

# 基于多普勒频移的水下运动目标测距技术

李君桥, 岳剑平, 洗观福, 印 勇

(广东湛江 91388 部队, 广东湛江 524022)

摘要: 研究了基于多普勒频移的水下运动目标测距的方法及关键技术, 采用了基于 Hilbert 变换的信号平稳化方法, 结合频率匹配和 PMTM 多锥度法功率谱估计改善处理增益并提高线谱的短时频率估计精度, 并结合几何模型及频率导数求解目标斜距。对算法进行了仿真, 仿真结果表明, 算法正确可行, 在谱级信噪比不低于 10dB 条件下能有效提高被动式水下运动目标测距的精度。最后给出一个应用实例。

关键词: 被动测距; 线谱检测; 频率估计

中图分类号: TB561

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-05-0758-03

## Passive ranging of underwater motional targets based on Doppler frequency shift

LI Jun-qiao, YUE Jian-ping, XIAN Guan-fu, YIN Yong

(Unit 91388, PLA., Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

**Abstract:** A method and key technology for passive ranging of underwater motional targets based on doppler frequency shift are studied in this paper. A method of signal balancing based on Hilbert transform is taken. The frequency matching method and PMTM method are used to improve the estimating precision of instantaneous frequency. Based on the geometrical model and the frequency's differential coefficient, the target's bevel distance is calculated. The results of simulating experiments show that the arithmetic is correct and feasible, and can improve the passive ranging precision of underwater motional targets under condition of SNR higher than 10dB. In the end, an applied example based on this arithmetic is given.

**Key words:** passive raning; line spectrum detecting; frequency estimating

## 1 引 言

水下目标辐射噪声谱可分为线状谱和连续谱。辐射噪声中的线谱是一些稳定离散频率分量形成的谱, 线谱第一个特点是其在频谱图上稳定高出周围连续谱呈线状, 线谱的第二个特点是传播距离远, 因为其处于低频段。线谱的上述两个特点使其成为现代声呐设备探测和捕捉的重要对象<sup>[1]</sup>。

尽管线谱频率较为稳定且明显高出周围连续谱, 但线谱的低频率却常常为分析带来了困难。

这是因为, 水下目标辐射噪声常常是不平稳的、呈包络状的随机非白噪声(见图 1)。辐射噪声的不平稳性会影响瞬时频率检测精度, 为此文献[1]提出

了使用曲线拟合的方法对图 1 所示的噪声进行平稳化处理, 效果较好。

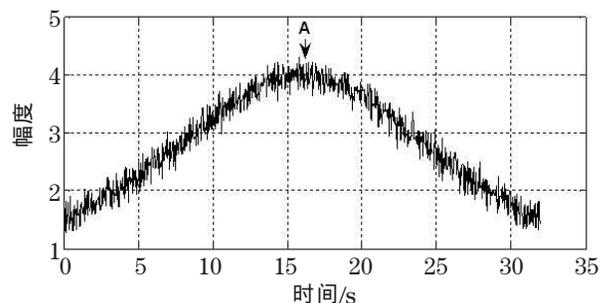


图 1 水下运动目标辐射噪声通过曲线

Fig.1 Radiated noise of underwater motional target

本文根据文献[1]分析结论也对原始数据进行平稳化处理, 但是平稳化方法和文献[1]有区别, 文献[1]采用多项式曲线拟合的方法获取信号包络, 而本文采用 Hilbert 变换法获取信号包络。

在距离求解模型中, 文献[1]要求目标运动速度已知, 文献[2]采用栅格搜索策略获取目标运动速度

收稿日期: 2007-11-30; 修回日期: 2008-03-10

作者简介: 李君桥 (1981-), 男, 江西南康人, 硕士, 研究方向为水声测控技术研究。

通讯作者: 李君桥, E-mail: kingjoelee@sina.com.cn

$v$ 及线谱频率 $f_0$ 。本文利用匹配法瞬时频率估计获得线谱的多普勒频率值,根据测量频率及频率导数并结合几何模型求解运动目标距离。

## 2 基于 Hilbert 变换的目标辐射噪声平稳化方法

水下运动目标辐射噪声产生和传播的机理比较复杂。对图 1 所示的噪声通过曲线,我们假设可以表示成式(2)的形式<sup>[1]</sup>:

$$y(t)=x(t) \cdot h(t) \quad (1)$$

式中 $x(t)$ 为目标真实的辐射噪声, $h(t)$ 为产生不平稳的调制包络, $y(t)$ 是测量点接收到的目标辐射声。

按照式(1)模型,只要找到调制包络 $h(t)$ ,则将 $y(t)$ 与 $h(t)$ 相除,即可得到目标真实的辐射噪声 $x(t)$ 。可见,找真实的目标辐射噪声的过程就是对测量信号平稳化的过程。

从图 1 可看出,调制包络 $h(t)$ 反应的是信号能量的变化,可根据 Hilbert 变换特性获取。假设测量点接收到目标辐射信号 $(t_i, y_i)$ ,其中 $i=0, 1 \dots n$ 。则信号包络:

$$h_i'(t_i)=\sqrt{y_i^2(t_i)+\hat{y}_i^2(t_i)} \quad (2)$$

式中 $\hat{y}_i(t)$ 为 $y(t)$ 的 Hilbert 变换,根据式(1)可解得平稳化后的信号(真实的目标辐射噪声):

$$x_i'(t_i)=y_i(t_i)/h_i'(t_i) \quad (3)$$

式中 $i=0, 1 \dots n$ 。

## 3 基于多普勒频移的目标测距模型

根据多普勒效应,目标在运动过程中,换能器接收到的线谱频率将会在特征频率 $f_0$ 附近移动。如图 2 所示,假设鱼雷目标作匀速直线运动,声速 $c$ 已知, $\alpha_i$ 为多普勒频角,则运动目标多普勒频移公式为:

$$f_i=(1+\frac{vc\cos\alpha_i}{c})f_0 \quad (4)$$

式中 $i=0, 1 \dots M(M$ 为样本个数)。式(4)对时间 $t$ 求得:

$$\dot{f}_i=-f_0\dot{\alpha}_i\frac{v}{c}\sin\alpha_i \quad (5)$$

角速度:

$$\dot{\alpha}_i=\frac{vs\sin\alpha_i}{r_i}=\frac{vs\sin\alpha_i}{r_i/\sin\alpha_i}=\frac{vs\sin^2\alpha_i}{r_0} \quad (6)$$

由式(5)、(6)得:

$$\dot{f}_i=-\frac{f_0v^2}{cr_0}\sin^3\alpha_i \quad (7)$$

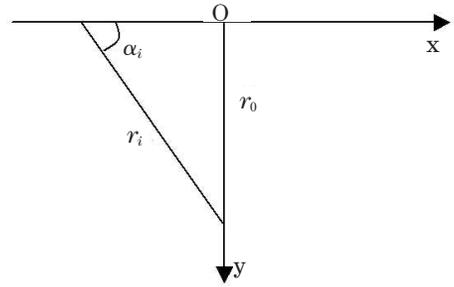


图 2 多普勒频角示意图

Fig.2 Doppler frequency angle

联立式(4)、(7)消去变量 $\alpha_i$ 得:

$$A_6v^6+A_4v^4+A_2v^2+Br_0^2v^2+A_0=0 \quad (8)$$

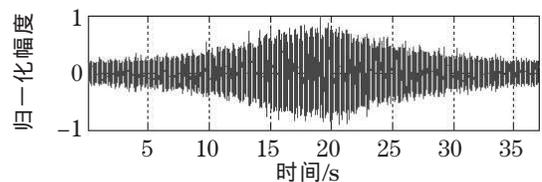
式中 $A_6=f_0^6, A_4=-3c^2f_0^4(f_i-f_0)^2, A_2=3c^4f_0^2(f_i-f_0)^4, B=-c^2f_0^4\dot{f}_i^2, A_0=-c^6(f_i-f_0)^6$ 。

方程(8)中 $f_i, \dot{f}_i, f_0$ 为测量量,只有目标运动速度 $v$ 和正横距离 $r_0$ 两个待估计参数,由于特征频率 $f_0$ 可以通过多普勒频率拟合曲线拐点得到,所以从理论上讲只要两个 $f_i$ 值及与之对应的 $\dot{f}_i$ 值即可对方程求解,由于方程(8)为高次方程,存在多解问题,必须根据实际情况取合理的解。

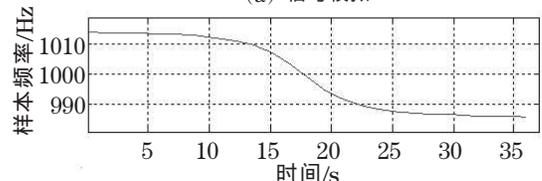
## 4 算法仿真

用计算机模拟一段约 36s 长的接收信号,接收信号由连续谱和线谱组成,谱级信噪比 $SNR=10\text{dB}$ ,线谱特征频率 $f_0=1000\text{Hz}$ ,目标运动速度 $v=22\text{m/s}$ ,正横距离 $r_0=100\text{m}$ 。接收信号中线谱为模拟的多普勒频率,信号模拟结果如图 3 所示。

首先对接收信号平稳化处理,然后对平稳化的接收信号分段进行瞬时频率估计,平稳化后的信号如图 4(a)所示。频率估计采用了匹配法和多锥度法功率谱估计(PMTM)相结合的方法,并对估计的频



(a) 信号模拟



(b) 多普勒频率模拟

图 3 仿真模拟接收信号

Fig.3 Simulated signal

率应用曲线拟合,以剔除野点提高频率检测精度。图4(b)为频率测量结果。

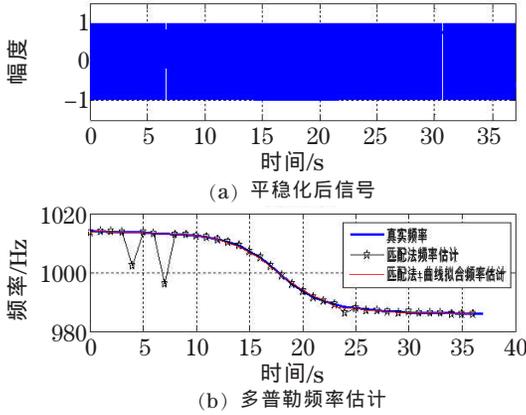


图4 多普勒频率检测结果

Fig.4 Doppler frequency detecting result

将频率估计结果  $f_i$  值及与之对应的  $f'_i$  值一起代入式(8)解算,解算结果如图5所示。对解算结果求平均,得到目标距测点正横距  $r_0=109.37\text{m}$ ,测距误差优于10%。

改变谱级信噪比进行仿真时发现 10dB 是频率检测的临界条件,即实际目标测距时,线谱的谱级信噪比不能低于 10dB。

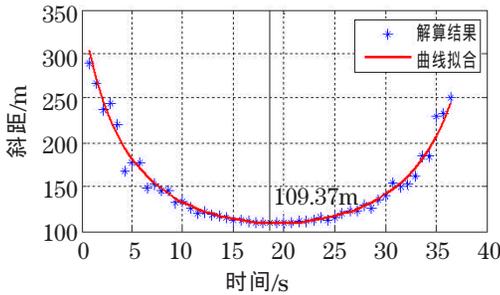


图5 距离解算结果

Fig.5 Passive ranging result

### 5 实际试验结果

图6为采集到的试验摩托艇通过时的噪声信号,试验摩托艇航速约20kn,经过水听器正横距约30m。

从接收信号的功率谱分析可看出较高频率端有146Hz、312Hz、385Hz和463Hz四根稳定的线谱。

将图6中功率谱转换为dB表示,发现线谱只高出连续谱约6dB,谱级信噪比不满足仿真所设10dB的临界条件。图7为385Hz线谱多普勒频率检测结果,从图7可看出,由于谱级信噪比不满足边界条件,无法进行有效的频率检测,从而无法进行目标测距。

### 6 结论

本文分析了水下运动目标低频线谱检测时对噪

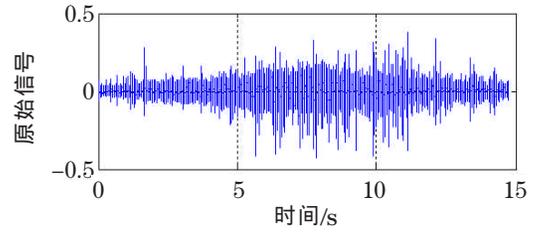


图6 摩托艇通过时的噪声

Fig.6 Noise of motorboat

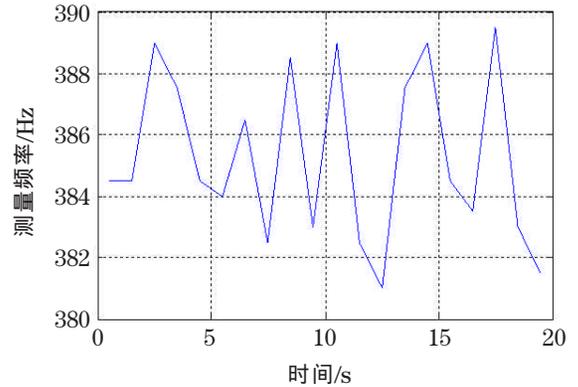
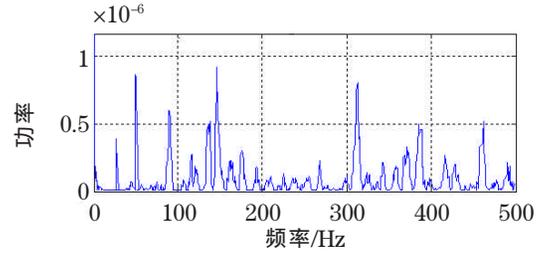


图7 多普勒频率检测结果

Fig.7 Doppler frequency detecting result

声通过曲线平稳化问题,采用了基于Hilbert变换的信号平稳化方法,计算机仿真分析结果显示该算法正确可行。在此基础上,采用一种集匹配法、多通道频率估计法及曲线拟合于一体的瞬时频率检测算法,并在目标运动速度未知的情况下,根据多普勒频率测量值及其对时间导数求解出目标斜距,仿真结果显示测距误差控制在±10%以内。

### 参 考 文 献

[1] 杨德森, 吴一. 水下目标辐射线谱的分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1996, 17(1): 38-44.  
 YANG Desen, WU Yi. The analysis of radiated noise line spectrum of underwater targets[J]. Journal of Harbin Engineering University, 1996, 17(1): 38-44.

[2] 刘秀丽, 冯海泓, 黄敏燕, 等. 基于单基元几何交汇法的被动目标测距测速研究[J]. 声学技术, 2007, 26(2): 173-178.  
 LIU Xiuli, FENG Haihong, HUANG Minyan, et al. Passive ranging and velocity estimation based on geometric convergence using a single sensor[J]. Technical Acoustic, 2007, 26(2): 173-178.

[3] 吴国清, 马力. 利用辐射声多线谱的多普勒进行距离估计[J]. 声学学报, 2006, 27(2): 140-145.  
 WU Guoqing, MA Li. Range estimation by Doppler of multi-line in radiated noise spectrum[J]. ACTA Acustica, 2006, 27(2): 140-145.