

文章编号:1004-9037(2014)02-0309-07

道旁声学信号多普勒畸变校正

吴 强 何清波 孔凡让

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系,合肥,230026)

摘要:拾音器和声源的相对运动造成的多普勒效应使道旁声学信号的频谱发生了畸变,从而无法准确地反映设备状态。为了解决多普勒效应带来的采集信号频谱畸变,准确恢复原信号频谱结构,本文提出了一种基于频偏率的变采样技术方法,在通过外部条件获得信号频偏变化曲线后,根据频偏曲线获得每个采样点的频偏比例,利用变采样技术,通过插值方法获得新采样信号。该方法是对作者所提出的重采样技术校正多普勒频偏方法的深化和提高,使其能准确恢复原声学信号频偏结构。最后通过仿真信号和实验验证了该方法的有效性。

关键词:多普勒畸变;频偏率;声信号;故障诊断;变采样

中图分类号:TB52

文献标志码:A

Doppler Shift Correction for Wayside Acoustic Signals

Wu Qiang, He Qingbo, Kong Fanrang

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, China)

Abstract: Doppler effect due to the relative motion between microphone and acoustic source can cause the distortion of acoustic signal spectrum, which is not beneficial to accurately reflect equipment health conditions. In order to solve the Doppler effect of acquisition signal spectrum distortion and accurately restore the original signal spectrum structure, a signal variable sampling method based on frequency shift ratio is proposed, which can effectively solve the above problem of distorted spectrum for acoustic signals with the Doppler effect. Firstly, the curve of frequency shift is figured out with known conditions under measurement. Secondly, the frequency shift ratio of every sampling point is obtained based on the frequency shift curve. Finally, using variable sampling technology, the new sampling signal is obtained by the interpolation method. It improves the resampling method based on frequency shift curve, which has been proposed by the authors previously. The effectiveness of the proposed method is verified by both simulation and experiments.

Key words: Doppler shift; frequency shift ratio; acoustic signal; fault diagnosis; variable sampling

引 言

机械设备的的发展日趋大型化、高速化、精密化,为保证设备的安全可靠运行,便对设备的状态检测和故障诊断提出了更高的要求。对于列车轴承等旋转机械设备的在线故障诊断,采用车载振动传感器来采集信号,不仅设备造价昂贵,而且出现误警

的机率也高^[1]。机械设备的振动所产生的声学信号是机械波在传播媒介中的反映,由于声学信号具有非接触、易测量、设备简单等特点,通过对声学信号的处理,可发现设备的故障状态,因此可通过监测列车部件声学信号的方法,来分析判断设备状态,达到故障诊断和状态监测的目的。该方法设备成本低,通用性好^[2],目前已经成为列车轴承在线故障诊断的发展方向。

多普勒效应研究的方向大多集中在测速和移动目标识别^[3],对因多普勒效应引起的频谱畸变的研究较少。基于道旁采集的声学信号,由于拾音器和列车有相对运动,存在多普勒效应,使声学信号的频谱结构发生了畸变,无法得出正确的分析结果。因此,如何消除或减少声学信号的多普勒畸变是故障诊断亟待解决的问题。孙川等^[4]提出通过预先计算出的多普勒频偏,修正接收机中数字频率合成器输出的本振频率,从而消除多普勒频偏的方法。Shairf B S 等^[5]提出对水声通信中多普勒频移采用重采样的修正方法,并通过仿真实验证实了该方法的有效性。考虑到基于道旁的声学信号的多普勒畸变是随时间变化的变量,上述方法并不适用。针对列车道旁声学信号特点,作者曾提出基于频偏曲率的重采样方法^[6],较好地解决了低速状态下多普勒频偏校正问题,但对于高速相对运动状态和校正精度要求较高的情况下,无法满足相应的要求。本文提出了基于频偏曲率的变采样技术处理采样信号的方法,并通过实验验证了该方法的有效性。

1 多普勒效应

多普勒效应是指当声源或拾音器(或两者)相对介质运动而造成拾音器接受频率发生改变的现象。当声源的运动方向在声源与拾音器两者连线上时,多普勒效应的频率变化公式^[7]为

$$f = f_0 \frac{u + v_2}{u - v_1} \quad (1)$$

式中: f_0 是声源频率; f 是拾音器收到的频率; u 是声音在介质中的传播速度; v_1 、 v_2 分别是声源和拾音器速度。

当声源的运动方向不在声源与拾音器两者连线上时,多普勒效应的频率变化公式为

$$f = f_0 \frac{u \pm v_2 \cos\beta}{u \pm v_1 \cos\alpha} \quad (2)$$

式中: f_0 是声源频率; f 是接收器收到的频率; u 是声音在介质中的传播速度; v_1 、 v_2 分别是声源和拾音器速度; α 、 β 分别是 v_1 、 v_2 与接收器到声源的连线夹角;“+”表示声源靠近拾音器,“-”表示声源远离拾音器。

为了和基于道旁声学信号分析故障诊断现场情况相一致,本文假定声源移动,拾音器相对固定。如图 1 所示,声源以速度 v 沿 A 点向 C 点运动,拾音器在 O 点,在常温下,声波在空气中传播速度为 c ,即 $u = c$, $v_1 = v$, $v_2 = 0$,由式(2)可知,多普勒效应

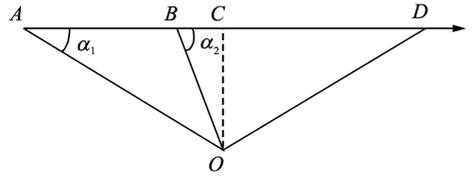


图 1 多普勒效应位置示意图

Fig. 1 Point location of Doppler effect

公式简化为

$$f = \frac{c}{c \pm v \cos\alpha} f_0 = \frac{1}{1 \pm Ma \cos\alpha} f_0 \quad (3)$$

式中: $Ma = v/c$ 为马赫数, α 为拾音器和声源连线与运动方向的夹角。

当声源与拾音器的连线在声源运动方向上时,此时 $\alpha = 0$,式(3)可改写为

$$f = \frac{1}{1 \pm Ma} f_0 = k f_0 \quad (4)$$

式(4)表明,声源与拾音器的连线在声源运动方向上时,多普勒频移仅和马赫数 Ma 有关,且声源在以恒定速率运动时, Ma 是个常数,频偏是按固定比例 k 变化的。不考虑幅值变化带来的影响,通过重采样技术可以有效地解决该问题,恢复原信号真实的频谱结构,从而为故障诊断提供可靠的依据。

2 重采样技术与变采样技术在频偏校正中的应用

2.1 重采样技术在频偏校正中的应用

多普勒效应是由于声源和拾音器的相对运动使声波在介质中的波长发生了变化,从而使采样信号频谱结构发生了畸变^[7]。

重采样技术是通过采样率的变换,如提高 L 倍或者降低 M 倍采样率,从一种数字信号采样得到另外一种数字信号的方法。利用重采样技术可以有效地实现从均匀到均匀,非均匀到均匀的插值^[8]。

当声源和拾音器存在相对运动时,拾音器按等时间间隔采样得到的信号由于多普勒效应的存在其信号频谱会发生畸变。根据声源和拾音器相对位置关系分为以下两种情况:(1)声源和拾音器的连线在声源运动方向上时,由式(4)可知,原信号频谱按固定比例 k 发生畸变,将采样信号按 $1/k$ 比例重新采样可有效解决该问题^[9];(2)当声源和拾音器的连线不在声源运动方向上时,由式(3)可知,采样信号的频偏是个时间变量 $f(t)$,此时对原信

号按固定比例重采样,则无法实现恢复原信号的真实频谱。

基于重采样技术的频偏校正算法是在通过外部条件获得信号频偏变化曲线后,将频偏率区间分为 n 等份,每等份大小为 Δ ,由于 Δ 区间较小,包含的频偏率值较少,且数值基本接近,可近似地认为在 Δ 内所有频偏率为同一值,用 Δ 内一个指定值(如 Δ 的中点值)代替所有频偏率值,对该段内信号通过重采样得到校正后信号,分段重采样后的信号为纠偏信号。该算法由于采用段内平均频偏率替代段内所有变化率,在声源低速状态下,效果较好,但在高速状态下,纠偏精度下降。

2.2 变采样技术在频偏校正中的应用

在机械故障诊断领域,如基于铁路轨边诊断系统、基于道旁汽车故障诊断等,声源和拾音器的连线不在声源运动方向上,而恢复采样信号的真实频谱又是故障诊断的必要前提。针对这种情况,本文提出基于频偏率的变采样技术校正多普勒频偏的方法。

变采样技术是重采样技术的一个特例,但实现方法又不同于重采样技术。重采样是通过对整个已采样信号的采样率提高 L 倍或者降低 M 倍,将一种数字信号转换为另外一种信号的方法;而变采样技术则是根据一定规则,通过调整已采样信号的采样时间点获得一组新采样信号,从而将一种数字信号转换为另外一种信号的方法。

本文假定以下条件成立:(1)已知声源和拾音器的相对速度,且在短时间内,认为相对速度恒定;(2)在拾音器采样数据的起始点和结束点,声源和拾音器的相对位置已知。条件(1)可在采样数据的同时用测速装置获得运动声源的速度;条件(2)可在指定点,通过触发光电装置,打开或关闭采样设备。因此上述假设在工程实际中,完全可实现。

由式(3)可知,采集的信号频偏主要受马赫数 Ma 和角度 α 的影响。当相对速度越大,马赫数 Ma 就越大,频偏也就越大;由于马赫数 Ma 和角度变量 α 在采集信号的同时是可获得的,因此由式(3)可得出信号频偏率

$$f_r = \frac{1}{1 \pm Ma \cos \alpha} \quad (5)$$

频偏率 f_r 为信号采集频率与原频率之比,反映了信号的频偏程度。图 2 是某马赫数时频偏率示意图,图中横坐标表示时间,纵坐标表示频偏率

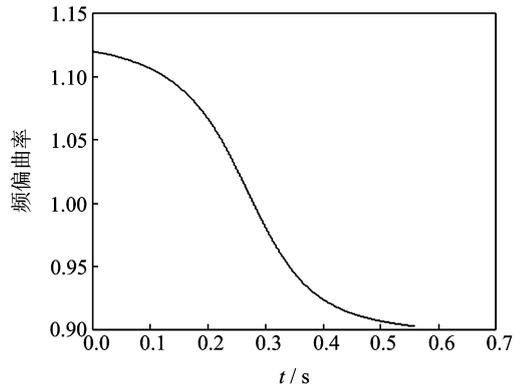


图 2 频偏率示意图

Fig. 2 Curved shape of frequency shift

f_r ,由图可见,当马赫数 Ma 一定时,频偏率 f_r 是随角度 α 变化的变量,而角度 α 又是时间 t 的变量,因此频偏率 f_r 是时间 t 的函数,且在每个时刻都不同,可见每个采样点的信号频率变化率都是不一样的。

由于声源和采集装置的相对运动,使得采样信号频谱发生了畸变,而导致频谱畸变的根本原因在于声波波长的变化。变采样方法就是根据相对运动造成的声波波长变化,通过改变采样时间,使得相邻采样点处于信号的等相位声波上,从而恢复原信号频谱结构。

2.3 频偏校正中变采样技术的实现方法

设声学信号在空气媒介中传播,常温下,速度为 c ,声源发出单一频率声波,频率为 f_0 ,波长为 λ_0 ,声源相对运动速度为 u ,马赫数为 $Ma = u/c$,拾音器和声源连线与声源运动方向连线的夹角为 α ,如图 3 所示。

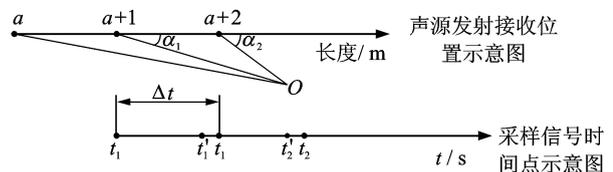


图 3 变采样校正示意图

Fig. 3 Correcting frequency by variable sampling

假定声源在点 a 发出声信号 x_0 ,接收器在点 O 的 t_0 时刻接收到该信号 x_0 。经过 $\Delta t = \frac{1}{f_s}$ 时间,其中 f_s 为信号采样频率,声源移动到点 $a+1$ 时。如果声源和接收器之间没有相对运动,此时声源在点 $a+1$ 所发出信号,就是接收器在点 O 的 $t_0 + \Delta t$

时刻获得接收信号 x_1 。由于声源和接收器的相对运动,使得发射信号的波长发生了变化,从而发射信号到达接收器的时间也发生了变化。设在点 $a+1$ 发射信号的信号波长为 λ_0 ,由式(3)可知,接收器在点 O 接收到的信号频偏为

$$f_1 = \frac{1}{1 \pm Ma \cos \alpha_1} f_0 \quad (6)$$

即接收信号的波长变为

$$\lambda_1 = (1 \pm Ma \cos \alpha_1) \lambda_0 \quad (7)$$

由于点 a 到点 $a+1$ 的距离极小,从而近似认为这段距离产生的信号波长为同一数值。则发射信号到达点 O 的采样间隔时间为

$$\Delta t'_1 = \frac{\lambda_1 \cdot \Delta t}{\lambda_0} \quad (8)$$

由此可见,在 $t'_1 = t_0 + \Delta t'_1$ 时刻采集的信号才是声源在 $a+1$ 时刻所发出的真实信号。

由于 t_0, t_1 和 t'_1 时刻均已知,且 t_0 和 t_1 时刻的采样数值也已知,可通过插值方法获得 t'_1 时刻的近似采样值 y'_1 ,将 t'_1 时刻的采样值 y'_1 作为变采样后 t_1 时刻的采样值。

当声源再经过时间 Δt ,运动到点 $a+2$ 处,此时式(7)中角度 α 发生了变化,采集信号的波长变为

$$\lambda_2 = (1 \pm Ma \cos \alpha_2) \lambda_0 \quad (9)$$

到达点 O 的采样间隔时间变为

$$\Delta t'_2 = \frac{\lambda_2 \cdot \Delta t}{\lambda_0} \quad (10)$$

声源在点 $a+2$ 处发出的声波,到达采集点实际时刻应为 t'_2 。

$$x'_2 = x'_1 + \Delta t'_2 = t_0 + \Delta t'_1 + \Delta t'_2 \quad (11)$$

通过插值获得 t'_2 时刻的采样值 y'_2 。依此类推,即可获得变采样后的新采样信号 $y = (y'_1, y'_2, y'_3, \dots)$ 。

基于频偏率的变采样算法步骤如下:

- (1) 通过实际工程测量获得采样信号的频偏率;
- (2) 根据采样点频偏率大小,计算新的采样点时间位置;
- (3) 通过线性插值方法获得新采样点的采样值;
- (4) 以前一个采样点为基准,再次计算下一个采样时间点位置,并通过插值方法获得新采样点的采样值;
- (5) 完成所有采样点的重采样后,将新采样数据按原采样率计算信号频谱,即可获得原信号真实频谱。

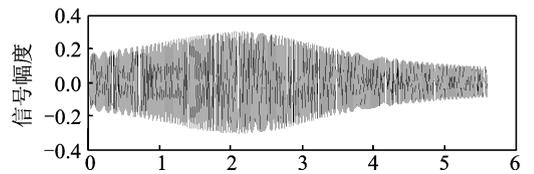
3 实验验证

3.1 仿真实验

假设拾音器不动,如图 1 所示, O 点为接收器位置,声源沿着 AC 方向运动,在 A 点开始采集信号,点 D 结束采集信号,采样频率为 10 kHz,常温下声波速度为 $c = 340$ m/s,声源运动速度为 40 m/s, OC 距离为 5 m,声波为频率为 2 000 Hz 的单频信号, A 点和 D, C 点间的距离都是 11.18 m。由文献[10,11]可知,多普勒信号的时域表达式为

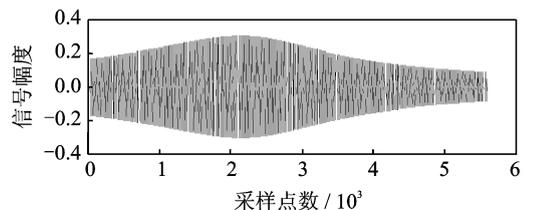
$$f(t) = \frac{\cos(\omega(t - (R(t)/c)))}{4\pi R(t)(1 - Ma \cos(\theta(t)))^2} \quad (12)$$

式中: $R(t)$ 为运动声源到接收器的瞬时距离, $\cos(\theta(t))$ 为声源运动方向和 $R(t)$ 之间的瞬时夹角 α 。由式(3),可得出频偏曲率图,如图 2 所示。由式(12)可得出多普勒畸变时域图,同时为了比对本方法的有效性,建立正常无畸变信号,如图 4 所示,从图中明显可看出正常信号时域波形连续光滑,而具有多普勒效应的信号时域波形则呈现出锯齿状,造成这种现象的原因正是多普勒效应,使原本规律的采样信号变成随时间和速度参数而变化的多普勒信号。图 5 为采样信号处理前后的频谱对比图。由图可见,未处理前的信号,由于多普勒效应的影响,单频信号的频谱以单频为中心向两边展宽,采用本文所提方法对畸变信号进行处理后,信号频谱结构得到显著改善,恢复正常。



(a) 多普勒畸变信号时域图

(a) Time domain signals of Doppler effect

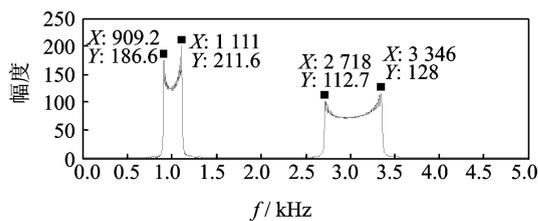


(b) 正常信号时域图

(b) The normal signals in time domain

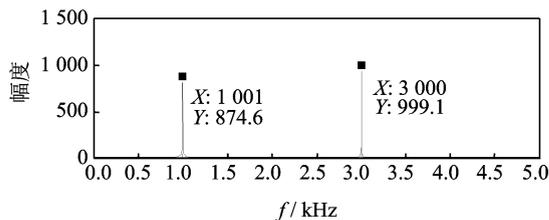
图 4 多普勒效应信号和正常信号时域图

Fig. 4 Time domain signals of Doppler effect and normal



(a) 多普勒效应信号频谱图

(a) Frequency spectrum of Doppler effect signals



(b) 基于频偏曲率变采样信号频谱图

(b) Frequency spectrum of Doppler signals with variable sampling based on frequency shift curve

图 5 信号频谱对比图

Fig. 5 Frequency spectrum of original and processed signals

3.2 实验验证

为了验证本文所提方法的有效性,作者在室外进行了多普勒效应实验。实验流程如图 6 所示,信号采集系统由声学传感器、信号放大器、数据采集卡、采集信号笔记本计算机、连接线及接口等组成,其中声学传感器采用 B&K 公司的 1/4 英寸的 4938 压力场传感器,频率范围 4~70 kHz,极化电压 200 V,灵敏度 1.6 mV/Pa,声学传感器用卡扣固定在三脚架顶端,位置高度等于声源离地高度,水平方向距离声源的运动直线 2 m。

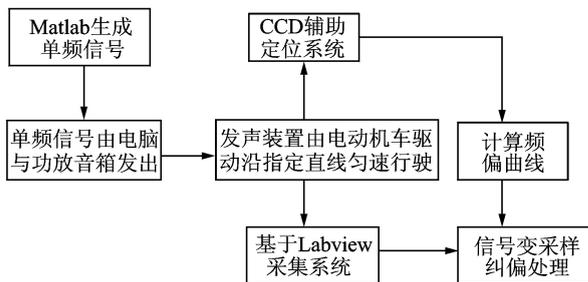


图 6 多普勒效应实验流程图

Fig. 6 Doppler experimental flow chart

电荷放大器采用传感器自配的前置放大器,接口电路采用屏蔽式接线盒,将放大器输出信号接入数据采集卡。数据采集卡采用 NI 公司生产的 PCI-6024E 型 12 位精度,16 路模拟输入的高速多功能数据采集卡,采样速率达到 200 kS/s,电压的

输入范围 $\pm 0.05 \sim \pm 10$ V,输出范围为 ± 10 V。

实验信号为频率 $f=3\ 000$ 和 500 Hz 的两个单频声信号,采样频率为 50 kHz。为了降低牵引动力的噪声,采用电动机车在水泥路面上,以恒定时速 $v=8$ m/s 沿直线在平坦的水泥路面上行驶,麦克风距离车辆直线行驶的垂直距离 $OC=2$ m,CCD 辅助定位系统通过摄录发声设备经过指定的带有标识的路线,将图像时间和采集信号时间相对应,获取发声信号位置信息。图 7,10 分别为麦克风实际采集的 $3\ 000$ 和 500 Hz 信号,从图中可知,多普勒现象较明显,图 8 和图 11 为实际采集的信号频谱,在 $3\ 000$ 和 500 Hz 左右发生了明显的频率展宽,图 9 和图 12 是基于频偏率的变采样信号频谱图,可见采用本文提出的方法处理后,原来展宽的信号频谱基本收敛在 $3\ 000$ 和 500 Hz 左右,多普勒效应产生的信号频谱畸变基本解决。而比对比图 5(a)和图 8 可知,图 5(a)的仿真信号多普勒畸变展宽很大,而图 8 的信号畸变展宽较小,是由于

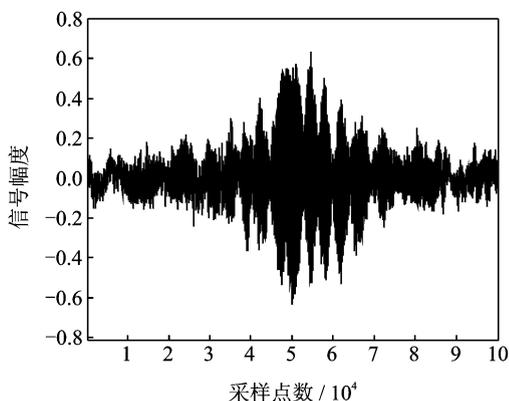


图 7 多普勒效应信号时域图(3 000 Hz)

Fig. 7 Time domain signals of Doppler effect (3 000 Hz)

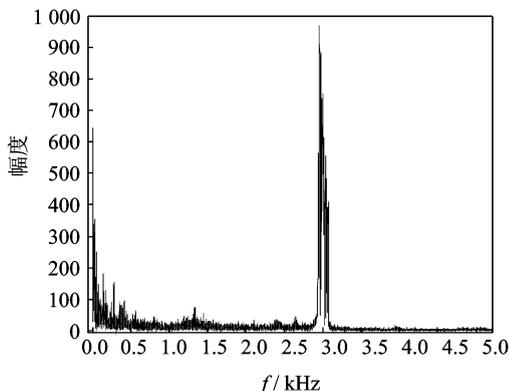


图 8 多普勒信号频谱图(3 000 Hz)

Fig. 8 Frequency spectrum of Doppler signals (3 000 Hz)

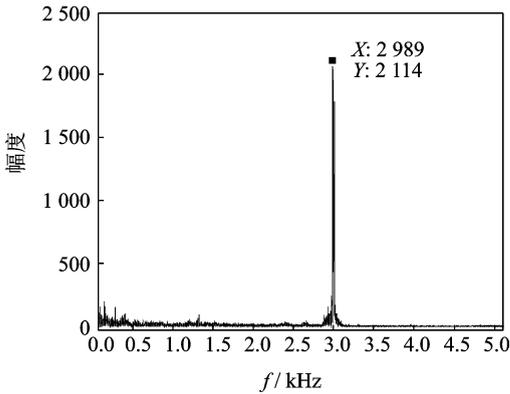


图 9 基于频偏率变采样的信号频谱图(3 000 Hz)

Fig. 9 Frequency spectrum of Doppler signals with variable sampling based on frequency shift curve(3 000 Hz)

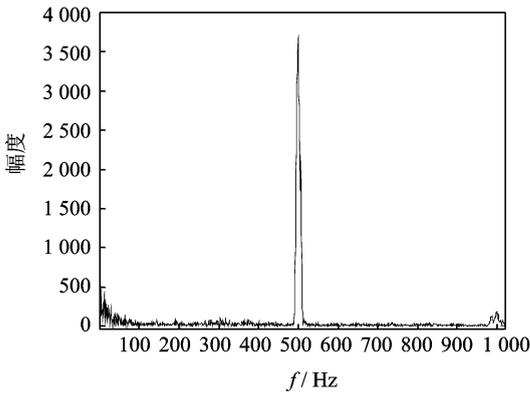


图 11 多普勒信号频谱图(500 Hz)

Fig. 11 Frequency spectrum of Doppler signals (500 Hz)

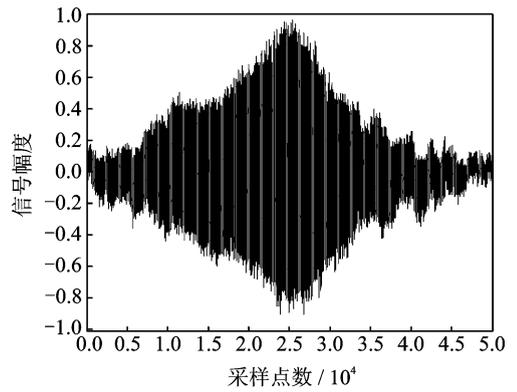


图 10 多普勒效应信号时域图(500 Hz)

Fig. 10 Time domain signals of Doppler effect (500 Hz)

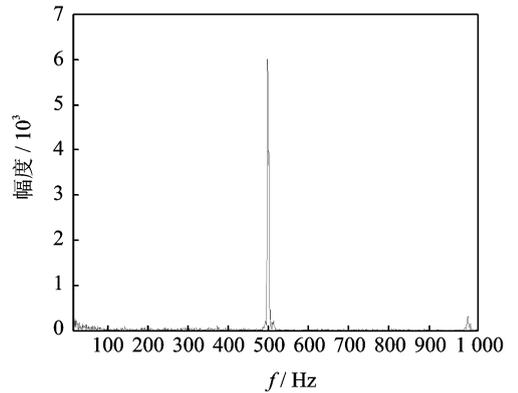


图 12 基于频偏率变采样的信号频谱图(500 Hz)

Fig. 12 Frequency spectrum of Doppler signals with variable sampling based on frequency shift curve(500 Hz)

仿真信号的时速较大,约为实验信号的 5 倍,相应的频偏率也就较大,频带发散就越广。

4 结束语

本文所提出的基于频偏率的变采样方法,可以有效纠正因多普勒效应而造成的信号频谱畸变问题,为声学故障诊断提供了理论依据。本文所提方法基于已知相对速度和相对位置的前提,可以有效地纠正频偏效应。如何在相对速度和位置未知的情况下,有效纠正多普勒效应带来的频偏效应,将是今后研究的主要方向。

参考文献:

- [1] Lagnebäck R. Evaluation of wayside condition monitoring technologies for condition-based maintenance of railway vehicles [D]. Luleå: Luleå University of Technology, 2007.
- [2] 刘瑞扬,王毓民. 铁路货车滚动轴承早期故障轨边声学诊断系统原理及应用[M]. 北京:中国铁道出版

社,2005:70-73.

Liu Ruiyang, Wang Yuming. Early fault of rolling bearing of freight wagon diagnostic system principle and application based on acoustics of rail wayside [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005:70-73.

- [3] 方菲菲,余稳. 基于 PCA-LDA-SVM 的多普勒雷达车型识别算法[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(1): 111-116.
Fang Feifei, Yu Wen. Vehicle recognition algorithm with Doppler radar based on PCA-LDA-SVM [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012, 27(1): 111-116.
- [4] 孙川,梅顺良. 卫星通信中多普勒频偏的预校正[J]. 电波科学学报, 2006, 21(2): 224-228.
Sun Chuan, Mei Shunliang. Doppler shift estimation and pre-compensation of satellite communication [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(2): 224-228.
- [5] Sharif B S, Neasham J, Hinton O R, et al. A compu-

- tationally efficient Doppler compensation system for under water acoustic communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1):52-61.
- [6] 吴强,孔凡让,何清波,等.基于重采样技术的声学信号多普勒畸变校正[J].信号处理,2012,28(9):1308-1313.
- Wu Qiang, Kong Fanrang, He Qingbo, et al. Doppler shift correction for acoustic signals using resampling[J]. Signal Processing, 2012, 28(9):1308-1313.
- [7] 李崇虎.适用于不同条件的多普勒效应公式[J].西南师范大学学报:自然科学版,2007,32(2):145-148.
- Li Chonghu. The general Doppler formula being fit for several distinct conditions [J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2007, 32(2):145-148.
- [8] 常文革,宋千,梁甸农.重采样插值技术实现与应用[J].系统工程与电子技术,2000,22(5):87-89.
- Chang Wenge, Song Qian, Liang Diannong. Implementation and application of resampling interpolation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(5):87-89.
- [9] 张翔.水声通信中多普勒频移补偿的仿真研究[J].系统仿真学报,2005,17(5):1172-1174.
- Zhang Xiang. Simulation research on Doppler compensation for underwater acoustic communications [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5):1172-1174.
- [10] 谢富科.基于近场声全息的运动车辆噪声源识别方法研究[D].长春:吉林大学,2007.
- Xie Fuke. Moving vehicle noise source identification method based on nearfield acoustic holography[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [11] 邢优胜,宋雷鸣.运动声源的多普勒信号仿真[J].声学技术,2005,24(3):190-192.
- Xing Yousheng, Song Leiming. Simulation of Doppler signal from moving acoustic sources [J]. Technical Acoustics, 2005, 24(3):190-192.

作者简介:吴强(1972-),男,博士研究生,研究方向:机械设备状态监测与故障诊断;何清波(1980-),男,副教授,研究方向:机械设备状态监测与故障诊断, E-mail: qbhe@ustc.edu.cn;孔凡让(1951-),男,教授,博士生导师,研究方向:机械设备状态监测与故障诊断。