

双谱估计法在海底钴结壳微地形探测中的应用

周知进^{1,2}, 罗柏文², 卜英勇²

(1. 湖南科技大学 机电工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 海洋环境中水下超声测量系统往往因环境中机械噪声、背景噪声以及混响等强噪声而导致测距精度低, 因而具有一定局限性。双谱的时延估计方法对高斯噪声具有屏蔽能力, 能更好地压制噪声, 并准确估计信号的时间延迟, 且双谱功率谱重构要比直接用 FFT 变换方法估计功率谱具有更好的性能。利用双谱估计对背景噪声不敏感的特性来处理超声回波信号, 根据实验室水池实测数据, 验证了该方法的适用性。研究表明: 在先验知识较少和背景噪声较强时双谱法比广义互相关法的适用性更好。

关键词: 超声回波; 富钴结壳; 互相关法; 双谱估计法

中图分类号: P318; P631.4; TN 911

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2010)03-0348-05

为了满足深海矿产资源钴结壳采集的微地形探测要求, 需获取一种摆动式超声单波束探测采集头与海底之间高度数据, 但是超声波在传播过程中不可避免地海洋环境噪声所污染, 接收和处理的过程也会带来热噪声、量化噪声等的影响^[1-2]。在海洋中水声传播过程中存在的噪声、混响以及海底声学特性、目标声学特性等影响, 增加了水声信号处理过程的复杂性和技术难度。如何提取水声信号中的有用信息, 有效抑制噪声成为提高测量精度和精确目标识别的关键所在。

随着现代信号处理理论的发展, 对海洋噪声与混响的研究越来越深入。研究表明, 纯净的海洋环境噪声服从高斯分布。船舶辐射噪声的连续谱成分近似服从高斯分布, 而由周期运动机械引起的另一部分船舶辐射噪声(线谱成分)不服从高斯分布, 主要集中在低频段, 呈现出非高斯性^[3]。高阶谱和小波变换的计算需要庞大的运算量, 在低信噪比、小数据量的情况下容易导致性能下降。对某些实时性要求极高且计算能力受限的小平台来说, 寻找新的时延估计方法是一项有意义的工作。

20 世纪 80 年代后期以来, 随着高阶统计理论进一步发展和完善, 高阶统计信号处理已经渗透到信号处理的各个应用领域, 并涌现出大量理论和应用研究成果^[4-5]。高阶统计量包括高阶累积量、高阶矩和高阶谱, 是信号处理学科的前沿性研究方向, 也是研究非高斯过程、非最小相位信号和非线性系

统的有力工具。由于双谱对于高斯噪声是零响应, 所以利用双谱估计技术对低信噪比情况下的海洋超声回波进行检测。结果表明, 超声回波信号中噪声的非高斯特征效果明显。

1 基本理论

高于二阶的矩或累积量, 通常称为高阶统计量, 它们的多维傅氏变换称为多谱。文献[6]给出了高阶矩和高阶累积量的定义, 并证明了高级累积量作为时间序列分析数学工具可以完全抑制高斯有色噪声的影响。假定 $\{x(k)\}$ 和 $\{y(k)\}$ 是两个空间分开的传感器测量数据, 它们分别满足以下方程

$$x(k) = s(k) + \omega_1(k), \quad (1)$$

$$y(k) = As(k-D) + \omega_2(k), \quad (2)$$

式中, $\{s(k)\}$ 是未知的信号, $\{s(k-D)\}$ 是一被移位的 $\{s(k)\}$ 的比例形式, 而 $\{\omega_1(k)\}$ 和 $\{\omega_2(k)\}$ 是未知的噪声源。现在的问题是根据 $\{x(k)\}$ 和 $\{y(k)\}$ 的有限长度测量如何估计时延 D 。求解时延估计问题的基本方法是使测量序列 $\{x(k)\}$ 相对于 $\{y(k)\}$ 移位, 并寻求它们之间的相似性。最佳匹配将发生在移位恰好等于 D 处。在信号处理中, “寻求类似性”被译作“取 $\{x(k)\}$ 和 $\{y(k)\}$ 之间的互相关”。具体说来, 就是取

$$c_{x,y}(\tau) = E\{x(k)y(k+\tau)\} = E\{As(k+\tau-D)\} = A c_s^*(\tau-D), \quad (3)$$
$$-\infty < \tau < \infty.$$

假定 $\{\omega_1(k)\}$ 和 $\{\omega_2(k)\}$ 是零均值的平稳信号, 它

们相互独立,而且与 $\{s(k)\}$ 独立,那么式(3)中

$$c_2^s(\tau) = E\{s(k)s(k+\tau)\} \quad (4)$$

是 $\{s(k)\}$ 的协方差序列。

式(3)中的 $c_{x,y}(\tau)$ 在 $\tau=D$ 处取峰值。然而,在实际情况下,由于有限长度的数据记录以及噪声并非完全独立,所以 $c_{x,y}(\tau)$ 不一定在 D 处显示峰值。为了改善时延估计值的质量,常用窗函数对互相关函数进行平滑。

在一些实际应用中,信号 $\{s(k)\}$ 可以看作是非高斯平稳随机过程,且噪声是独立的平稳高斯过程。此时, $\{x(k)\}$ 和 $\{y(k)\}$ 之间的类似性也可以在高阶谱域(如双谱)中进行比较。这里强调,从复杂的机械系统自发发射的信号含有很强的伪周期分量,因此可以看成是非高斯信号。在上述假定下使用高阶谱作时延估计的主要动机是这样的事实:它们能免除高斯噪声之影响。假定 $\{s(k)\}$ 也有非零的畸变测量,则

$$c_3^s(\tau, \rho) = E\{x(k)x(k+\tau)x(k+\rho)\} = c_3^s(\tau, \rho), \quad (5)$$

$$c_{xyx}(\tau, \rho) = E\{x(k)y(k+\tau)x(k+\rho)\} = c_3^s(\tau - D, \rho) \quad (6)$$

等式成立,式中

$$c_3^s(\tau, \rho) = E\{s(k)s(k+\tau)s(k+\rho)\}。 \quad (7)$$

这是因为高斯过程的三阶累积量恒等于零。在式(5)和式(6)中求三阶累积量的谱,则得

$$B^s(\omega_1, \omega_2) = B^s(\omega_1, \omega_2), \quad (8)$$

$$B_{xyx}(\omega_1, \omega_2) = B^s(\omega_1, \omega_2) \exp\{i\omega_1 D\}。 \quad (9)$$

假定 $B^s(\omega_1, \omega_2)$ 非零,就可构成下列比率

$$I(\omega_1, \omega_2) = \frac{B_{xyx}(\omega_1, \omega_2)}{B^s(\omega_1, \omega_2)} = \exp\{i\omega_1 D\}。 \quad (10)$$

计算时延 D 的一种方法是构成函数

$$\mathbf{R} = \begin{vmatrix} R_x(0, 0) & R_x(1, 1) & \cdots & R_x(p, p) \\ R_x(-1, -1) & R_x(0, 0) & \cdots & R_x(p-1, p-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_x(-p, -p) & R_x(-p+1, -p+1) & \cdots & R_x(0, 0) \end{vmatrix} \quad (15)$$

矩阵 \mathbf{R} 是Toeplitz的,一般是不对称的。式(15)成立的必要条件

$$A(z) = 1 + \sum_{i=1}^p a_i z^{-i} \quad (16)$$

的所有根都在单位圆内,也即AR滤波器的传递函

$$T(\tau) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp\{-i(\tau - D)\omega_1\} d\omega_1 d\omega_2, \quad (11)$$

它在 $\tau=D$ 处取峰值。重要的是,式(10)不受高斯噪声的影响,因此利用 $I(\omega_1, \omega_2)$ 可望得到较好的时延估计值。换言之,双谱方法具有较好的降噪能力。

2 双谱估计方法

在实际信号处理中,只能根据有限的观测数据对双谱进行估计。和功率谱一样,双谱估计也有两种方法^[7]:一种是常规的非参数方法,另一种那个是基于模型(AR, MA, ARMA)的参数方法。当测量噪声较大,尤其当测量噪声是有色噪声时,基于自相关函数方法得到的模型参数具有较大的估计误差,并且自相关函数模型仅与信号自相关函数或功率谱包络相匹配,所以在估计含有非高斯信号的模型参数时,不能充分地获取隐含在数据中的信息。而基于参数模型的高阶谱模型参数估计方法能有效地解决这些问题^[1],因而采用了基于非高斯AR模型的双谱估计。

设 $X(k)$ 可用式(12)来描述,该式为 p 阶AR模型

$$X(k) + \sum_{i=1}^p a_i X(k-i) = W(k), \quad (12)$$

式中, $W(k)$ 是三阶平稳独立同分布的非高斯过程,且有

$$E[W(k)] = 0,$$

$$E[W^2(k)] = \sigma,$$

$$E[W^3(k)] = \beta。$$

由于 $W(k)$ 是三阶平稳过程信号,那么 $X(k)$ 也是三阶平稳的,假定AR模型是稳定的,则

$$R_x(-m, -l) + \sum_{i=1}^p a_i R_x(i-m, i-k) = \beta\delta(m)\delta(l), \quad (13)$$

$$m, l \geq 0。$$

当 $m=l$ 时,式(13)可表示为

$$\mathbf{R}\mathbf{a} = \mathbf{b}, \quad (14)$$

数 $H(z) = 1/A(z)$ 是稳定的,对应式(15)的 $X(k)$ 的双谱为

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = \beta H(\omega_1) H(\omega_2) H^*(\omega_1 + \omega_2) \quad | \omega_1 |, | \omega_2 | < \pi。 \quad (17)$$

式(17)中, $H(\omega)$ 是 $H(z)$ 中令 $z = \exp(i\omega)$ 而得到

的,并且 $\{x_0, x_1, \dots, x_{n-1}\}$ 是一组观测数据序列集。具体的 AR 参数化双谱估计算法如下:

(1) 首先对长度为 N 的信号进行分段, 设 $N + KM$, 估计各段观测数据的三阶累积量

$$C_{3x}^{(j)}(m, n) = \frac{1}{M} \sum_{k_1}^{k_2} [x^{(j)}(i) \cdot x^{(j)}(i+m)x^{(j)}(i+n)], \quad (18)$$

式中, $k_1 = \max\{0, -m, -n\}$, $k_2 = \{M, M-n, M-m\}$ 。

(2) 对于 K 段数据的三阶累积量估计值进行总体平均, 求出观测数据的三阶累积量估计

$$C_{3x}(m, n) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K C_{3x}^{(j)}(m, n) \quad (19)$$

(3) 根据法方程

$$\sum_{i=0}^p a_i C_{kx(m-i, n)} = 0,$$

求解得到 AR 模型的参数 $a_i (i=1, \dots, p)$ 。

(4) 根据 p 个模型参数的估计 $\hat{a}_i (i=1, \dots, p)$ 进行双谱估计, 得到

$\hat{B}(\omega_1, \omega_2) = \hat{\beta} \hat{H}(\omega_1) \hat{H}(\omega_2) \hat{H}^*(\omega_1 + \omega_2)$, 从而实现观测信号的双谱估计。

3 实例

图 1 是摆动式单波束探测装置的 xOz 截面示意。由收发一体水声换能器发射一定频率的超声波到水底面上, 其横向波束角为 β (纵向等同), 当碰到底面时产生反射或散射回波。信号接收电路在超声波发射时就进入了接收信号工作状态。当每次接收完一个探测点的回波信号后, 由步进电机驱动水声换能器绕摆动中心转动一定角度, 进行下一次探测。半个摆动周期探测一行, 即一条横向 (x 方向) 测线。

在水声换能器工作的同时, 行走机构一直沿着

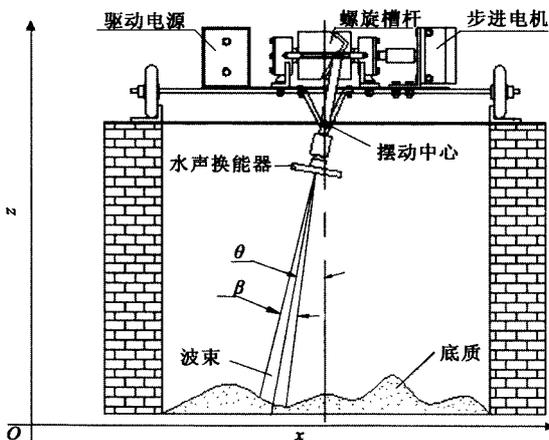


图 1 摆动式单波束探测装置示意

导轨前进。当行走速度不大时, 即半个摆动周期内行走距离不大于波束脚印直径, 则探测点的连线可认为垂直于行走方向 (y 方向); 反之, 行走距离大于波束脚印直径时, 探测点路径则为“之”字形。由振幅相关检测法计算超声波的渡越时间, 最终计算出探测点的高程值。

为了能够在双谱中获得最多的信息, 而且不会导致特征向量过大, 所以在双频域中通过选取双谱峰值所在切片的位置和峰值所在切片的能量作为辅助特征, 以扩大特征向量包括的信息量 (图 2)。图 3 为基于 AR 模型的双谱估计立体图。

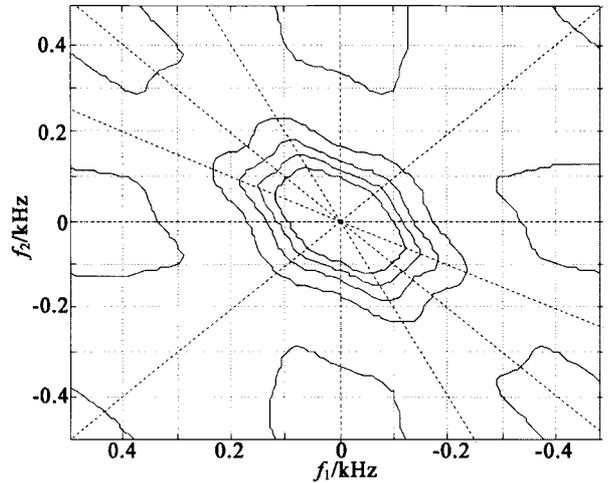


图 2 基于 AR 模型双谱估计平面图

双谱对高斯有色噪声有抑制作用, 而功率谱对任何有色噪声都是敏感的^[8]。图 3 为由 FFT 变换得到的超声回波功率谱。图 4 为双谱重构功率谱。从图 3、图 4 对比可以看出, 当噪声为高斯有色噪声时, 利用基于双谱功率谱重构要比直接估计功率谱具有更好的抑制噪声效果。

对含有高斯噪声的超声信号研究结果表明, 双

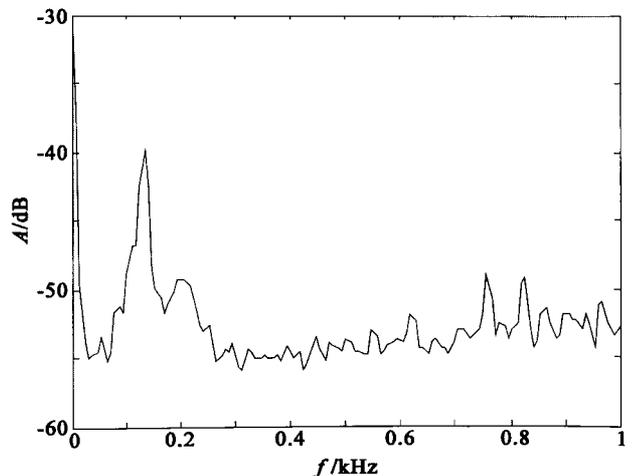


图 3 超声回波信号直接估计功率谱

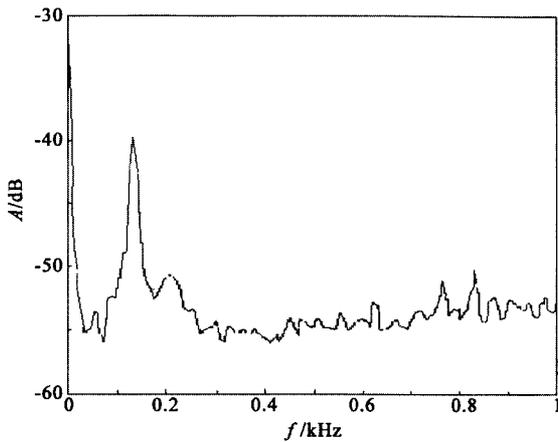


图4 超声回波信号双谱估计功率谱

谱具有屏蔽高斯噪声的优点,与广义互相关延时估计相比能准确估计具有延迟相关信号间的时间延迟。基于双谱功率谱重构要比直接估计功率谱具有更好的精度和性能。从图2中可以看出,对于正常情况下获取超声回波信号双谱特征参数分布具有较好的一致性和集中性,反映出双谱能够揭示信号过程的概率分布在均值附近的对称特征,显示双谱估计具有较好的噪声抑制能力。

表1为采用广义互相关函数法与双谱估计法处理超声回波信号后得出实验测量的结果对比。可以看出,采用双谱估计法比采用广义互相关函数法所获得的距离值相对误差要高。

表1 广义互相关法与双谱估计法的距离值比较

序号	真值/mm	互相关函数法			双谱估计法		
		距离值/mm	绝对误差/mm	相对误差/%	距离值/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
1	1517.0	1520.3	3.3	0.21	1516.5	-0.5	0.03
2	1516.0	1519.5	3.5	0.23	1514.9	-1.1	0.08
3	1513.0	1523.9	10.9	0.72	1514.1	1.1	0.07
4	1510.0	1485.2	-24.8	1.67	1511.4	1.4	0.09
5	1525.0	1523.8	-1.2	0.08	1525.9	0.9	0.06
6	1508.0	1509.9	1.9	0.13	1510.6	2.6	0.17
7	1526.0	1526.5	0.5	0.03	1525.7	-0.3	0.02
8	1506.0	1505.1	-0.9	0.06	1505.8	-0.2	0.01
9	1531.0	1546.8	15.8	1.02	1527.1	-3.9	0.25
10	1501.0	1492.4	-8.6	0.57	1502.8	1.8	0.12
11	1508.0	1509.1	1.1	0.07	1505.0	-3.0	0.19
12	1502.0	1492.0	-10.0	0.67	1504.7	2.7	0.18
13	1500.0	1492.2	-7.8	0.52	1500.3	0.3	0.02
14	1494.0	1493.1	-0.9	0.06	1492.3	-1.7	0.11
15	1522.0	1525.6	3.6	0.24	1520.3	-1.7	0.11
16	1501.0	1509.9	8.9	0.59	1497.2	3.8	0.25
17	1493.0	1491.4	-1.6	0.10	1493.8	0.8	0.05
18	1534.0	1548.7	14.7	0.95	1530.0	-4.0	0.26
19	1540.0	1522.4	-17.6	1.15	1542.9	2.9	0.18
20	1510.0	1500.3	-9.7	0.64	1511.4	1.4	0.09

4 结论

(1) 由于双谱估计的特性,采用双谱估计技术进行时延估计的明显优点是对背景噪声不敏感,能够在有强干扰条件和恶劣环境下工作。

(2) 双谱估计具有较小的计算量,能够满足海底微地形实时测距的工作要求。

(3) 在背景噪声大、信噪比低的情况下,双谱估计测时延的准确性比广义互相关法高。

参考文献:

- [1] 陈喜,凌青,蔡志明,等.舰载水声系统信息融合性能评价[J].海军工程大学学报,2004,16(3):36-39.
- [2] 岳军,邹志农.合成孔径声呐的数学问题[J].海军工程大学学报,2005,17(5):14-20.

- [3] 周越,杨杰,胡英. 基于高阶累积量的水声噪声检测与识别[J]. 兵工学报,2002,23(1):72-78.
- [4] Zhang X D. Analysis of time sequence high-order statistics[M]. Beijing: Tsinghua University Press,1996(Ch).
- [5] Nikias C L, Mendel J M. Signal processing with higher-order spectra[J]. IEEE Signal Processing Magazine,1993,10(3):10-37.
- [6] 张贤达,保铮. 现代信号处理[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [7] 王邃,王刚,崔仕俊,等. 基于参数模型的双谱估计在FSK信号检测中的应用[J]. 电子器件,2007,30(4):1420-1422.
- [8] 郑明辉. 高阶谱应用中参数估计问题分析[J]. 福建工程学院学报,2007,5(4):358-360.
- [9] 张浩,赵正予,谢树果,等. 地磁脉动信号的双谱分析[J]. 武汉大学学报:理学版,2001,47(3):351-354.
- [10] 沈民奋,沈风麟,孙丽莎. 脑电的非线性检测与双谱分析[J]. 电子测量与仪器学报,1998,12(1):6-11.
- [11] 林茂六,高晓明,孙圣和. 高速模数转换器动态偏置误差检测的双谱方法[J]. 电子测量与仪器学报,1995,9(1):27-31.

THE APPLICATION OF THE BISPECTRUM METHOD TO THE MICROTOPOGRAPHIC MEASUREMENT OF Co-RICH CRUST AT THE OCEAN BOTTOM

ZHOU Zhi-jin^{1,2}, LUO Bo-wen², BU Ying-yong²

(1. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. College of Mechanical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Under the actual marine environment, the underwater ultrasonic measurement system has a certain limitation because of mechanical noises such as background noise and reverberation noise. The bispectrum time delay estimation method with Gaussian noise has shielding capacity and is capable of suppressing noise. This method adopts an accurate estimation of the signal time delay, and its power spectral bispectrum reconstruction is superior to the direct use of FFT transform power spectrum estimation, thus having relatively high precision and performance. In view of underwater ultrasonic detection deficiencies, the bispectrum estimation method is adopted due to its insensitivity to background noise. According to measured data obtained in laboratory pool, the applicability of the method is verified. The results show that the bispectrum method has better applicability than the cross-correlation method under the conditions of less prior knowledge and strong background noise.

Key words: ultrasonic echo; co-rich crust; cross-correlation method; bispectrum estimation

作者简介: 周知进(1969-),男,博士,教授,主要从事海洋矿产资源研究与开发工作,公开发表学术论文数篇。