

基于广义 S 变换的超声多普勒信号瞬时速度提取

王源果, 俞文力, 郑驰超, 赵巍, 彭虎

(合肥工业大学医学工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要: 多普勒回波信号中瞬时速度的提取对目标的运动状态分析具有重要意义, 但由于其非平稳性的限制, 一般的分析方法无法提供足够的时频聚焦性能. 针对这个问题提出了基于广义 S 变换的超声多普勒信号瞬时速度提取方法, 并进行了计算机仿真和实验验证. 在仿真上设定超声波入射一个往复运动的质点得到了多普勒回波信号, 在实验上设计了一个往复运动的机械装置, 超声探头发射超声波并接收回波信号. 通过对回波信号进行广义 S 变换, 提取了信号的瞬时频率, 并计算得到瞬时速度. 计算机仿真和实验研究表明了广义 S 变换在超声多普勒信号中运动目标的瞬时速度提取上的有效性.

关键词: 多普勒; 广义 S 变换; 瞬时速度; 往复运动

中图分类号: O426.9 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2016.02.00

引用格式: Wang Yuanguo, Yu Wenli, Zheng Chichao, et al. Extraction of instantaneous velocity in ultrasonic doppler signal based on generalized S transform[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2016, 46(2):130-137.

王源果, 俞文力, 郑驰超, 等. 基于广义 S 变换的超声多普勒信号瞬时速度提取[J]. 中国科学技术大学学报, 2016, 46(2):130-137.

Extraction of instantaneous velocity in ultrasonic doppler signal based on generalized S transform

WANG Yuanguo, YU Wenli, ZHENG Chichao, ZHAO Wei, PENG Hu

(School of Medical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Extraction of instantaneous velocity in doppler echo signal is of great significance to the analysis of target motion state. However, general analytical methods can not provide sufficient time-frequency focusing performance due to the restriction of nonstationarity. A method based on generalized S transform (GST) was suggested to extract instantaneous velocity from the ultrasonic doppler signal, and computer simulation and experiment verification were carried out. In the simulation, a model system was set up, which contains a reciprocating dot. The doppler echo signal was produced by transmitting ultrasonic waves to the reciprocating dot. In the experiment a machinery device with reciprocating movements was designed, which gets echo signal by transmitting ultrasonic waves. The instantaneous frequency was obtained by processing the echo signal with GST and the instantaneous velocity was calculated. The

收稿日期: 2015-10-21; **修回日期:** 2015-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(61172037), 国家自然科学基金青年科学基金(61201060), 国家重大科学仪器设备开发专项项目(2013YQ200607, 2012YQ200224)资助.

作者简介: 王源果, 男, 1992年生, 硕士生. 研究方向: 生物医学工程. E-mail: g4idrijs@sina.com

通讯作者: 彭虎, 博士/教授. E-mail: hpeng@hfut.edu.cn

computer simulation and experiment demonstrate the effectiveness of extraction of instantaneous velocity of the moving target in the doppler echo signal by GST.

Key words: doppler; generalized S transform; instantaneous velocity; reciprocating movement

0 引言

多普勒信号是随时间变化的非平稳随机信号,承载了运动目标的位置、径向速度和物体运动等特征信息^[1],其特征信息的提取能够对目标运动状态进行分析.近几十年,多普勒测速技术在水利、航空、医学等众多行业领域应用广泛^[2].多普勒信号的分析处理是整个多普勒速度检测过程中至关重要的一环.传统的信号分析处理方法如自相关法、傅里叶变换法等,只能得到信号的频率分量,不能指出某种频率成分出现在什么时候及其变化情况,即不能获得瞬时频率.瞬时频率是信号的时频特征,常被用于表征自然界中时变信号的物理参数,对非平稳信号的分析具有重要意义^[3].瞬时频率估计在雷达、声呐、语音处理、机械诊断、电力系统、地震分析以及生物医学等领域都有广泛的应用^[4].

基于多普勒原理,利用多普勒信号检测运动物体的瞬时速度,可转化为检测多普勒信号的瞬时频率.为了检测多普勒信号的瞬时频率,多篇文献介绍了信号处理的方法.文献[5]采用非线性能量算子进行多普勒信号瞬时频率的估计;文献[6]提出了基于小波变换的多普勒频率估计方法来计算多普勒信号的瞬时频率;文献[7]利用希尔伯特变换提取单声源的瞬时速度,但受背景噪声影响较大,需另外应用降噪方法;文献[8]首次将 Hilbert-Huang 变换应用于激光测速仪瞬时速度的提取;文献[9]利用 Wigner-Ville 分布(WVD)用于超声海流多普勒回波信号的瞬时速度的计算;文献[10]提出了多项 Wigner-Ville 分布方法在多普勒速度估计中的应用,并进行了与短时傅里叶变换和小波变换的性能对比.文献[3]将匹配 Wigner 变换应用于超声多普勒信号的瞬时频率估计,以得到运动物体的速度.这些方法得到的时频谱的精度受噪声影响,时频聚焦性能不理想,且计算较为复杂.

为了解决多普勒测量中如何获取瞬时速度的问题,本文提出了基于广义S变换的瞬时速度提取方法.广义S变换是S变换^[11]的一种变型,加入了窗函数的调节参数,具有良好的时频聚焦性能,克服了如短时傅里叶变换和变换等时频分析方法的缺陷,

适合于处理非平稳信号,已经广泛应用在地震、电力和机械等领域^[12-15].

本文从仿真和实验两个方面对S变换测量运动物体速度进行了实验研究.首先发射超声波到运动物体,利用广义S变换对超声回波信号进行处理,得到了随时间变化的多普勒信号,然后通过时频分析提取了信号的瞬时频率,进而得到运动目标的瞬时速度.

1 速度测量原理

1.1 多普勒速度测量

多普勒测量系统可以分为连续波多普勒系统和脉冲多普勒系统两大类型^[16].本文采用连续波多普勒系统.多普勒测量示意图如图1,A和B分别为超声发射探头和超声接收探头,C是一个沿水平方向运动目标.

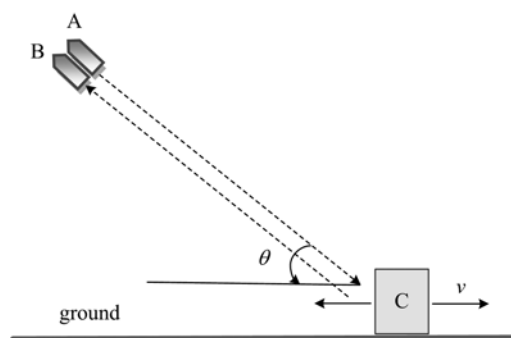


图1 多普勒测量示意图

Fig.1 Schematic diagram of Doppler measurement

设连续波多普勒测速系统的发射信号为 $s_t(t)$, 回波信号为 $s_r(t)$, A 为超声发射信号的幅度, f_0 为发射信号频率, f_r 为接收信号频率, φ_0 为初始相位, c 为超声波在介质(这里是空气)中的传播速度.

超声发射信号如下:

$$s_t(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (1)$$

多普勒频移为

$$f_d = f_r - f_0 = \frac{2v \cos \theta}{c} f_0 \quad (2)$$

可知,多普勒频移 f_d 正比于相对运动速度,当目标向探头方向运动时, f_d 为正值,接收频率高于发射频率,而目标远离探头运动时, f_d 为负值,接收

频率低于发射频率.

根据多普勒频移表达式可计算出运动目标的速度,如下式表示:

$$v = \frac{f_r - f_0}{2\cos\theta f_0} c \quad (3)$$

1.2 广义 S 变换

S 变换是从短时傅里叶变换发展过来的. 为了得到信号的频率和时间的关系, 短时傅里叶变换对信号施加一个时间窗, 通过对时间窗内的傅里叶变换实现信号的频率和时间关系的测量. 但由于时间窗是固定的, 短时傅里叶变换的分辨率无法随频率变化. 而 S 变换采用的时间窗是随频率变化而变化的高斯窗, 时频分辨率可以随频率变化可调.

假设 $h(t)$ 是一个一维连续信号, 则 $h(t)$ 的 S 变换表示为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f t} dt \quad (4)$$

窗函数为

$$\omega(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} \quad (5)$$

由于 S 变换存在白噪声功率随频率增高而线性增大和时频分辨率变化趋势不变等问题, 所以需要对 S 变换中的高斯窗函数进行改造, 得到广义 S 变换^[17].

广义 S 变换定义为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi} |\gamma_{GS}|} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2\gamma_{GS}^2}} e^{-i2\pi f t} dt \quad (6)$$

由上式可知, 广义 S 变换相对于 S 变换增加了调节参数 γ_{GS} , 改造了 S 变换的高斯窗函数, 使其能根据实际应用中非平稳信号的频率分布特点和时频分析的侧重点, 灵活地调节高斯窗函数随频率尺度 f 的变化趋势, 进一步加快或减慢时窗宽度随信号频率变化的速度^[18], 能够更好地适应非平稳信号的分析处理.

广义 S 变换的表达式可由 $h(t)$ 的傅里叶谱 $H[f]$ 运算得到, 表示为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H[\alpha + f] e^{-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}} e^{i2\pi \alpha \tau} d\alpha \quad (7)$$

根据上式可知, 可以通过快速傅里叶变换 (FFT) 来计算离散广义 S 变换, 表达式为

$$S[jT, \frac{n}{NT}] = \sum_{m=0}^{N-1} H[\frac{m+n}{NT}] e^{-\frac{2\pi^2 m^2 \gamma_{GS}^2}{n^2}} e^{i2\pi mn/N} \quad (8)$$

当 $n=0$ 时

$$S[jT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} H[\frac{m}{NT}] \quad (9)$$

式中, N 为采样点数; T 为采样时间间隔; j, m 和 n 分别为控制移位偏移量、时间采样点和频率采样点, 均在 $[0, N-1]$ 之间; $H(\frac{n}{NT})$ 是 $h(nT)$ 的离散 FFT 变换.

广义 S 变换的结果是一个二维复数矩阵. 其列对应频率, 行对应采样时刻, 对矩阵的各复数元素求模能够得到相应频率成分不同时刻的幅值.

2 广义 S 变换的瞬时速度测量仿真及实验

2.1 窗函数调节参数 γ_{GS} 的设置

广义 S 变换通过引入调节参数 γ_{GS} 改变了标准 S 变换的高斯窗函数. γ_{GS} 的增大会使高斯窗函数变宽, 减小会使高斯窗函数变窄, 影响广义 S 变换的信号处理效果.

为了研究窗函数调节参数 γ_{GS} 的设置, 人工合成了频率按正弦变化的信号, 通过试验不同的 γ_{GS} 对信号进行广义 S 变换, 从而经过对比后得到最佳的变换结果. 设置信号的中心频率 $f_0 = 2\,180\text{ Hz}$, 采样率 $F_s = 19\text{ kHz}$. 信号的表达式如下:

$$x(t) = \cos(2\pi f_0 t + 100\cos(6.6\pi t)) \quad (10)$$

图 2 为仿真得到的结果, (a) 为合成信号, (b), (c) 和 (d) 分别为窗函数调节参数 γ_{GS} 设置为 10, 35 和 50 时得到的时频谱图. 可以看出, 在 γ_{GS} 为 35 时, 合成的频变信号的时频谱聚焦性能最好.

2.2 多普勒测量模型建立及仿真

下面将广义 S 变换应用在仿真多普勒回波信号上, 得到信号的频率和时间的关系, 提取瞬时频率, 进而根据式 (3) 求得运动物体的速度, 观察其性能.

首先建立一个多普勒信号测量模型, 如图 3 所示, 模型中设计一个做来回往复运动的质点, 其速度连续变化, 设定其按照正弦规律变化, 构成一个单一速度按正弦变化的运动质点. 超声发射和接收探头并排放置并与质点位于同一水平线上.

质点的运动速度为

$$v(t) = K\sin(2\pi f_1 t) \quad (11)$$

式中, K 为速度系数, 为一个常量. f_1 是简谐运动的频率. 当 $v(t) > 0$ 时, 物体向右运动, 远离探头; 当 $v(t) < 0$ 时, 物体向左运动, 靠近探头.

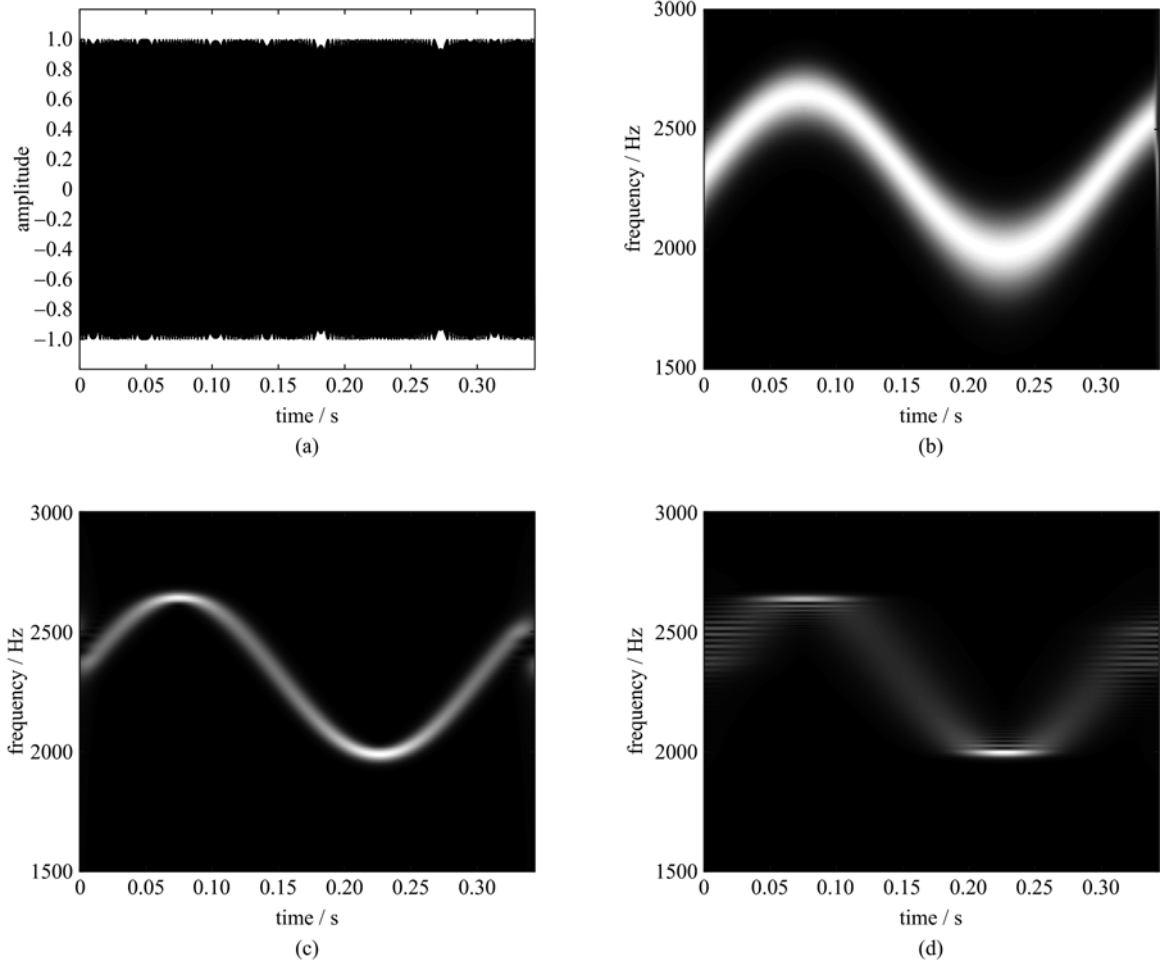


图2 调节参数仿真

Fig. 2 Simulation of the adjustment parameter

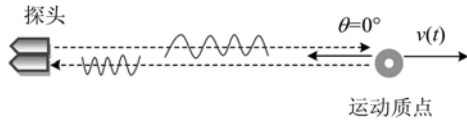


图3 多普勒测量模型

Fig. 3 Doppler measurement model

根据式(2),考虑到图2中 $\theta=0$,则多普勒频移为

$$f_d = \frac{2Kf_0}{c} \sin(2\pi f_1 t) = f_{d \max} \sin(2\pi f_1 t) \quad (12)$$

式中, $f_{d \max} = \frac{2Kf_0}{c}$,表示多普勒频移最大值.

对于模型中中单一速度按正弦规律变化的运动质点,其多普勒回波信号的瞬时频率 $f_i(t)$ 可以表示如下:

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = f_0 + f_{d \max} \sin(2\pi f_1 t) \quad (13)$$

结合式(1)和(13),含有多普勒信号的回波信号是

$$x(t) = a\Lambda \cos(2\pi \int_0^t f_i(t) dt + \varphi_1) \quad (14)$$

式中, a 为回波的衰减系数, φ_1 是超声波传播的延时相位.由于对正弦信号的积分仍然是正弦函数,所以从式(14)可以看出多普勒回波信号是一个正弦波调制的调频波.

仿真中为了更为直观地观察广义 S 变换的时频聚焦性能,我们加入了高斯白噪声,设置多普勒回波信号的信噪比 SNR=0 dB.设置质点初始时距离超声探头最近,并开始远离探头,然后按式(14)的速度做往复运动.仿真参数设置如表1所示.

利用广义 S 变换处理,设置调节参数 γ_{GS} 为35,结果如图4和图5所示.图4中(a)为仿真的多普勒回波信号,(b)为广义 S 变换处理得到的时频谱的等高线图,表明了这段时间内的频率分布情况,(c)为等高线图中提取出的最大频率曲线.可见广义 S 变换表现了良好的时频聚焦和抗噪能力.从图4可

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

仿真参数设置	
超声发射频率 f_0	20 kHz
发射角度 θ	0
采样频率 F_s	80 kHz
采样总时间 t	1.5 s
简谐运动频率 f_1	1 Hz
速度系数 K	8.5

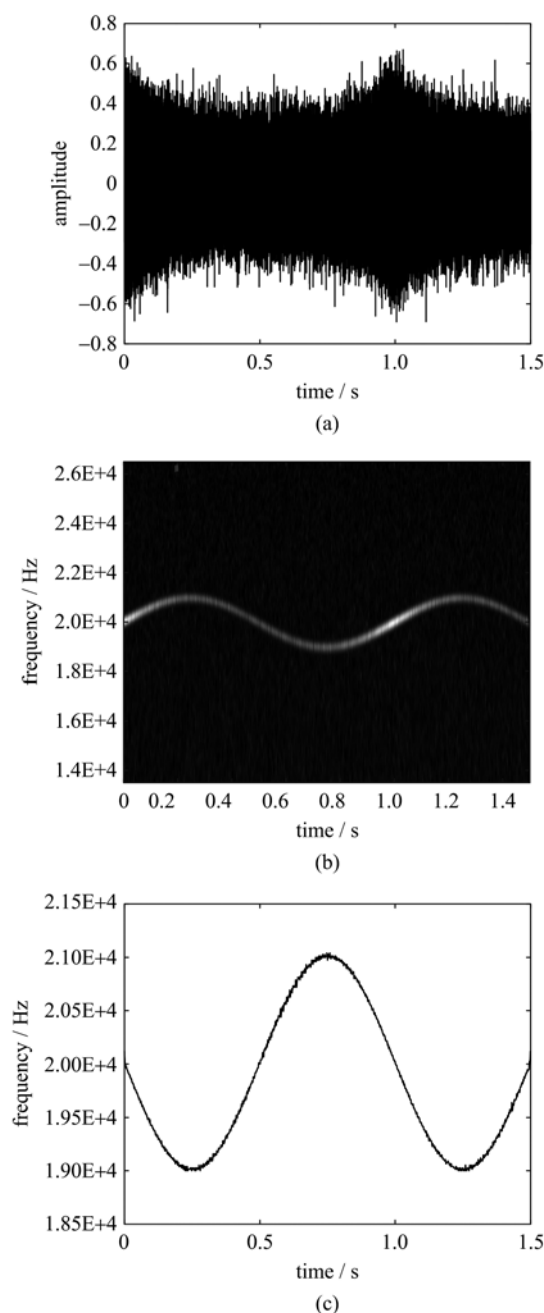


图 4 多普勒信号仿真结果

Fig. 4 Simulation result of the doppler signal

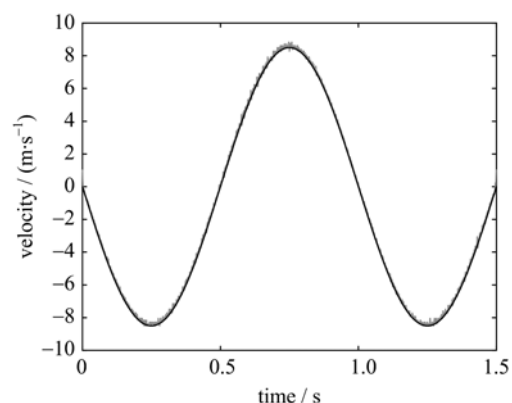


图 5 速度随时间的分布

Fig. 5 Velocity distribution with time

可以看出,在 0 s 时,回波信号幅度最强,没有发生多普勒频移,瞬时频率为超声发射频率 f_0 ,此刻速度为 0;然后便开始远离超声接收探头运动,回波的瞬时频率开始低于 f_0 ;在 0.5 s 时,信号的幅度处于最低水平,表示物体此时运动到距离超声接收探头最远处,位移最大,对应的瞬时频率为 f_0 ,在此刻,物体速度减到 0;下一时刻开始朝超声接收探头运动,回波的瞬时频率开始高于 f_0 . 整个过程中,回波信号的瞬时频率按正弦变化. 根据速度系数 $K=8.5$ 得到仿真设置的最大频移 $f_{d\max}=1\ 000$ Hz. 图 4(c) 中 0.25, 0.75, 和 1.25 s 时,瞬时频率分别为 19, 21 和 19 kHz,在这 3 个时刻,多普勒频移达到最大值,为 1 000 Hz,与仿真设置的值相同,表明了广义 S 变换提取瞬时频率的有效性.

从进行广义 S 变换得到的时频谱中按时间轴进行峰值提取,即提取各时刻的能量最大值,得到最大频率曲线,即为超声多普勒回波信号瞬时频率的估计值.

经频移公式(2)计算得到瞬时速度,如图 5 中的灰色曲线所示,可以看出,整个运动过程中的瞬时速度按照正弦波变化. 黑色曲线为仿真设置的质点的速度. 仿真结果与仿真设置值几乎一致,对高斯白噪声的抗噪性也较强.

仿真结果表明,广义 S 变换能够准确地提取超声多普勒回波信号中运动目标的瞬时速度.

2.3 广义 S 变换测量瞬时速度的实验

超声多普勒信号测量系统包含两部分,分别为产生多普勒现象的机械装置,和多普勒信号的采集及实时传输系统.

设计的机械装置简图如图 6 所示. 机械装置中

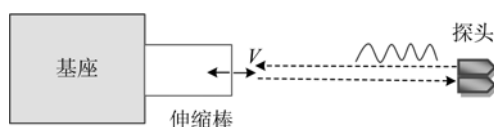


图6 机械装置简图

Fig. 6 Machinery device diagram

伸缩棒通过基座里的电动传动模块实现简谐运动, 简谐运动的频率 f_1 为 8 Hz. 运动速度有一个明显的正弦变化过程. 由于相对于超声接收探头之间的相对速度的存在, 因此能够产生多普勒现象, 其多普勒信号是正弦调制的调频波.

在多普勒信号采集和传输系统中, 取实验室现有的超声发射探头, 实测其中心频率为 21.8 kHz. 系统中采用 C8051F340 单片机, AD7606 模数转换芯片, 精度为 16 位, 采样速度为 100 kHz. 利用 C8051F340 单片机自带的全速 USB 进行数据传输, 速度能够达到 12 Mbits, 通过精心安排程序流程, 满足了实时数据传输到 PC 端的需求. 实验中多普勒信号的采集、数据传输及处理过程如图 7 所示.

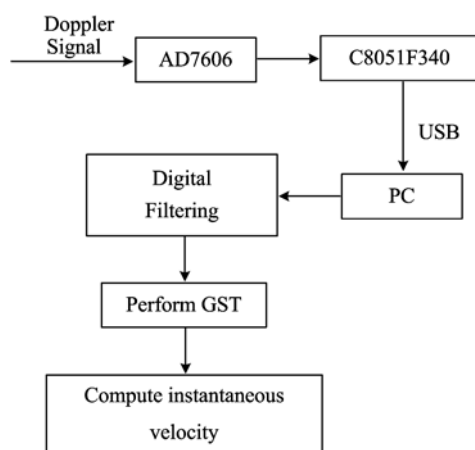


图7 信号采集、传输及处理框图

Fig. 7 Diagram of signal acquisition, transmission and processing

接收的回波信号如图 8 中(a)所示, 工频干扰非常严重, 所以先对接收信号进行高通滤波预处理, 在有效滤去工频干扰后, 得到多普勒回波信号如(b)所示. 图(c)为多普勒回波信号的频谱, 可以看出由于伸缩棒的运动, 信号的频谱有所展宽.

广义 S 变换处理后的结果如图 9 所示, 从(a)中时频谱等高线可以看出多普勒回波信号的频率集中在 21.8 kHz 附近, 于是取其沿时间轴各时刻的频率最大值得到(b)中曲线, 得到多普勒回波信号的

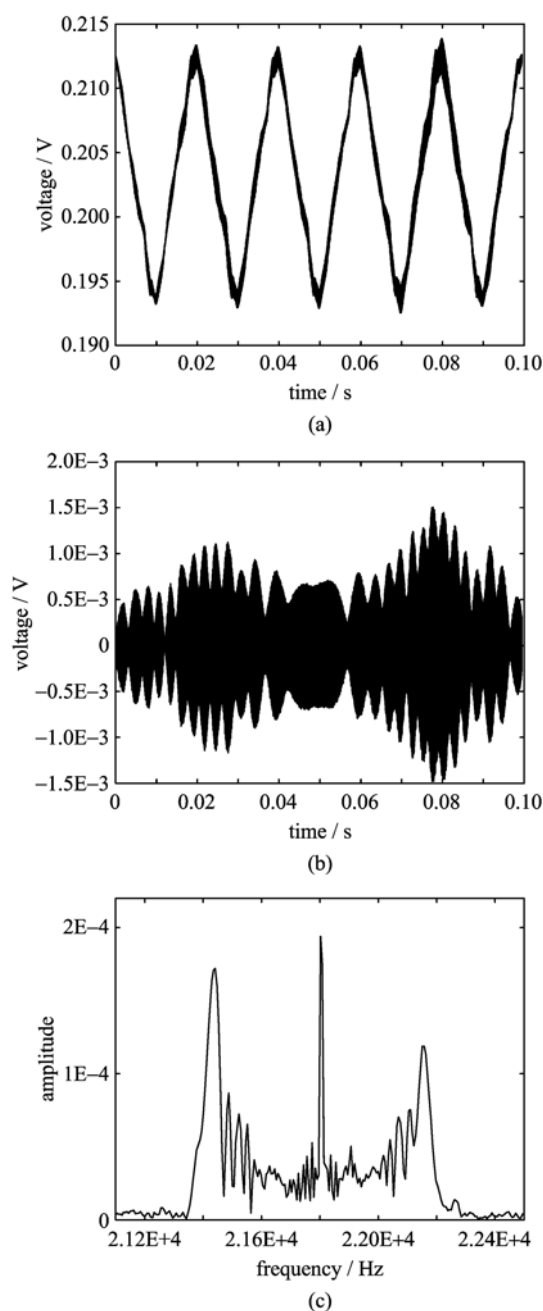


图8 多普勒回波信号

Fig. 8 Doppler echo signal

整个时间段内的频率分布值. 从中能够提取出多普勒频移, 带入速度计算公式计算得到瞬时速度, 并能判断出运动目标的运动方向. 从曲线中看出, 0.01~0.075 s 时间内, 机械装置经历了半个周期的运动, 速度按照正弦规律分别达到正向和反向的速度最大值. 计算可以得到运动的频率 f_1 为 7.9 Hz, 即每秒钟 7.9 个来回, 与机械装置简谐运动的规律相符.

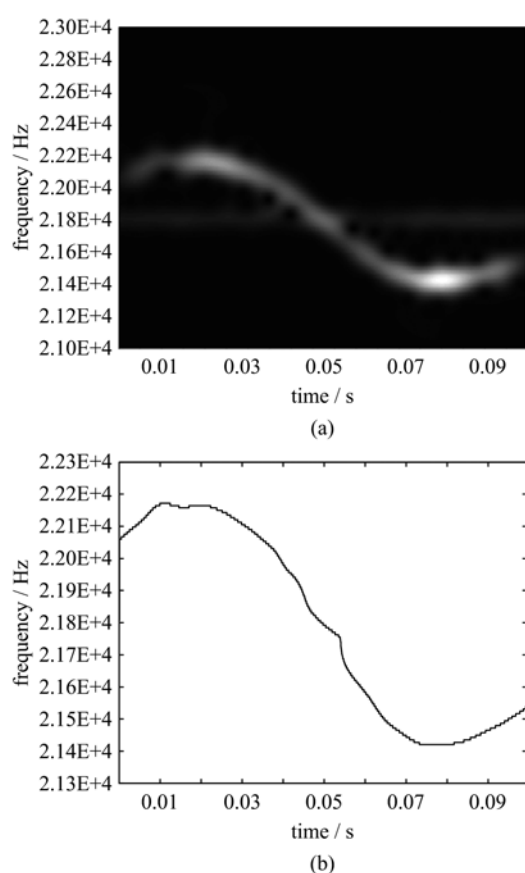


图 9 实测多普勒信号处理结果

Fig. 9 Processing result of the measured doppler signal

分析结果表明,广义 S 变换能够从实测离线多普勒回波信号中提取出瞬时频率,通过多普勒频移计算公式可以得到装置运动的瞬时速度.

3 结论

本文提出了一种多普勒瞬时速度测量方法,该方法基于广义 S 变换对速度时变运动物体的超声多普勒信号进行分析,提取出瞬时频率,并计算得到目标的瞬时速度.首先发射超声波到运动物体,然后对回波信号进行广义 S 变换,得到了信号的时间和频率分布的关系.为了验证方法的有效性,本文建立了多普勒信号的计算机仿真模型,并在此基础上设计了一个简单而又实用的多普勒瞬时速度产生及测量系统.计算机仿真和设计的实验均验证了广义 S 变换应用于多普勒瞬时速度提取的有效性,这为多普勒信号中瞬时速度的提取提供了新的方法.

对比最近的一些对多普勒信号进行瞬时速度估计的方法,如 Hilbert-Huang 变换和 Wigner-Ville 分布,由于广义 S 变换可以通过 FFT 来高效计算,

因此大大减小了计算的复杂程度.

考虑到实际测量中,噪声、窗函数调节参数的选取,以及多普勒测量装置的设计等因素都会影响数据处理精度,因此基于广义 S 变换测量多普勒速度的研究还有待于进一步深入.

参考文献 (References)

- [1] Gong Yanjun, Wu Zhensen. Analytical model of range-Doppler image of rotating cylinders and cones[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(9): 6 227-6 235.
宫彦军, 吴振森. 转动圆柱和圆锥的激光距离多普勒像分析模型[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6 227-6 235.
- [2] Tian Tan, Zhang Dianlun, Lu Fengchun, et al. Study of phased-array doppler velocity measurement technique [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002, 23: 80-85.
田坦, 张殿伦, 卢逢春, 等. 相控阵多普勒测速技术研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23: 80-85.
- [3] Xu Lingji, Yang Yixin, Yang Long. Matched Wigner transform and its application to instantaneous frequency estimation[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(11): 2 247-2 252.
徐灵基, 杨益新, 杨龙. 匹配 Wigner 变换及其在瞬时频率估计中的应用[J]. 电子学报, 2014, 42(11): 2 247-2 252.
- [4] Boashash B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal-Part I: Fundamentals[J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(4): 520-538.
- [5] Zhang Chunxiao, Cheng Jingzhi, Huo Yan, et al. A new method of instantaneous amplitude and frequency estimation for Doppler ultrasound signal[J]. Journal of Xi'an JiaoTong University, 1997, 31(1): 63-68.
张春晓, 程敬之, 火焰, 等. 超声多普勒回波信号瞬时幅度和瞬时频率估计的新方法[J]. 西安交通大学学报, 1997, 31(1): 63-68.
- [6] Yu Chunlai, Lv Shaoyu, Wan Fang, et al. An accurate estimation algorithm for Doppler frequency rate-of-change based on wavelet transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(9): 1 656-1 659.
郁春来, 吕韶昱, 万方, 等. 基于小波变换的多普勒频率变化率高精度估计方法[J]. 电子学报, 2007, 35(9): 1 656-1 659.
- [7] Wen B J, You J. Velocity determination of single sound source based on Doppler effect[C]// Proceedings of 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2007: 956-961.
- [8] Nie X M, Zhou J, Long X W. Application of Hilbert-

- Huang transform to laser Doppler velocimeter[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(2): 197-201.
- [9] Li Chuanxue, Jiang Nan, Jiang Weidi. Instantaneous frequency estimation on ultrasound seawater flow based on the WVD[J]. Ocean Technology, 2007, 26(3): 42-43.
李传学, 姜楠, 姜伟隼. 基于 WVD 的超声海流信号瞬时频率的计算[J]. 海洋技术, 2007, 26(3): 42-43.
- [10] Méric S, Pancot R. Using polynomial Wigner-Ville distribution for velocity estimation in remote toll application[J]. IEEE GeoScience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(2): 409-413.
- [11] Stockwell P G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: The S transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998-1001.
- [12] Gao Jinghuai, Chen Wenchao, Li Youming, et al. Generalized S transform and seismic response analysis of thin interbeds[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(4): 402-406.
高静怀, 陈文超, 李幼铭, 等. 广义 S 变换与薄互层地震响应分析[J]. 地球物理学报, 2003, 46(4): 402-406.
- [13] Zhang Hexiang, Li Hongguang, Zhuang Xuqin, et al. Application of generalized S transform in seismic waveform processing[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2014, 33(6): 850-854.
张鹤翔, 李红光, 庄需芹, 等. 广义 S 变换及其在地震波形处理中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2014, 33(6): 850-854.
- [14] Zhan Yong, Cheng Haozhong, Ding Yifeng, et al. S Transform-based classification of power quality disturbance signals by support vector machines[J]. Proceedings of the Csee, 2005, 25(4): 51-56.
占勇, 程浩忠, 丁屹峰, 等. 基于 S 变换的电能质量扰动支持向量机分类识别[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 51-56.
- [15] Zhang Zhiyu, Lv Yanjun, Zhang Jiulong. Generalized S-transform method of rotor impact-rub fault signal of aeroengine[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(3): 25-28.
张志禹, 吕延军, 张九龙. 航空发动机转子碰摩故障信号广义 S 变换方法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(3): 25-28.
- [16] Peng Jingsi, Peng hu. Chaotic frequency-modulation continuous wave for an ultrasonic Doppler blood flow velocity measurement system[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(24): 545-550.
彭京思, 彭虎. 一种适用于超声多普勒血流速度测量的混沌调频连续波的研究[J]. 物理学报, 2012, 61(24): 545-550.
- [17] Quan Huimin, Dai Yuxing, Wang Pengren. Acoustic emission analysis and location based on generalized S-Tansform[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(2): 371-375.
全惠敏, 戴瑜兴, 王鹏人. 基于广义 S 变换的声发射信号分析及定位[J]. 电子学报, 2010, 38(2): 371-375.
- [18] Chen Xuehua, He Zhenhua. Improved S-transform and its application in seismic signal processing[J]. Journal of Acquisition & Processing, 2005, 20(4): 449-453.
陈学华, 贺振华. 改进的 S 变换及其在地震信号处理中的应用[J]. 数据采集与处理, 2005, 20(4): 449-453.