

# 幅度-相位联合检测法在多波束测深系统中的应用

聂良春<sup>1</sup>, 朱琦<sup>2</sup>, 李海森<sup>3,4</sup>

(1. 上海船舶电子设备研究所, 上海 200025; 2. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001; 4. 哈尔滨工业大学仪器科学与技术博士后流动站, 哈尔滨 150001;)

**摘要:**幅度-相位联合检测法是传统多波束测深系统海底检测法的发展方向,它充分利用了幅度和相位信息,能大大扩展测量范围,提高测量精度。文章对该方法的具体应用进行了研究,在确定信号粗略到达时间时采用了一种自动跟踪门方法,同时针对相位检测法实时处理数据运算量大的特点,提出了一种数据压缩与动态滑动平均相结合的数据预处理方法,该方法大大减小了运算量,其有效性通过方差分析进行了验证。数据处理结果表明,采用了自动跟踪门和数据预处理相结合的幅度-相位联合检测方法可明显扩展多波束测深系统的条带宽度。

**关键词:**幅度-相位联合检测;多波束测深;数据压缩

中图分类号:TB566 文献标识码:A 文章编号:1000-3630(2005)02-0084-05

## Application of amplitude-phase detection in multi-beam bathymetric system

NIE Liang-chun, ZHU Qi, LI Hai-sen

(1. Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 200025;

2. Information & Communication Engineering College, Harbin Engineering University, Harbin 150001;

3. Underwater Acoustic Engineering College, Harbin Engineering University, Harbin 150001;

4. Post-Doctor Research Center for Instrument Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** Amplitude-phase detection is an ideal choice in multi-beams system development for sea bottom detection, which makes full use of amplitude and phase information and can improve measurement accuracy. Intensive research has been conducted on how the method is used. An automatic gate tracing technique is proposed for rough arrival time estimation. In order to lessen heavy computation burden and meet the real time requirement processing sampled data, a pre-processing technique is adopted which combines data compression and dynamic averaging. In order to verify the validity of the pre-processing method, a variance analysis is included. The experimental results show that the automatic gate tracing and pre-processing can extend measurement width in multi-beam systems when combined with the amplitude-phase detection method.

**Key words:** combined amplitude-phase detection; multi-beam bathymetry; data compression

## 1 引言

多波束测深系统是一种高效的海底地形测绘设备,它能准确、快速地测出沿航线一定宽度内海底地

形情况,甚至地形地貌的精细特征。

传统的多波束测深系统一般采用幅度检测法得到回波的到达时间估计(TOA),再通过声线补偿和后置拼图处理,得到等深线图或者三维立体图<sup>[1]</sup>。但是,由于波束脚印内散射体的随机分布会导致回波强度的随机变化,基于幅度检测的方法不能给出精确的结果。目前最好的幅度检测法是幅度加权平均(WMT),该方法虽能确定波束内回波的质心,但这种

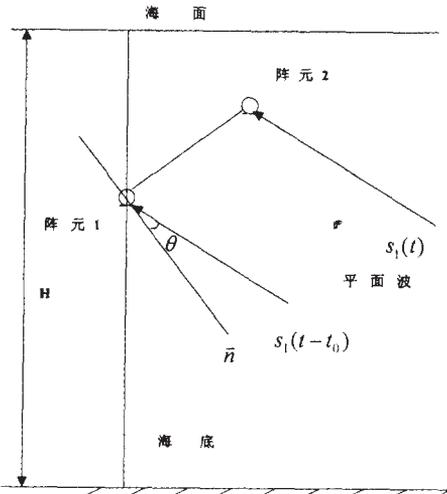


图 1 多波束系统分离孔径法与测扫声纳的等效

Fig.1 Equivalence between multi-beam split-aperture system and side-scanning sonar

方法受到海底底质组成局部变化的影响,因而其使用也局限于船正下方很窄的水平波束范围。

对多波束测深系统应用相位法时应采用分离孔径法,通过子阵划分,得到多波束相位差序列。

对每一波束方向的两个分裂波束,可将其等效成侧扫声纳的两个基元,如图 1 所示。

由于引入了多波束形成方法,在很大程度上克服了侧扫声纳同一时间多个回声信号的问题。结合侧扫声纳的知识,对于二元阵接收系统,两基元相位差具有线性分布特性,当信号来自正横方向时,相位差为零<sup>[2]</sup>。于是我们可以通过对分离孔径相位差序列的处理,确定预成波束方向的 TOA。采用回归分析的方法,引入多项式拟合,可以实现这个目的。

相位检测法受回波幅度起伏影响小,它适宜工作在大角度,测量精度高。幅度-相位联合检测法可以实现测量的超宽覆盖。

## 2 自动跟踪门

确定回波的准确到达时间是比较困难的,但这是幅度-相位联合检测法必须要解决的一个问题,因为只有主波束回波到达时间范围内,相位差序列才具有非模糊区间,相位检测法和幅度检测法才能有效测量。

由于海底回波信号是一种海底混响,满足广义瑞利分布,据此可以利用其回波扩展特性确定跟踪门。

引入一种基于能量最大的自动跟踪门技术,采用迭代算法搜索到按下式计算出的时间窗<sup>[3]</sup>:

当回波垂直入射时,

$$W_s = \tau + \frac{H \theta_R^2}{4c} \quad (1)$$

当回波倾斜入射时,

$$W_s = \tau + \frac{2H\theta_R}{c} \frac{\tan\left(\theta_0 + \frac{\theta_R}{2}\right)}{\cos\left(\theta_0 - \frac{\theta_R}{2}\right)} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: $\tau$ 为脉冲持续时间, $\theta_0 = \alpha + \sin^{-1}(\lambda k/dM)$ , $k = -M/2 + 1:M/2$ , $\alpha$ 为阵倾斜角(仰角), $k$ 为波束号, $\lambda$ 为波长, $d$ 为阵元间距, $c$ 为声速, $M$ 可取阵元数的 2~2.5 倍, $H$ 为海深, $\theta_R$ 为 3dB 主波束宽度, $\theta_0$ 为预成波束角度。

迭代法采用类似二分法的方法进行。即将区间  $[x_0, x_N]$  分成 4 个部分,分别为区间  $W_1, W_2, W_3, W_4$ , 设幅度函数为  $A(x)$ ,考虑能量  $E_1, E_2, E_3$  :

$$\begin{aligned} E_1 &= \sum A^2(x), \quad x \in [w_1, w_2] \\ E_2 &= \sum A^2(x), \quad x \in [w_2, w_3] \\ E_3 &= \sum A^2(x), \quad x \in [w_3, w_4] \end{aligned} \quad (3)$$

比较  $E_1, E_2, E_3$ , 找到最大值  $E_i$ , 其对应的区间为  $[x_i, x_{i+1}]$ 。

将区间  $[x_i, x_{i+1}]$  替换  $[x_0, x_N]$ , 继续上述的区间划分和判断,直到区间  $[x_i, x_{i+1}]$  长度小于时间窗  $W_s$ , 结束搜索,确定出回波到达时间范围  $W_s$ 。

这种区间搜索方法速度很快,将这种方法应用到波束幅度序列,就得到一种快速的跟踪门实现方法。

## 3 数据预处理方法

通过自动跟踪门得到回波的大概时间范围  $W_s$  后,数据量仍然很大,尤其当大角度回波扩展比较利害时。考虑到相位差序列的线性分布特性,我们引入数据压缩结合数据滑动平均的方法,得到新的相位差序列。

具体实现方法如下:

采用分离孔径法得到两子阵 A 和 B 上的波束时间数据  $S_A(k, n)$  和  $S_B(k, n)$ ,  $k$  为感兴趣的波束序号,换能器阵倾斜放置,与水平方向成角度  $\alpha$ ;子阵 A 由前  $N/2$  个阵元形成,子阵 B 由后  $N/2$  个阵元形成, $N$  为阵元数目;A 位于 B 下方,采用共轭相乘,得到  $S_{AB}(k, n) = S_B(k, n) \times S_A^*(k, n)$ ;进行下述处理得到复

序列  $P(k, m)$ :

$$P(k, m) = \frac{\sum_{n=X_m-W_1/2}^{X_m+W_1/2} S_{AR}(k, n)}{M}, m=1, 2, \dots, M \quad (4)$$

式(4)中, 设跟踪门为  $[g_1, g_2]$ , 则  $W_1 = [(g_2 - g_1)/(M + 1)]$ ,  $[\cdot]$  表示取整,  $M = N/2$  或  $M = N/2.5$ ,  $N$  为阵元数目;  $X_m$  表示滑动点的位置,  $X_m = g_1 + m * W_1, m = 1, 2, \dots, M$ ;  $M$  为数据压缩后样本容量, 根据实验结果确定。

通过式(4)的处理, 得到新的波束复序列  $P(k, m)$ 。对  $P(k, m)$  求相位, 得到相位差序列  $\Delta\varphi_{AB}(k, m)$ 。

这种数据预处理方法的有效性可以通过方差分析进行验证。

由于  $\Delta\varphi_{AB}(k, m)$  用于求预成波束 TOA 估计, 所以数据预处理对 TOA 估计的影响, 可以认为是单因子多水平的检验问题。这里因子为数据预处理方法对 TOA 估计的影响, 选择预处理样本压缩容量为 50 点、20 点、10 点及不采用预处理四种方法作为四个水平。

采用仿真数据, 使用相位检测法, 得到  $k = -17:17$ , 总共 35 对分裂波束(即子阵波束)4 种水平下 TOA 估计值和真实值的离差。将数据用图 2 表示。

由于各波束的 TOA 值不相同, 需要考虑各种数据预处理方法的 TOA 估计值与真实值偏差是由于处理方法造成的还是由于随机原因造成的。依据参考文献[4]关于方差分析的内容, 建立假设检验:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$$

$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$  分别为四个水平下离差样本的期望。

$H_0$  成立时表示四种水平等效, 也就是数据预处理方法和不采用预处理能得到相同的 TOA 估计。 $H_1$  成立时表示各水平是有差异的, 即采用预处理方法带来明显误差。

根据单因子方差分析表 1<sup>[3,4]</sup>, F 检验统计量为  $S_2^2/S_1^2, r=4, n=35*4=140$ , 可以得到 F 检验计算值, 将其与查表值相比较, 有

$$F=1.2769 < F_{0.05}(3, 136)=2.6$$

由于  $F > F_{0.05}(3, 136)$  不成立, 表明两种估计方法的方差差别不显著, 四种水平没有明显差异, 也就是说数据预处理方法并没有带来偏差, 不影响 TOA 估计; 相反, 数据预处理的引入, 还大大减小了数据运算量。

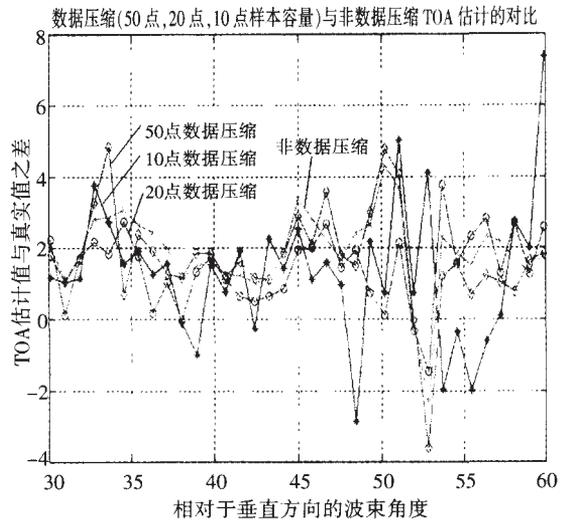


图 2 四种水平下 TOA 估计值与真实值的离差  
Fig.2 Deviation of TOA estimates at 4 different levels

表 1 单因子方差分析表

Table 1 Analysis of single factor variance

方差来源	平方和	方差
因子影响	$Q_2 = \sum_{i=1}^r n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2$	$S_2^2 = Q_2 / r - 1$
误差	$Q_1 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$	$S_1^2 = Q_1 / n - r$
总和	$Q = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x})^2$	$S^2 = Q / n - 1$

## 4 幅度-相位联合处理

由于 WMT 法只适合使用在波束偏移不是很厉害的垂直海底附近, 而相位法则适用于倾斜波束, 要求搜索区间尽量大, 两种测量方法正好互补。我们结合仿真试验和海试数据处理所得的结论, 根据经验采用 10 个发射脉冲持续时间长度作为判断使用 WMT 法和相位法的门限: 当搜索区间小于该门限时, 采用 WMT 法; 当搜索区间大于该门限时, 采用相位法。

使用相位法时, 采用一次或二次正交多项式拟合相结合的方法<sup>[5]</sup>, 根据方差大小来选择, 采用方差小的拟合结果, 这称为方差准则。在该准则下, 可以得到最接近真实情况的拟合曲线。拟合方程确定后, 可以通过反预测<sup>[6,7]</sup>, 得到曲线的零交叉点, 即为 TOA 估计值。

这就是本文提出的幅度-相位联合检测法的实现方法。

### 5 数据处理

基于前面的讨论,我们对仿真和海试数据进行了处理。采用分离孔径子阵阵元数  $D=20$ , 阵元 32 个,子阵声中心距离为  $4d$ ,  $d$  为相邻阵元间距;每个波束的跟踪门内的相位差序列预处理后样本容量为 10。

#### 5.1 仿真数据

采用 100m 深度的平海底仿真数据进行处理,得到 TOA 估计结果。自动跟踪门中取 3dB 主波束宽度代入计算。

将数据预处理过程用图 3 给出。图 3 最上面是

波束幅度,其次是相位差、跟踪门内的相位差、预处理后相位差。

从图 3 中可以看出,自动跟踪门非常好地搜索到了回波到达的大概时间范围;数据预处理保留了相位差曲线的固有规律,减小了叠加在相位差曲线上的干扰起伏。

将 WMT 法和相位差法一次拟合的 TOA 估计结果在图 4(a)给出,作为比较,给出幅度-相位联合检测法的 TOA 估计结果,如图 4(b)所示;在图 4 中,没有考虑回波记录的起始时刻  $n_0$ 。

图 4(a)中,“○”表示 WMT 处理的结果,“\*”表示一次拟合处理得到的结果。从图 4 可以看出,幅度-相位联合检测法得到的 TOA 估计曲线比较平坦

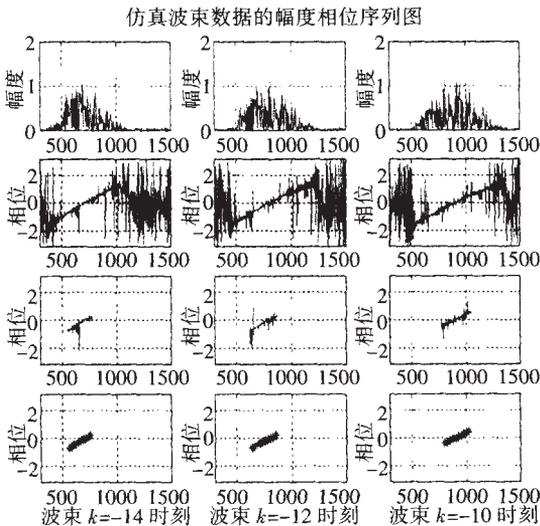


图 3 波束  $k=-14\sim-10$  部分全波束幅度图、相位处理过程图  
Fig.3 Amplitude and phase processing for beams with  $k=-14\sim-10$

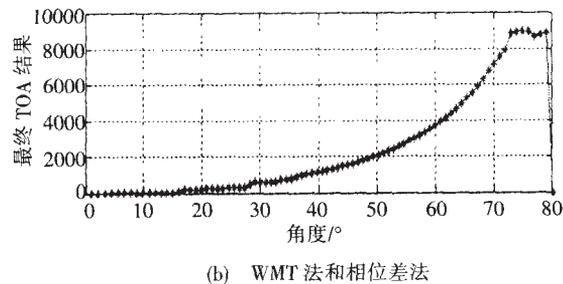
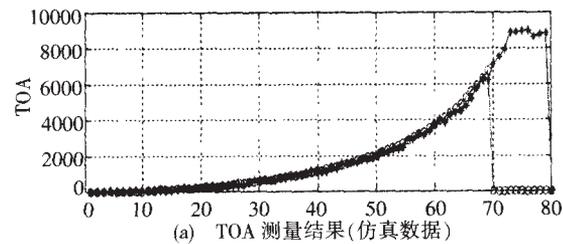


图 4 WMT 法和相位法一次拟合 TOA 及联合检测法 TOA  
Fig.4 TOA obtained with WMT and phase fitting method, and combined amplitude-phase detection

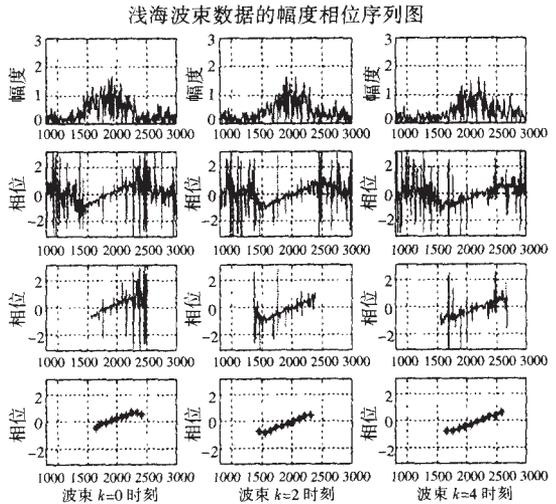


图 5 波束  $k=0\sim4$  部分全波束幅度图、相位差处理过程图  
Fig.5 Amplitude and phase processing for beams with  $k=0\sim4$

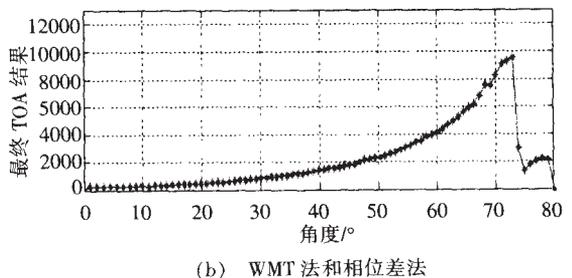
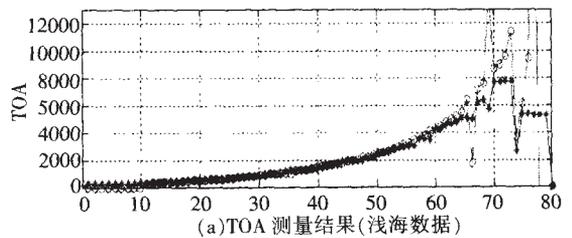


图 6 WMT 和相位差一次拟合 TOA 及联合使用 TOA 曲线  
Fig.6 TOA obtained with WMT and phase fitting method, and combined amplitude-phase detection

光滑,符合平海底情况假设,其工作范围大。WMT法和相位法的一次拟合在大角度均有较大的起伏,说明受干扰起伏大。

## 5.2 海试数据

采用国内某型多波束条带测深仪在南海的试验数据进行处理,该批数据含有大角度方向的回波,适合用于相位法的验证。水深大约 101m,起始记录时刻  $n_0=3166$  个采样点; 采样率  $f_s=27.5\text{kHz}$ , 4 倍采样; 3dB 主瓣宽度代入自动跟踪门计算。

数据预处理过程图如图 5 所示,图 5 中最上面是波束幅度,其次是相位差、跟踪门内的相位差、预处理后相位差,从图中可见预处理是有效的。

数据处理过程中通过方差准则,发现采用一次拟合即可满足要求。WMT法和相位法一次拟合的结果以及幅度-相位联合检测法 TOA 估计在图 6 给出,图 6 的作图说明同于图 4。

从图 4 中可以看出,幅度-相位联合检测法的使用得到了较光滑的 TOA 估计结果,与海底的慢变地形是一致的;同时说明该测量海域较平坦。而单纯的 WMT法得到的 TOA 结果在大倾斜角受干扰起伏大,相位法则受干扰起伏小。

其它的海试数据处理也得到了比较好的结果。在此不予赘述。

## 6 结 论

本文研究了幅度-相位联合检测法的具体实现,提出了一种基于幅度能量的自动跟踪门方法,针对数据处理的实时实现要求,引入了一种有效的数据预处理方法。根据幅度检测法和相位检测法的各自特点,采用经验准则,将两种方法联合使用,得到

了幅度-相位联合检测法。仿真和海试数据处理表明采用了自动跟踪门和数据预处理的幅度-相位联合检测法能得到良好的 TOA 估计结果。

## 参 考 文 献

- [1] 李家彪. 多波束勘测原理技术与方法[M]. 北京:海洋出版社,1999:1-9, 65-86.  
LI Jiabiao. Multi-beam survey theory and method [M]. Beijing: Sea publishing house, 1999. 1-9, 65-86
- [2] Morega S D, Sankar. Digital signal processing for precision wide-swath bathymetry [J]. IEEE J Oceanic Eng, 1984, 9(2): 73-84
- [3] 聂良春. 多波束相位差法海底 TOA 估计理论分析及实用性研究[D]. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2003: 24-30.  
NIE Liangchun. Multibeam phase TOA estimation theory analysis and application research [D]. Harbin Engineering University Master Paper, 2003. 24-30
- [4] 倪加勋, 袁卫, 易辉, 蔡志洲. 应用统计学[M]. 北京: 中国人民大学出版社. 1992: 117-127.  
NI Jiaxun, YUAN Wei, YI Hui, CAI Zhizhou. Applied statistics [M]. Beijing: Chinese RenMin University, 1992. 1-9, 117-127
- [5] 张启锐. 实用回归分析[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-7, 76-85, 204-210, 266-271.  
Zhang Qirui. Practical regression analysis [M]. Beijing: Geological publishing house, 1988. 1-7, 76-85, 204-210, 266-277.
- [6] 聂良春, 朱琦, 李海森. 多波束相位差序列多项式回归模型阶次的确定[J]. 海洋测绘, 23(5): 1-5.  
NIE Liang-chun, Zhu Qi, Li Hai-sen. Multibeam phase difference sequence polynomial regression model order decision [J]. Sea Survey, 23(5): 1-5
- [7] 孙荣恒. 应用数理统计[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 69-70, 256-261.  
SUN Rongheng. Applied Statistics [M]. Beijing: Science publishing house, 1998. 69-70, 256-261.

## 简讯

# 上海市声学学会副理事长顾亚平作客“名家科普讲坛”

2005年3月17日,上海市科协在科学会堂举办了第26期“名家科普讲坛”。本次讲坛特邀上海市声学学会副理事长、上海全景数字技术有限公司总经理、中科院研究员顾亚平博士为大家作了题为“数字电视技术、标准及其应用”的科普报告。来自本市各学、协会和基层负责科普工作的数百位代表聆听了本期讲座。

数字电视是21世纪引领人们享受数字化生活的广电领域的一项新技术革命,也是我国民族工业发展新的推动力。顾亚平副理事长从多年的实践经验和技术专家的角度,深入浅出地对数字电视的定义、功能、技术标准、应用现状、未来发展趋势等作了全面的阐述。特别介绍了国内外在数字电视的三个关键技术(信源编码技术、信道编码技术和增值业务、应用的开展)的发展状况和趋势。通过对数字电视新应用的讲解,如:节目大大增加,图像更加清晰,用户操作极为方便,开展更多的增值业务等,使与会听众更详尽地了解数字电视及数字电视带来的新生活。

上海科普网对本期讲坛作了独家的网上视频直播,现场听众和广大网友踊跃参与讲座中的提问和互动交流,使讲座取得了良好的宣传效果。

另外,《上海科技报》于3月29日以半版篇幅介绍了这次报告内容。