试,每隔1 min发送1次;3)进行测试,并平均。对应位置测量的平均值(未做舍入处理)为(2.71,0.02)、(1.61,0.03)、(1.45,1.89)、(1.85,3.09)、(0.05,1.89)。

5 结论

针对实际环境的复杂的时频信号,利用大噪声背景下的调频CHIRP信号,提出的TFSD时频信号子空间延时估计算法,该算法在大噪声下具有较强的鲁棒性,实现过程直观可靠、便于麦克风阵列实时监测、声音成像、故障分析,实现效果在大噪声环境下<10%,实际测试证实了该结果。

参考文献

- [1] BJELIC M R, BRKOVIC B, STANOJEVIC M, et al. Fault detection in induction motors using microphone arrays[C]. 2nd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IeETRAN, 2015.
- [2] 徐康乐, 陈迎春, 江渊, 等. 基于相控麦克风阵列的民机主起落架气动噪声源识别技术研究[J]. 空气动力学学报, 2015, 33(4):523-529.
XU K L, CHEN Y CH, JIANG Y, et al. Aerodynamic noise source detection for main landing gear based on phased microphone array technique [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2015, 33(4):523-529.
- [3] 陈正武, 王勋年, 李征初, 等. 基于声学风洞的麦克风阵列测试技术应用研究[J]. 实验流体力学, 2012, 26(3):84-90.
CHEN ZH W, WANG X N, LI ZH CH, et al. Application investigation of microphone array measuring and testing technique in anechoic wind tunnel [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(3):84-90.
- [4] 刘建平, 张一闻, 刘颖. 基于麦克风阵列的汽车笛语识别及笛声定位方法[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2012, 39(1):163-167.
LIU J P, ZHANG Y W, LIU Y. Recognition and localization of car whistles using the microphone array[J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(1):163-167.
- [5] TENG R C P, YANG Y. Noise source identification applied in electric power industry using microphone arrays[J]. Engineering, 2013, 5(5):152-156.
- [6] 王沁, 何杰, 张前雄, 等. 测距误差分级的室内TOA定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12):2851-2856.
WANG Q, HE J, ZHANG Q X, et al. Ranging error classification TOA algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12):2851-2856.
- [7] YAN J, TIBERIUS C J M, JANSSEN G J M, et al. Review of range based positioning algorithms [J]. Aerospace & Electronic Systems Magazine, 2013, 28(8):2-27.
- [8] STEPHENNE A, CHAMPAGNE B. Cepstral prefiltering for time delay estimation in reverberant environments[C]. IEEE International Conference on Acoustics, IEEE, 1995(5):3055-3058.
- [9] ZHAO C H, TANG A H, GANG L. A correction method of multichannel amplitude-phase error based on uniform circular array [J]. Applied Science & Technology, 2006, 33(1):32-34.
- [10] BENESTY J. Adaptive eigenvalue decomposition

algorithm for passive acoustic source localization [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 107(107):384-91.

- [11] DOCLO S, MOONEN M. Robust adaptive time delay estimation for speaker localization in noisy and reverberant acoustic environments [J]. Eurasip Journal on Applied Signal Processing, 2003, 2003(11):1-15.
- [12] DE MORI R. Spoken Dialogue with Computers [M]. Newyork: Academic Press, 1998.
- [13] DO H, SILVERMAN H F, YU Y. A real-time SRP-PHAT source location implementation using stochastic region contraction(SRC) on a large-aperture microphone array[C]. IEEE International Conference on Acoustics, 2007(1):121-124.
- [14] COBOS M, MARTI A, LOPEZ J J. A modified SRP-PHAT functional for robust real-time sound source localization with scalable spatial sampling [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(1):71-74.
- [15] 杨保海, 余香梅, 舒彤. 脉冲噪声环境下机械故障信号的盲分离[J]. 电子测量与仪器学报, 2016,30(3):440-447.
YANG B H, YU X M, XU T. Time-frequency blind source separation for mechanical fault signals under impulsed distributed noise condition [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30 (3): 440-447.
- [16] 李晓晖, 傅攀. 基于一维盲源分离的滚动轴承故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(6):535-542.
LI X H, FU P. Rolling bearing fault diagnosis based on dimension blind source separation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(6):535-542.
- [17] 臧敏, 陶钢. 被动声传感阵列测距测向分析[J]. 中国测试, 2009, 35(5):115-118.

ZHANG M, TAO G. Analysis of passive acoustic sensor array for ranging and direction finding [J]. China Measurement & Test, 2009, 35(5):115-118.

作者简介



邓昌建, 1968 年出生, 毕业于电子科技大学, 2015 年获博士学位, 现任成都信息工程大学副教授。目前主要研究方向为设备状态无线监控、恶劣环境物联网等。

E-mail: chenglidcj@cuit.edu.cn

Deng Changjian was born in 1968, and received Ph. D. from the University of Electronic Science and Technology in 2015. And he is associate professor in Chengdu University of Information Technology now. His present research interests include equipment condition wireless monitoring, and IoT technology under harsh environment and so on.



蒋世奇, 1971 年出生, 毕业于电子科技大学, 现任成都信息工程大学教授。目前主要研究方向为测控系统设计等。

E-mail: sqjiang@cuit.edu.cn

Jiang Shiqi was born in 1971, and graduated from the University of Electronic Science and Technology. And he is professor in Chengdu University of Information Technology now. His present research interests include design of measurement and control system and so on.



蔚泽峰, 1973 年出生, 毕业于电子科技大学, 现任成都信息工程大学副教授。目前主要研究方向为机械电子技术、机器人等。

E-mail: 29986197@qq.com

Wei Zefeng was born in 1973, and graduated from the University of Electronic Science and Technology. And he is associate professor in Chengdu University of Information Technology now. His present research interests include mechanical electronic technology, robot and so on.