# 水声信号多参量估计的 PWVD 改进方法

王海燕, 张颖峰, 刘家亮, 姜 喆 (西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: Pseudo Winger-Ville 分布(PWVD)是处理非平稳信号的有力工具,因其具有较高的时频聚集性更适合于实时处 理,且选择合适的窗函数可降低旁瓣大小,提高分辨率。传统的 PWVD 可以对信号瞬时频率进行无偏估计,但其频 率分辨率和时间分辨率不能同时兼顾:提出了一种插值 PWVD 法可克服此不足,极大地减小了频谱泄漏的负面影响, 有效提高了频率估计与时间估计的精度。仿真和实测数据的分析结果验证了插值 PWVD 法的可行性与有效性。 关键词: PWVD; 插值 PWVD; 瞬时频率; 回波到达时间; 脉冲宽度 中图分类号: TN911.23 文献标识码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.01.003

文章编号: 1000-3630(2010)-01-0014-04

## Estimation of multi-parameters of underwater acoustic signal with improved PWVD

WANG Hai-yan, ZHANG Ying-feng, LIU Jia-liang, JIANG Zhe (College of Marine Engineering, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Pseudo-Winger-Ville Distribution (PWVD) is an effective tool for analyzing nonstationary signals. Its high time-frequency concentration and resolution makes it fit for real time processing. A suitable window function can bring two benefits: reducing side lobe and improving resolution. An unbiassed estimation of instantaneous frequency can be obtained by using peak PWVD, but consideration cannot be given to the resolution and variance simultaneously. The interpolated PWVD proposed in this paper can solve this problem to greatly reduce the negative effects of spectrum leakage and effectively enhance the estimate precisions of the frequency and the time. Simulation and measurement data show the feasibility and effectiveness of this method.

Key word: PWVD; interpolated PWVD; instantaneous frequency; arrival-time of echo; pulse width.

1 引言

在对水中目标进行跟踪、定位和测距时,在短 样本条件下对主动信号的瞬时频率、到达时间以及 脉冲信号持续时间的估计非常重要。近年来,短样 本信号的时频分析已成为热点, Wigner-Ville 分布 (WVD)相对其他时频分析方法因其具有较好的时 频聚集性而受到人们的广泛关注。

窗函数的类型和长度对 WVD 的方差都会产生 影响,使用汉宁窗、汉明窗、高斯窗和布莱克曼窗 都可以取得较小的方差,窗长越小,估计方差越小, 但同时频率分辨率越低;相对峰值 WVD 法,峰值 XWVD 法更适合在低信噪比下对信号的瞬时频率 进行估计[1-3]。但上述方法在使用时都有一个无法克

服的缺点,即非同步采样使得窗长不是信号基波分 量周期的整数倍,从而引起频谱的泄漏,导致对瞬 时频率的估计精度不够高,并且不能一味通过增加 窗长来提高频率分辨率,因为这样会导致时间分辨 率下降,估计方差增大等。本文提出的插值 PWVD 法可以有效地克服这个缺点,减小谱线泄漏的负面 影响,提高频率估计的精度,减小估计误差。

## 2 PWVD 峰值法多参量估计

## 2.1 WVD 模型

WVD 是一种最常用的 Cohen 类时频分布,信 号 *x*(*t*) 的 WVD 为:

$$W_{x}(t,\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} z(t + \frac{\tau}{2}) z^{*}(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j\omega\tau} d\tau \qquad (1)$$

式中\*为共轭运算, z(t) 是 x(t) 的解析信号, 采 用解析信号可以消除信号的负频率成分,减少 WVD 的交叉项干扰。

## 2.2 PWVD 模型

对于实信号 x(t),其 PWVD 的连续形式为:

收稿日期: 2008-11-07; 修回日期: 2009-02-23

作者简介: 王海燕(1965-), 男, 山东单县人, 博士生导师傅, 教授, 研 究方向为检测技术与自动化装置、信号检测、信号处理、 目标识别等。

通讯作者: 张颖峰, E-mail: zyf234nwpu@sina.com

$$PW_{x}(t,\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) z(t + \frac{\tau}{2}) z^{*}(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j\omega\tau} d\tau \qquad (2)$$

其中时域窗函数 h(r) 等效于对信号在频域做 低通滤波处理。

## 2.3 PWVD 中窗函数的选择

窗函数的选择需满足以下条件: (1) *h*(τ) 有单 位面积; (2) *h*(τ) 为对称时间函数; (3) *h*(τ) 为时限 信号; (4) *h*(τ) 向两端平滑衰减,以使其频率响应 的高频分量最小<sup>[4]</sup>。

汉宁窗、汉明窗和高斯窗是较好的分析窗函数,它们具有较窄的主瓣和较大的旁瓣衰减速度。 高斯窗的时宽带宽积满足 Heisenberg 不等式的等号 关系,可达到最佳的时频聚集性,即:

$$\Delta t \cdot \Delta f = \frac{1}{4\pi} \tag{3}$$

高斯窗函数为:

$$s(t) = (2a)^{\frac{1}{4}} e^{-a\pi n^2}, \ n = 0, 1, \dots, N-1$$
 (4)

式中a为任意常数,用来调节窗函数的分辨率。 s(t)的傅立叶变换为 $S(e^{j\omega})$ 。图1给出了a=1,2,

N=128时高斯窗的归一化对数幅频响应  $20 \lg \left| \frac{S(e^{j\sigma})}{S(e^{j\sigma})} \right|$ 曲线。可以看出a越大,时间分辨率越好,而频率



#### 2.4 PWVD 峰值法多参量估计

在对水中目标进行跟踪、定位和测距时,需要 对回波的瞬时频率、到达时间以及脉冲宽度进行精 确估计。设发射信号频率和检测系统采样频率分别 为 $f_0$ 、 $f_s$ ,则回波到达时间估计 $\hat{i}$ 、脉宽估计 $\hat{r}$ 和 多普勒频移估计 $\hat{f}_0$ 可表示为:

$$\hat{t} = t_{c_1}, \quad \hat{\tau} = t_{c_2} - t_{c_1}, \quad \hat{f}_{d0} = \hat{f}_t - f_0$$
 (5)

 $\hat{f}_t$ 为瞬时频率估计值,是最大瞬时谱线所对应

的频率;  $t_{c_1} \approx t_{c_2}$ 为最大瞬时谱线的起始和终止时刻,可通过分析  $\hat{f}_t$  的时间特性得到。

## 3 插值 PWVD 峰值方法分析

#### 3.1 插值 PWVD 峰值法模型

PWVD 峰值法的缺点是存在频谱泄漏,如图 2 所示,这会导致瞬时频率估计的精度不高,而通过 增加窗长来提高频率分辨率的方法又会使得时间 分辨率降低,并且引起更大的估计方差。为此引入 了插值的方法<sup>[5]</sup>,以在不降低时间分辨率的情况下 进行更精确的频率估计。



在图2所示曲线的最大值附近有三条重要的谱线:信号分量与两个谱泄漏分量,用二次插值的方法,利用这三条谱线的信息来逼近实际的最大谱线位置,为此定义一个表达式*W*<sub>1</sub>(*n*,*r*):

$$W_{1}(n, r) = PWVD_{x}[n, m_{1}(n) + r]$$
(6)  

$$r = -1, 0, +1$$
(7)  

$$PWVD_{x}[n, m_{1}(n)] = \max\{PWVD_{x}(n, m)\}$$
(7)

n=1,2,…,N m<sub>1</sub>(n) 表示最大谱线值的位置; PWVD<sub>x</sub>[n,m] 为 回波信号 x(t) 的 PWVD 变换。为了描述最大值附近

回波信号 x(t) 的 PWVD 变换。为了 描述最大值附近 频谱值的变化率,定义两个比例因子  $\alpha_{-1}(n)$  和  $\alpha_{+1}(n)$ :

$$\alpha_{-1}(n) = \frac{W_1(n,-1)}{W_1(n,0)}, \quad \alpha_{+1}(n) = \frac{W_1(n,+1)}{W_1(n,0)}$$

设回波信号的瞬时频率  $f_t$  的频谱偏移系数  $\delta_t(n)$  为:

$$\delta_t(n) = \frac{f_t(n)}{\Delta f} - m_t \tag{8}$$

通过多项式插值法可逼近 $\delta_{t}(n)$ ,并且可得到 $\hat{\delta}(n)$ 的最优估计:

$$\hat{\delta}_{t}(n) = 0.5\{a[\alpha_{-1}^{2}(n) - \alpha_{+1}^{2}(n)] + b[\alpha_{+1}(n) - \alpha_{-1}(n)]\} - c \quad (9)$$
  

$$\pm \psi, \quad a = 0.8001, b = 2.2077, c = 0.9814$$

这样瞬时频率估计  $\hat{f}_i$  表达式可以重新表示为:  $\hat{f}_i = [m_1 + \hat{\delta}_i(n)] \cdot \Delta f$  (10)

当 $\hat{f}_t$ 获得精确估计后,会使 $t_q$ 和 $t_q$ 更接近实际 值,这样就间接提高了回波到达时间 $\hat{t}$ 和脉宽 $\hat{r}$ 的 估计精度。

## 3.2 插值 PWVD 峰值法的仿真

利用线性调频信号进行瞬时频率估计来验证 该方法的有效性,信号频率为 1~4.5kHz,其 PWVD 三维图如图 3 所示,对应的频率估计如图 4 所示。 根据方差计算公式:  $Var=10\log_{10}((\hat{f}_t-f_t)^2)$ ,其中  $\hat{f}_t$ 为瞬时频率估计值, $f_t$ 为瞬时频率,对两种方法瞬 时频率的估计方差进行计算,分别为: 15.01dB 和 23.13dB。可见插值 PWVD 法相对于 PWVD 峰值法 的估计方差减小了 8.1dB。



4 水声回波信号参数估计

结合水下航行器的海上试验,研究建立的水声 回波信号参量估计模型的实效性。发射信号为 CW 正弦脉冲,载频 4.0kHz,脉冲宽度 10ms。

## 4.1 回波信号的多普勒频移和脉宽展宽估计

对于运动的水下航行器,回波信号的多普勒频

移  $\Delta f$  与发射信号频率  $f_0$  及水下航行器与探测系统 间的相对速度 v 的关系为:  $\Delta f = \frac{2vf_0}{c}$ ,其中 c= 1500m/s 是海水中的声速。回波信号的脉宽展宽是 由于水下航行器表面不同部分的回波经过不同的 传播路径到达接收点时间上的差异造成的,如图 5 所示,脉冲串的第一个脉冲来自水下航行器顶部的 镜反射。

选用窗长为 256 的高斯窗,对实测的回波信号 进行 PWVD 分析。图 6 是图 5 信号的 PWVD 三维 图,图 6 中第一个脉冲的持续时间和能量都为最大。

基于 PWVD 峰值法估计频率的同时可提取时 间信息,得到图 7 所示的二维图,可估计回波信号





的到达时间和脉冲宽度,而估计的精度直接受时间 分辨率的影响。由于采用的插值法对频率分辨率的 要求降低,这样就可在不影响频率估计精度的情况 下通过减小窗长来提高时间分辨率。在两种窗长参









数 N=512.256 的条件下,图 8 给出了回波信号到达时间估计误差的对比效果,可以看到窗长越小,时间估计精度越高。利用窗长为 256 的高斯窗对每个CW 脉冲宽度进行估计,估计误差效果如图 9 所示。

在发射 34 个 CW 信号的条件下,图 10 给出了 PWVD 峰值法和插值 PWVD 法对回波信号瞬时频 率进行估计的均方误差对比,可以看到插值 PWVD 法的估计性能优于 PWVD 峰值法,瞬时频率估计 的均方误差降低大概 8dB 左右。

## 5 总结

窗的类型和长度对 PWVD 进行信号分析的性能影响很大,减小窗的长度可以提高时间分辨率, 并减小方差,但会使频率分辨率下降,反之亦然。 在满足频率分辨率的条件下,选择较短的窗,可有 效地提高时间分辨率。

本文研究的插值 PWVD 峰值法在估计信号瞬时频率、到达时间和脉宽时,可有效地减少谱泄漏的负面影响,不但提高了频率估计精度,而且允许使用更短的窗长,以提高时间分辨率。

基于插值 PWVD 峰值法的水声信号多参量估 计方法的稳定性和精度都很好,在短样本和实时性 强的场合很实用,具有很好的应用价值。

#### 参考文献

- QIU Lunji. Wigner-Ville distribution and Windowed Wigner-Ville distribution of noisy signals[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1993: 388-392.
- [2] CHEN Guanghua, MA Shiwei, QIN Tinghao. The Wigner-Ville distribution and the cross Wigner-Ville distribution of noisy signals[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2006.
- [3] SHUI P L, SHANG H Y, ZHAO Y B. Instantaneous frequency estimation based on directionally smoothed pseudo-Wigner-Ville distribution bank[J]. IET Radar Sonar Navig, 2007, 1(4): 317-325.
- [4] Janssen A J E M. Optimality property of the Gaussian window spectrogram[J]. IEEE Trans on signal Processing, 1991, 39(1): 202-204.
- [5] Gregorio Andria, Mario Savino. Interpolated smoothed pseudo wigner-ville distribution for accurate spectrum analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(4).