

# 谱校正技术在水下信号波达方向估计中的应用

李运周, 王冀锋, 姜春华

(昆明船舶设备研究试验中心, 昆明 650051)

**摘要:** 针对具有不稳定强线谱特征的水下目标, 提出了一种基于目标线谱校正技术的信号波达方向估计(Direction of Arrival, DOA)方法, 该方法结合矩形窗谱校正技术和全相位修正方法对目标线谱参数进行估计, 从而计算目标方位。对该技术进行了仿真研究, 并应用于实际水下目标线谱方位估计和单频脉冲波(CW 波)的 DOA 估计中。通过对线阵列多个阵元检测到的同一线谱信号的频率和相位差进行修正, 准确计算出入射信号的到达方位角。计算结果表明, 该技术在小孔径基阵目标方位被动估计和 CW 波的波达方向估计等方面应用效果较好。

**关键词:** 波达方向估计; 谱校正; 相位修正; 被动测向

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-05-0456-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.05.017

## DOA estimation for underwater signal based on spectrum correction technology

LI Yun-zhou, WANG Ji-feng, JIANG Chun-hua

(Kunming Shipborne Equipment Research and Test Center, Kunming, 650051)

**Abstract:** Aimed at underwater targets with unstable line spectrum, this paper discusses a DOA (Direction of Arrival) estimation method for underwater signal based on line spectrum correction technology. By correcting the frequency and phase of the signal with the same line spectrum, which is detected by a multi-elements line array, the DOA of the incident signal is accurately calculated. The results indicate that this technology has a good prospect of application in the DOA estimation of underwater target and CW wave source with small aperture array.

**Key words:** direction of arrival estimation; spectrum correction; phase correction; passive direction finding

## 0 引言

水下目标定位有主动和被动两种方式。主动定位方式精度较高, 但需要定位系统发射主动声探测脉冲信号; 被动定位方式的系统不需发射声信号, 仅靠目标航行时发射的辐射噪声进行目标识别与定位。两种工作方式的系统均广泛应用于潜艇声纳和鱼雷自导系统中。被动定位的方式由于隐蔽性较好, 跟踪能力较强, 且跟踪范围大而备受关注。目前水下被动式声纳系统主要采用相关处理算法, 要得到较高的测向精度必须有较大的基阵孔径。然而在许多应用中, 尺寸和体积等因素对基阵孔径提出了严格的限制。

本文针对具有不稳定强线谱特征的水下运动目标开展了线谱的频率精确校正研究。在识别目标线谱、频率精确校正的基础上, 进一步对线谱相位

进行修正, 从而计算目标的方位, 利用小孔径基阵实现了水下运动目标、CW 波声源的线谱识别和目标方位的被动估计。试验分析结果表明, 该方法要求的基阵孔径小, 定向精度较高, 系统使用灵活, 可推广应用于各类工程声学系统上。

## 1 谱校正技术与波达方位估计

谱校正与相位准确修正技术是在频谱域上对数据进行处理的一种方法, 它是在高精度频率计算的基础上, 结合相位修正技术对目标方位进行解算。

### 1.1 矩形窗谱校正技术

矩形窗解析单频模型的复合复比值谱校正方法<sup>[1]</sup>具有短时、高精度的特点。

通常频率估计是利用 FFT 来计算信号的频率, 但 FFT 的频率计算精度受信号采样长度和采样频率的影响, 其分辨率为  $\Delta f = F_s / N$  (其中  $F_s$  为信号的采样频率,  $N$  为 FFT 变换的长度)。如果要求达到  $\Delta f = 1$  Hz 的频率估计精度, 必须使  $F_s$  和  $N$  在数值上相等, 也就是说需要 1s 的采样时间。虽然可以采

收稿日期: 2010-07-12; 收稿日期: 2010-10-30

作者简介: 李运周(1980—), 男, 重庆潼南人, 硕士, 工程师, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 李运周, E-mail: liz80@163.com

采取措施如通过补零的方法增加 FFT 的长度, 缩短采样时间, 但补零的信号是经改造过的信号, 不利于降低频率修正误差。

本文采用矩形窗解析单频模型的复合复比值谱校正方法, 对 FFT 的局部谱线进行修正。其基本原理如下:

采样间隔归一化成  $\Delta T=1$ , 设采样长度为  $N$ 。这样 FFT 离散谱线为  $X_i(i=0, \dots, N-1)$ , 相应的频率分辨率  $\Delta\omega=2\pi/N(\Delta f=1/N)$ 。先对信号进行 FFT 得到  $X(K)$ , 通过谱峰搜寻找最大谱线, 设 FFT 离散谱线局部极高谱线为  $m$ (为了数学上简洁, 假定从 0 开始), 记频偏量  $\omega_s=\delta\Delta\omega$ 。需要使用谱线  $m$  和与之相邻一条次高谱线, 记这连续两条谱线中左边一条序号为  $M$ (当次高谱线在  $m$  左侧时  $M=m-1$ , 反之  $M=m$ )。对谱峰局部进行改写, 表示式如下<sup>[1]</sup>:

$$\delta_m = \text{Re}\left(\frac{X_{M+1}}{X_{M+1}-X_M}\right) + (M-m) \quad (1)$$

$$\delta_R = \frac{X_{m+1}}{X_{m+1}-X_m} \quad (2)$$

$$\delta_L = \frac{X_m}{X_m-X_{m-1}} - 1 = \frac{X_{m-1}}{X_m-X_{m-1}} \quad (3)$$

$$\delta = (0.5-\delta_m)\delta_L + (0.5+\delta_m)\delta_R \quad (4)$$

其中,  $\delta_m$ 、 $\delta_R$ 、 $\delta_L$  均为中间变量,  $\delta$  为谱峰的修正值。

对于多个频率的信号, FFT 频谱图有相应的多个局部极高谱线, 这要求对多个位置的极高谱线分别进行上述的谱峰局部修正, 从而得到多个频率计算值。

### 1.2 相位修正方法

直接由信号 FFT 变换后的实部和虚部计算某个频率点的相位, 计算误差较大, 这是由于计算机只能对有限个数据进行处理, 因此, 只能通过截取输入数据段进行数据分析。若截取后的数据长度为  $N$  个, 则称对此数据的频谱分析为  $N$  阶的频谱分析。通常 FFT 频谱分析只考虑到分割输入信号的  $N$  个抽样的一种情况, 也就是说每次在 FFT 频谱分析中, 只取了  $x(n)$ ,  $x(n-1)$ ,  $\dots$ ,  $x(n-N+1)$  这  $N$  个数据。若将输入信号分割的全部可能情况都计入, 可明显改善频谱分析性能<sup>[2]</sup>。

如图 1 所示, 以  $N=4$  为例来说明数据的分析处理方法, 在对输入数据进行  $N=4$  分割时, 包含  $x(n)$  的分割情况共有 4 种, 对应的 4 列数据相应应有 4 种情况的周期延拓。传统的  $N=4$  的 4 阶频谱分析只考虑了这 4 种情况中的一种, 如图 1 的中间 4 行, 将这种分割对应的周期延拓作为输入数据来进行

处理。由于对输入数据进行截断处理而产生的截断误差不可避免, 由此会带来对输入数据分割情况的考虑不足, 造成分析结果出现很大偏差, 这种偏差可以采取的措施得到改善: 将所有的输入数据的 4 种分割情况考虑在内, 再对准  $x(n)$  后相加的所得作为输入数据, 即图 1 最后一行所示数据。

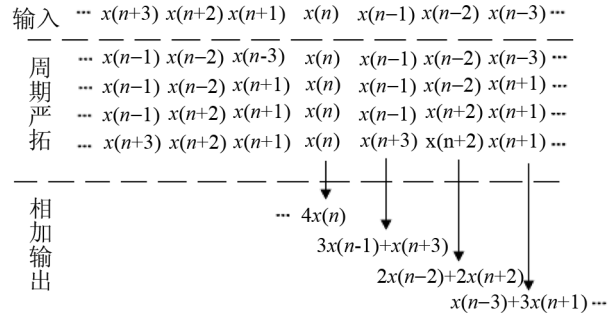


图 1 全相位修正法示意图  
Fig.1 All phase correction method

### 1.3 波达方向计算

利用水听器多个阵元信号的相位差计算目标方位, 假设水听器线列阵共有  $M$  个阵元, 每两个阵元间距为  $d$ 。则声源信号到达第 1 个和第  $M$  个阵元的时延为<sup>[3]</sup>:

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{c} = \frac{M \times d \times \sin \theta}{c} \quad (5)$$

其中:  $c$  为声速;  $\Delta L$  为声程差;  $\theta$  为信号的入射方位角。

假设第 1 个和第  $M$  个阵元接收信号的频率为  $f$ , 相位差为  $\Delta\varphi$ , 则这两个阵元间的信号时延又可表示为:

$$\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{360} \times \frac{1}{f} \quad (\Delta\varphi < 360^\circ) \quad (6)$$

由式(5)、(6)可得出:

$$\theta = \arcsin \frac{c\Delta\varphi}{360Mdf} \quad (7)$$

因此, 只要能精确计算出频率  $f$ 、相位差  $\Delta\varphi$  的值, 就可解算出  $\theta$ , 即信号的入射方向。由于计算出的信号相位差  $\Delta\varphi < 360^\circ$ , 因此要求第 1 个和第  $M$  个阵元的间距不能大于线谱信号的波长  $\lambda$ , 以保证它们之间的延时不会跨周期。

## 2 测试结果分析

### 2.1 无噪信号频率相位计算

对信号源产生的两路无噪正弦信号, 通过谱峰局部修正后的计算结果如表 1 所示。相位计算结果与参考相位差(由相位差计测出)的对比也在表 1 中

给出。信号的采样频率  $F_s=100$  kHz, 采样长度  $NFFT=2048$ 。

频率、相位计算结果表明, 该方法在测量频段内对实际无噪信号的频率计算误差在 0.3%以内, 相位计算结果和相位差计的测量值也非常吻合, 误差小于  $0.2^\circ$ 。

表1 单频信号的频率、相位计算

Table 1 Frequency and phase calculation for monochromatic signal

参考频率 /Hz	FFT 频率计算结果/Hz	谱修正频率计算结果/Hz	参考相位差/ $^\circ$	相位修正结果/ $^\circ$
400	390.5	399.9	151.8	151.63
1000	976.6	999.8	124.5	124.39
2000	2002.0	1999.5	-67.6	-67.51
5000	4980.5	4998.8	15.1	14.96
12000	12011.7	11997.0	-167.3	-167.12

## 2.2 水下运动目标方位计算

在某水下航行目标试验中, 水下被动定向系统利用相关函数算法较为准确地计算出了目标方位角, 两个线列阵布放于被动定向系统测向基阵架的两端。该水下目标航速较高, 在航行过程中通过频谱分析, 观察到其辐射噪声具有多根较强的线谱。利用水下被动定向系统中的一个线列阵上水听器阵元的信号, 通过矩形窗解析单频模型的复合复比值谱校正方法结合相位修正方法计算目标方位角, 得出了与被动定向系统相关函数算法非常接近的计算结果, 如图2所示。图中粗虚线为被动定向系统计算结果, 细实线为谱校正方法计算结果。

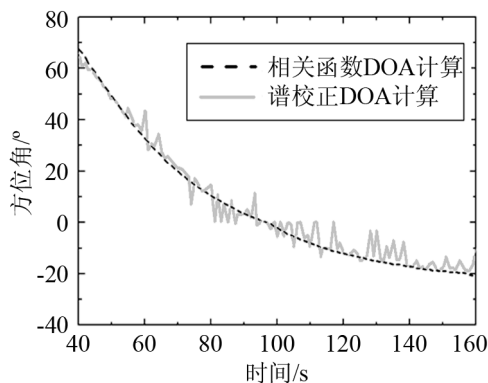


图2 相关函数和谱校正 DOA 计算结果比较

Fig.2 Comparison of DOA estimation between correlation method and spectrum correction method

矩形窗解析单频模型的复合复比值谱校正方法是直接根据水下目标航行时辐射噪声线谱计算求解目标方位角, 因此计算结果受线谱的影响较大, 目标航行过程中, 线谱幅度、频率的不稳定性给计算结果带来了一定的误差。计算中发现, 针对不同频率的线谱计算出的目标方位角存在一定的

差异。

虽然矩形窗解析单频模型的复合复比值谱校正方法计算得出的方位角曲线跳点较多, 但角度误差范围都在  $\pm 10^\circ$  以内。在实际应用中, 可利用卡尔曼等弹道滤波方法滤除跳点<sup>[4]</sup>, 进一步减小误差。该方法要求的基阵孔径小, 试验中只利用了 0.5 m 孔径的线列阵, 而水下被动定向系统的孔径达到了 7m 以上。

## 2.3 CW 波声源方位计算

利用 3 阵元水听器接收信号, 通过矩形窗解析单频模型的复合复比值谱校正方法对水下 CW 波声源方位进行解算, 计算结果如图3所示。图中粗虚线为声源实际方位, 细实线为谱校正方法计算结果。试验采用的 3 阵元水听器阵元间距为 3 cm, CW 波发射脉宽 50 ms, 频率 12 kHz, 重复周期为 1s。CW 波声源与 3 阵元水听器间距为 75m。从图3中可以看出, 文中所述的矩形窗解析单频模型的复合复比值谱校正方法对 CW 波声源计算结果与声源实际方位吻合较好。

由于该方法计算简单, 故计算速度快, 理论上只需 2 个阵元即完成 CW 波声源测向。通过对不同谱线进行校正计算, 还可对频率相差较大的多个 CW 波声源进行测向。相比之下, 其他高分辨算法(如 MUSIC 算法等)要求的基阵阵元数较多<sup>[5]</sup>, 计算过程较为复杂, 在 FPGA 或 DSP 上实现难度较大。

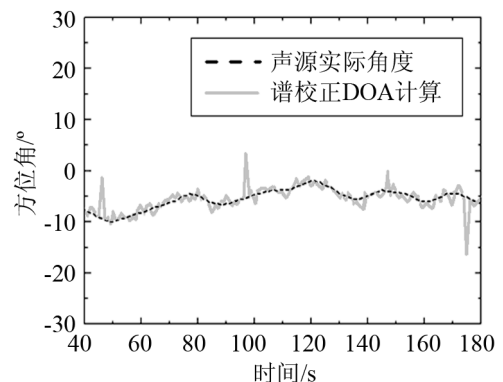


图3 CW 波声源方位计算  
Fig.3 DOA calculation of CW wave

## 3 结论

本文在矩形窗解析单频模型的复合复比值谱校正方法的基础上, 结合全相位修正方法对目标线谱的频率、相位进行精确修正, 再进一步计算水下目标方位, 利用小孔径线列阵多个阵元检测到的同一线谱信号实现了对目标的被动跟踪, 计算结果与目标真实方位吻合较好。文中还利用上述方法在 3

阵元水听器上实现了 CW 波声源测向。计算结果表明, 该技术在小孔径基阵目标方位被动估计和 CW 波波达方向估计等方面应用效果较好, 在各类工程声学系统上具有一定的应用前景。

#### 参 考 文 献

- [1] 陈奎孚, 王建立, 张森文. 频谱校正的复比值法[J]. 振动工程学报, 2008, 21: 314-319.  
CHEN Kuifu, WANG Jianli, ZHANG Senwen. Spectrum correction based on the complex ratio of discrete spectrum[J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21: 314-319.
- [2] 吴国乔, 王兆华. 离散频谱的全相位修正法[J]. 数据采集与处理, 2005, 20(3): 286-290.  
WU Guoqiao, WANG Zhaohua. All phase correction method for discrete spectrum[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2005, 20(3): 286-290.
- [3] 王心怡, 罗松. 运动目标密集线谱精确估计技术研究[J]. 声学技术, 2009, 28(2, Pt.2): 70-73.  
WANG Xinyi, LUO Song. Research of the accurate estimation technique for serried spectrum of moving target[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(2, Pt.2): 70-73.
- [4] 张云武, 申琼. 卡尔曼滤波在水下载体被动弹道跟踪系统中的应用[J]. 舰船科学技术, 29(218): 94-97.  
ZHANG Yunwu, SHEN Qiong. Application of Kalman filtering in passive trajectory tracking system of underwater carrier[J]. Ship Science and Technology, 29(218): 94-97.
- [5] 吕辉. 互谱法被动测距的研究[D]. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 哈尔滨, 2006.  
LÜ Hui. Research of passive ranging with cross-spectra[D]. A Dissertation for the degree of Harbin Engineering University, 2006.