

# 混响背景中目标回波检测和参数估计的一种新方法

葛凤翔<sup>1</sup>, 蔡平<sup>2</sup>, 惠俊英<sup>2</sup>, 彭应宁<sup>1</sup>

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 哈尔滨工程大学水声工程系, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 本文研究了基于 Wigner-Ville 分布 (WVD) 和 Hough 变换 (HT) 联合技术抗混响的方法, 给出了简要的理论介绍、具体的实现方法和相应的处理结果。仿真研究表明, 在混响背景中, WVD-HT 联合的方法能比较有效地完成目标回波的检测和参数估计。

**关键词:** Wigner-Ville 分布; Hough 变换; 混响

**中图分类号:** TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 03-0304-03

## A New Method for Detecting the Signal Corrupted by the Reverberation and Estimation Its Parameters

GE Feng-xiang<sup>1</sup>, CAI Ping<sup>2</sup>, HUI Jun-ying<sup>2</sup>, PENG Ying-ning<sup>1</sup>

(1. Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Dept. of Underwater Acoustical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A new method for anti-reverberation based on WVD-HT (Wigner Ville Distribution & Hough Transform) is presented. The brief introduction, main operation and processed results are given. The simulation results show that this new method can detect the signal corrupted by the reverberation and estimate its parameters effectively.

**Key words:** Wigner-Ville distribution; Hough transform; reverberation

### 1 引言

混响作为水声学中基本物理现象之一, 对它的研究由来已久, 混响理论也已日趋成熟。混响作为声纳主动工作方式下特有的干扰, 由于其一系列特殊的性质, 使得抗混响一直是困扰声纳信号处理的难题。本文利用 WVD-HT 联合技术, 在信混比 0dB 的混响背景下, 比较稳健地完成了目标回波的检测和参数估计的仿真研究。第 2 部分简要介绍了混响形成机理和常规的信号处理方法; 第 3 部分简要介绍了一下 WVD 理论和相应的计算结果; 第 4 部分就 HT 的原理作了介绍; 第 5 部分给出了 WVD-HT 联合技术在混响背景中检测目标回波并估计其参数的应用研究; 第 6、7 部分就该技术作了简要的总结和讨论。

### 2 混响信号的形成机理及其常规信号处理方法

文献 [1] 指出, 混响信号是元散射信号在接收点的迭加, 因此有混响信号的带宽基本和发射信号带宽相一致。这一点在发射信号频带越宽时表现得越明显。对有一定带宽的低多卜勒目标回波, 接收机接收的信号在频域表现为混响和回波信号的频谱混叠在一起, 因此常规的频域处理效果都不是很好。拷贝相关器在目标不动或多卜勒频移很小时, 虽然性能不

错, 但不适合宽带信号和多卜勒频移较大这两种情况。同时由于混响信号和发射信号之间的相关性较强, 因此一般的自适应信号处理方法的也没能取得好的效果。上述常规的信号处理方法, 都只是单纯从信号的时域或频域去处理, 并且往往不能完成对信号参数的估计。混响信号在时域和频域的特征和目标回波的特征非常相似, 这在以信号间特征差别为指导思想的信号处理领域显然是行不通的, 因此我们必须寻找一种新的处理方法, 使得混响信号和目标回波在该方法下有明显的特征区别。时频分析方法就是这样一种处理方法。

### 3 Wigner-Ville Distribution (WVD)

时频分析 (TFA: Time Frequency Analysis) 最初的主要目的是为分析非平稳和时变信号。时频分析的基本特点是能够反映信号频域特性随时间的变化。平稳、时不变信号作为非平稳和时变信号的特例, 时频分析同样适用。比如用时频分析方法去分析各种调频信号、多频正弦信号等。

其中最常用的一种时频分析方法就是 WVD, 其表示式为 [2]:

$$WVD_x(t, f) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} x^*(t - \tau/2) \cdot x(t + \tau/2) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (1)$$

下面给出了中心频率为 14kHz,带宽为 8kHz 的 LFM 信号及其利用“网络模型”<sup>[3]</sup>产生的混响仿真信号的 WVD 图(见图 1).

### 4 Hough 变换 (HT)

Hough 变换的基本思想是:用直角坐标系中线条的特征参数构成参数空间,然后在参数空间中提取线条特征参数并在直角坐标系中加以表示的一种方法.

下面结合图 2 简要介绍一下二维平面中利用 Hough 变换检测直线图形的原理.

设某直线图形在直角坐标  $(x, y)$  平面(即本文所涉及的  $(t, f)$  平面)中的方程为:

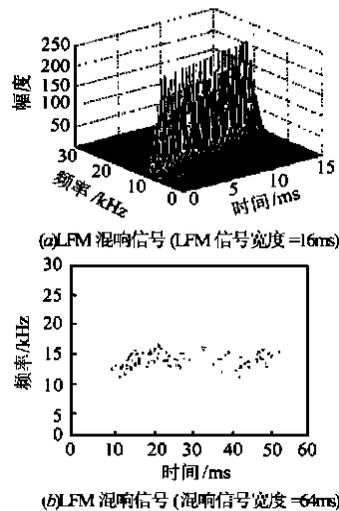


图 1 LFM 信号和相应混响信号的 WVD 图

$$y = ax + b \tag{2}$$

式(2)中直线特征参数  $(a, b)$  的可能变化范围为  $(-\infty, \infty)$ , 为使直线特征参数控制在一定的范围,一般将上述直线方程表示为极坐标形式,有:

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \tag{3}$$

上式可变换为:

$$\rho = A \cos(\theta - \theta_0); \theta_0 = \text{tg}^{-1}(y/x), A = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{4}$$

其中:  $-\pi/2 \leq \theta_0 \leq \pi/2; 0 \leq \rho \leq \sqrt{\max^2(x) + \max^2(y)}$

由式(4)可知,  $(x, y)$  中的一个点  $(x_i, y_i)$  将对应  $(\rho, \theta)$  中的一条余弦曲线. 而式(2)所示直线上的所有点在  $(\rho, \theta)$  中均通过该直线的特征参数点  $(\rho_0, \theta_0)$ , 其中:

$$\rho_0 = \text{tg}^{-1}(-1/a), \theta_0 = |b| / \sqrt{1+a^2} \tag{5}$$

由图 2 和式(5)可以知道,直角坐标系  $(x, y)$  中的任何一条直线都可以用参数空间  $(\rho, \theta)$  中唯一的参数  $(\rho_0, \theta_0)$  来表征,该点的值  $(\rho_0, \theta_0)$  正是该直线上所有像素点个数的积累值,在图像处理中完成这种变换的算法称作 Hough 正变换. 然后,提取该直线的特征参数  $(\rho_0, \theta_0)$ , 通过反算 Hough 正变换就可得到在直角坐标系中的该直线. Hough 变换作为一种最佳检测和估计理论的具体实现方法,在信号参数未知的条件下,理论上能够最佳匹配于信号的特征参数<sup>[6]</sup>.

### 5 基于 WVD-HT 的抗混响技术

对受混响污染的目标回波信号作 WVD 分析后得到在  $tf$

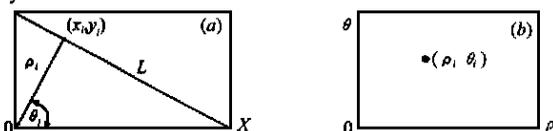


图 2 Hough 变换原理图

平面中的时频图  $WVD(t, f)$ , 一个 LFM 信号的 WVD 时频图在  $tf$  平面中表现为一条直线段, 而混响信号的 WVD 时频图则是一系列杂乱而分散的点或点团(统称“椒盐干扰”). 在 WVD 时频图上抗混响, 最终就归结为在布满“椒盐干扰”的图像中分析出是否有相应信号长度的直线段. 这可借用 Hough 变换.

把 Hough 变换应用于时频分布图像中目标回波的检测和参数估计, 其具体步骤为:

(1) 先选取一阈值, 对时频图像进行预处理. 阈值由平稳化后的干扰背景来确定.

(2) 逐点扫描, 利用式(3)对高于上述预处理阈值的像素点进行 Hough 正变换, 生成相应的  $(\rho, \theta)$  空间参数.

(3) 选取  $(\rho, \theta)$  空间中最大值处对应的坐标  $(\rho_0, \theta_0)$  暂认为是直角坐标系中线条信号的特征参数.

(4) 以此参数, 反算 Hough 正变换, 并把该计算结果与原图像相“与”, 然后统计出该线条信号像素点的总和, 与有线信号时可能的像素点积累值相比较, 大于该值, 则认为有信号, 并估计出相应信号的特征参数. 反之, 则认为无信号.

对有多种信号形式的情况, 可先选取阈值进行比较, 然后再反算 Hough 正变换.

下面给出了信混比为 0dB, 目标回波的多卜勒频移量为 0kn 条件下, 经混频至低频的 WVD-HT 联合方法处理的仿真效果图(见图 3).

下面给出一组典型的 WVD-HT 联合方法抗混响干扰的处理结果和相应的估计精度(注:估计值与实际值之比)分析(见表 1).

表 1 WVD-HT 处理结果和精度分析

序号	$T_d$ (ms)	$B_d$ (kHz)	$f_{0,d}$ (kHz)	$d_d$ (ms/kHz)
1	15.4395	0.9650	26.0544	15.9995
2	10.9570	0.6848	25.8677	16.0003
3	13.9453	0.8716	25.9922	15.9997
4	10.9570	0.6848	25.9611	16.0001
估计精度	34.2% ~ 48.3%	34.2% ~ 48.3%	99.5% ~ 99.9%	约为 100%

$(f_0 = 26\text{kHz}, B = 2\text{kHz}, T_s = 32\text{ms}, \text{ } = 16\text{ms/kHz}, SRR = 0\text{dB}, Dop = 0\text{kn})$

在图 3 和表 1 中:  $T_d$  为目标回波时宽估计 (ms),  $T_s$  为发射信号时宽 (ms),  $B_d$  为目标回波带宽估计 (kHz),  $B$  为发射信号带宽 (kHz),  $f_{0,d}$  为目标回波中心频率估计 (kHz),  $f_0$  为发射

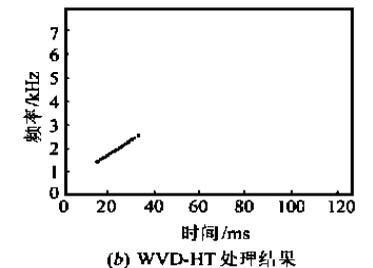
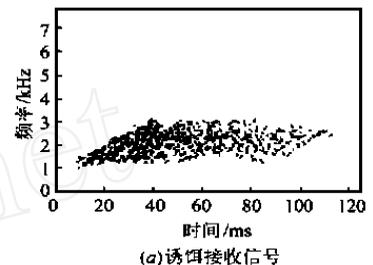


图 3 WVD-HT 技术检测和识别 LFM 信号的效果图  $(f_0 = 26\text{kHz}, B = 2\text{kHz}, T_s = 32\text{ms}, SRR = 0\text{dB}, Dop = 0\text{kn}, \text{ } = 8\text{ms})$

信号中心频率 (kHz),  $d$  为目标回波调频率估计 (ms/kHz), 为发射信号调频率 (ms/kHz),  $Dop$  为多卜勒频移量 (kn),  $SRR$  为信混比 (dB), 为目标回波相对被分析信号起始点的延迟时间 (ms).

## 6 处理结果讨论与说明

特别注意的是, 仿真结果表明, 信号带宽和脉宽的估计精度虽然较低, 但这完全是由 WVD 计算中滑动窗引起的在信号两端能量的削弱, 属于系统误差. 我们知道, WVD 在一定程度上反映了信号能量在  $(t, f)$  平面上分布, 在窗函数滑动过程中, 特别是在信号的起止部分, 窗函数只能“覆盖”信号的一部分, 从而势必影响 Hough 正变换后目标回波在  $(\theta, \rho)$  空间中的积累值, 进而会影响 WVD-HT 联合方法的检测和估计效果. 本仿真研究过程中, 在一定检测门限前提下, 上述由于窗函数滑动而导致目标回波长度的边缘损失约为窗函数长度的一半. 同时窗函数长度的选取, 还要兼顾“频率分辨率”和“检测能力”两方面. 这样通过对 WVD 加窗在信号两端可能引起能量削弱的分析, 并在实际海试中加以调整, 完全可以比较准确地估计信号的参数. 另外拷贝相关器在目标不动或多卜勒频移很小时, 性能的确不错, 但对声纳信号而言, 载频较低, 在多卜勒频移较大的宽带信号情况下, 目标回波表现为调频率的变化, 这时拷贝相关器的性能将明显下降, 而 WVD-HT 是基于线条特征的提取, 因此上述变化不会影响信号的检测和参数估计性能. 本文所提出的方法在信混比满足的条件下, 对信号形式、多卜勒频移量不存在特别的要求, 对非线性调频等非直线形式的信号, 考虑到特征提取的方便, 可以分段处理. 最后从算法稳健的角度, WVD-HT 联合方法在本项仿真研究中的处理能力能够达到 0dB 信混比水平.

## 7 结论

本文将 WVD-HT 联合方法应用于混响背景中目标回波的检测和参数估计. 仿真结果表明, WVD-HT 方法在信混比为 0dB 条件下取得了较理想的效果, 处理能力已完全达到实际应用的要求. 若有机会, 在海试中对本方法的效果作进一步评价是值得的.

## 参考文献:

- [1] 刘伯胜等编著. 水声学原理 [M]. 第一版. 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1992.
- [2] 胡广书编著. 数字信号处理-理论算法与实现 [M]. 第一版. 清华大学出版社, 1997:386 - 410.
- [3] 葛凤翔. 智能诱饵中“边收边发”技术研究 [D]. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 1999, 1.
- [4] 崔屹编著. 数字图像处理技术与应用 [M]. 第一版. 电子工业出版社, 1997:100 - 107.
- [5] 张贤达, 保铮编著. 非平稳信号分析与处理 [M]. 第一版. 国防工业出版社, 1998:153 - 186.
- [6] S. Barbarossa & A. Zanalda. A combined Wigner-Ville and Hough transform for cross-terms suppression and optional detection and parameter estimation [J]. Proc. IEEE. ICASSP, 1992, 5:173 - 176.
- [7] J. Illingworth & J. Kittler. A survey of the Hough transform [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1988, 44:87 - 116.

## 作者简介:



葛凤翔 1974 年生, 分别于 1996 年 7 月和 1999 年 4 月在哈尔滨工程大学获学士和硕士学位, 现在清华大学电子工程系攻读博士学位, 主要研究方向是雷达和声纳信号处理等.

蔡平 1949 年生, 毕业于哈尔滨船舶工程学院, 现为哈尔滨工程大学水声工程系教授, 主要研究方向是水声物理和水声信号处理等.

惠俊英 1939 年生, 1961 年毕业于哈尔滨军事工程学院, 现为哈尔滨工程大学水声工程系教授, 博士生导师, 主要研究方向是水声物理和水声信号处理等.

彭应宁 1939 年生, 1962 年和 1965 年在清华大学无线电系分别获学士和硕士学位. 现为清华大学电子工程系教授, 博士生导师, 主要研究方向是谱估计, 自适应滤波, 阵列信号处理、雷达信号处理、微光图像信号处理等.