

多波束测深系统多子阵检测法的改进及其性能分析

周 天¹, 李海森^{1,2}, 朱志德¹, 袁延芝³

(1. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学仪器科学与技术博士后流动站, 哈尔滨 150001; 3. 中国海洋开发中心, 北京 100073)

摘要:多波束测深系统中, 相位检测法是实现超宽覆盖测量的关键技术之一。分析了分裂子阵相位检测法和多子阵检测法, 并基于对子阵结构的分析, 改进了多子阵检测法, 给出了多子阵检测法输出信噪比的表达式, 讨论了子阵结构对输出信噪比的影响, 在理论分析基础上选择了三种子阵结构对海上试验数据进行了处理, 验证了分析结果。处理结果表明, 在优化参数基础上, 多子阵检测法不但可实现多波束测深系统的超宽覆盖, 而且可改善系统对海底的检测性能。

关键词:多波束; 分裂子阵相位检测法; 多子阵检测法; 信噪比

中图分类号: TN911.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630-(2005)03-0152-05

Performance analysis of improved multiple sub-array detection method in multi-beam bathymetry system

ZHOU Tian¹, LI Hai-sen^{1,2}, ZHU Zhi-de¹, YUAN Yan-yi³

(1. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. Post-Doctor Workstation of Instrument Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
3. China Marine Development and Research Center, Beijing 100073, China)

Abstract: In a multi-beam bathymetry system, phase detection is a key for achieving super-wide coverage. This paper analyzes split-subarray phase detection and multi-subarray detection methods. The multi-subarrays detection method is improved based on analysis of the subarray configuration. Representation of multi-subarrays output signal-to-noise ratio is given, the influence of the subarray configuration on output signal-to-noise ratio discussed, and 3 subarray configurations are chosen to process the experimental data obtained at sea based on theoretical analysis. Validity of the results is tested by experiments. It has been shown that, with optimized parameters, the multi-subarrays detection method not only realizes the super-wide coverage, but also improves the detection performance.

Key words: multi-beam; split-subarray detection; multi-subarrays detection; signal-to-noise ratio

1 引 言

现代的多波束测深系统为了实现超宽覆盖必须使用相位检测法。传统的相位检测法使用了分裂子阵, 有效地解决了边缘波束的检测问题^[1]; 在此基础上提出的多子阵检测法不仅给出了更好的信噪比,

而且对垂直及边缘波束都给出了较好的检测结果, 有效地改善了检测性能^[2]。

由于分裂子阵相位检测法需要进行非模糊相位差曲线拟合和预测相位差为零的时刻, 这就希望非模糊相位差曲线较长^[1]。从子阵结构来说, 就是要求子阵要短, 尤其当多波束测深系统应用在浅水时更是如此, 此时, 两个子阵可能覆盖不了整个基阵。只利用了部分基元数据的分裂子阵, 相位检测法的输出信噪比低; 而相位检测法的性能直接取决于输出信噪比, 因此分裂子阵相位检测法在实际应用中受到限制。多子阵检测法虽然也要求每个子阵的长度不

收稿日期: 2004-05-25; 修改日期: 2004-07-11

基金项目: 国防水声技术国家重点实验室基金(51445030205ZS2301) 和中国博士后科学基金(LRB00025)

作者简介: 周天(1980-), 男, 江苏盐城人, 博士研究生, 从事水声信号处理及空间阵列信号处理研究

能长,但通过使用多个子阵即可利用全部基元。文献[2]中提出的多子阵检测法,没有定量地分析这种检测方法的信噪比性能。本文对多子阵检测法作了改进,充分应用各子阵间的相位差信息进行平均处理,替代了文献[2]中的最小二乘拟合处理,并且研究了如何选定合理的多子阵结构以及定量分析多子阵检测法输出信噪比问题,给出了多子阵输出信噪比的表达式。最后针对上述研究工作利用海上实验数据进行了验证,证明理论分析结果正确,对新型多波束测深声纳设计有指导意义。

2 分裂子阵相位检测法

以倾斜角 α 放置的一个 Q 个基元的均匀线列阵,基元间距为 d ,分成两个子阵时,每个子阵由 H 个基元构成,两个子阵间的间隔由 M 个基元间距 Md 形成,由基阵理论可知,两个子阵的相位差为:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_{AB}(\theta_0, n) &= \Delta\varphi_A(\theta_0, n) - \Delta\varphi_B(\theta_0, n) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} Md (\sin(\theta(n) - \alpha) - \sin(\theta_0 - \alpha))\end{aligned}\quad (1)$$

上式中, θ_0 为波束控制角,它是波束控制方向与海底垂向之间的夹角; $\theta(n)$ 为回波到达角,它是回波到达方向与海底垂向的夹角; $\theta(n) - \alpha$ 为回波到达方向与基阵法线方向之间的夹角; $\theta_0 - \alpha$ 为波束控制方向与基阵法线方向之间的夹角; λ 为波长。由波束形成理论知:

$$\sin(\theta_0 - \alpha) = \frac{\lambda j}{dN}\quad (2)$$

式(2)中, j 为 FFT 波束形成序号, N 为波束形成的波束数。

将式(2)代入式(1),得到子阵 A 和 B 的 j 号波束相位差表达式:

$$\Delta\varphi_{AB}(j, n) = \frac{2\pi}{\lambda} Md \sin(\theta(n) - \alpha) - \frac{2\pi Mj}{N}\quad (3)$$

利用上面的 $\Delta\varphi_{AB}(j, n)$, 可用下式解算出相应的 j 号波束回波信号的波达角 DOA :

$$\theta(n) = \sin^{-1} \left[\frac{c(\Delta\varphi_{AB}(j, n) + \frac{2\pi Mj}{N})}{2\pi f Md} \right] + \alpha\quad (4)$$

上式中, c 为声速, f 为信号频率。

需要说明的是: 分裂子阵相位检测法要对非模糊区间内相位差曲线进行拟合, 拟合曲线的阶数由海底地形及回波到达角决定^[3], 然后再检测相位差曲线的零交叉点。为了减小曲线拟合的误差, 希望非模糊相位差曲线较长, 这对子阵结构来说, 就是要求

子阵短。但是, 越短的子阵就意味着利用越少的基元数据。分裂子阵只用了两个子阵, 因而在浅水条件下可能利用不了基阵全部的基元数据进行处理, 使输出信噪比变低, 降低了检测性能。为了提高输出信噪比, 可以采用多子阵结构。

3 多子阵检测法

在多子阵检测法中, 从一个接收阵中可形成多个重叠子阵, 对每一个子阵都分别进行波束形成。分裂子阵相位检测法计算子阵间的相位差, 而多子阵检测法给出回波信号的相位, 它是子阵位置的函数, 简称子阵相位函数, 记为:

$$\varphi_i = Kx_i + b\quad (5)$$

式(5)中, x_i 为第 i 个子阵的坐标位置, φ_i 为第 i 个子阵接收信号的相位, K 为相位斜率, 是波束角度和到达时刻的函数; b 为第一个基元接收信号的相位, 为常数。当存在有效的回波信号时, 可以估计出有效的 K ; 在没有回波信号时, K 是随机的。从线性函数的一组值中估计斜率 K 的常用方法为最小二乘拟合, 估计结果为:

$$\hat{K} = \frac{1}{a} \left(L \sum_{i=1}^L x_i \varphi_i - \sum_{i=1}^L x_i \sum_{i=1}^L \varphi_i \right)\quad (6)$$

其中, L 为子阵的数目, $a = L \sum_{i=1}^L x_i^2 - (\sum_{i=1}^L x_i)^2$ 。

使用这种方法之前必须要对 φ_i 进行解卷绕, 这通常是一个比较复杂的处理。为了估计斜率 K , 这里采用一种变通的方法来避开解卷绕的处理。参照分裂子阵相位检测法中的相位差处理方法得到相位斜率 K 估计的方法如下。

由子阵相位函数 $\varphi_i = Kx_i + b$, 我们得到两相邻子阵的相位差:

$$\Delta\theta_i = \varphi_{i+1} - \varphi_i = K(x_{i+1} - x_i) = K_d Md\quad (7)$$

而子阵结构只要满足条件 $H \geq 2M$, 相邻子阵的相位差是没有卷绕的, 我们用不同子阵间同一时刻、同号波束间的相位差的平均代替多子阵检测法中式(6)的最小二乘拟合处理对 K 进行估计, 因此, 由式(8)得到斜率 K 的估计:

$$\hat{K} = \frac{1}{L-1} \sum_{i=1}^{L-1} K_i = \frac{1}{(L-1)Md} \sum_{i=1}^{L-1} \Delta\theta_i\quad (8)$$

利用式(7), 式(4)变为:

$$\theta(n) = \sin^{-1} \left[\frac{c(K + \frac{2\pi j}{Nd})}{2\pi f} \right] + \alpha\quad (9)$$

在获得相位斜率 K 后,利用式(9)便可得到回波到达方向(DOA)。

此时,作为波束角度和到达时刻函数的相位斜率 K 称为相位斜率图像,其含义是:对于每一个波束角度,在相位斜率图像中的某号波束不同时刻的相位斜率 K ,实际上就是分裂子阵相位检测法中的相位差曲线,当回波 DOA 和波束方向相同时, K 为零。

分裂子阵相位检测法只是通过曲线拟合寻找相位差曲线的零交叉点,零交叉点只是对应于波束主轴的方向。然而曲线上其余的非零值也是有用的,它们表示了此波束中其它方向的回波信号。因此,多子阵检测法引入一种图像变换的方法,它综合利用相位斜率图中的所有点(零点和非零点),变换后的图像称为海底图像,它是时刻和回波到达方向的函数。海底图像中的像素点值表征了海底某方向回波的概率。以下给出了图像变换法的具体步骤:

初始化:产生海底图像 $B(n, \theta)$, n 为时刻, θ 为 DOA。

更新:对相位斜率图像 $K(n, \alpha)$ 中的每一个像素点利用式(9)进行变换,计算 θ , 增加对应的 $B(n, \theta)$ 。即:

$$B(n, \theta) \leftarrow B(n, \theta) + I(n, \alpha) \quad (10)$$

其中, α 为波束控制角。增量 $I(n, \alpha)$ 为时刻 n 和波束控制角 α 的函数,有:

$$I(n, \alpha) = 1 + wA(n, \alpha) \quad (11)$$

此处,常数 1 为相位加权, $A(n, \alpha)$ 是 n 时刻、控制角为 α 的波束输出的幅度, w 为全局加权因子,调整其大小以使得幅度加权和相位加权具有可比性。这种加权是合理的,因为它不仅与回波信号的相位有关,而且还与回波信号的幅度有关。这样就综合利用了回波信号的幅度-相位信息,实现了幅度-相位的联合检测^[4]。

由于邻近的波束有重叠,它们在回波到达时间内将给出近似相同的 DOA 估计,海底图像中对应于回波方向的像素值会增长几倍,表明了此方向上的海底回波存在着很大的可能性,图像变换处理利用了邻近波束的交叉部分,这正是改善检测性能的关键所在。为了保证海底同一区域有更多的波束能够覆盖,多子阵检测法中的每个子阵不能长。而从下面对多子阵检测法输出信噪比的定量分析可以看到,在总基元数一定时,短的子阵虽然有较多的子阵数目,但是其信噪比还是降低了,因而在信噪比和足印(波束在海底的覆盖范围)之间要进行折衷。在浅水工作环境下尤其需要注意这个问题。在深水工作环境

下,因为长的子阵也有比较大的足印,此时,信噪比和足印之间并无矛盾。这种情况下,也就没有必要用多子阵检测法替代分裂子阵检测法了。

4 多子阵检测法输出信噪比分析

本节通过多子阵检测法的实际处理过程详细分析其输入和输出信噪比的关系,为下一步海试数据处理提供理论依据。

根据文献[5,6],对水声信号作如下假设:噪声是零均值高斯过程;信号与噪声统计独立;基元间的噪声统计独立,且功率相同;各基元信号相干且接收到的信号功率相同。按照上节的处理过程对信号进行处理,得到多子阵检测法的输出信噪比 $(S/N)_{out}$ 表达式为:

$$(S/N)_{out} = (L-1)^2 H^4 \cdot \left(\frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \right)^2 \cdot \frac{\{(L-1)(H^2 + (3-L)(H-M)^2) + 2 \sum_{k=2}^{\min(P, L-1)} ((L-k)(3(H-k \times M)^2 + 2(k+1)M(H-k \times M) + ((k-1)^2 + 1)M^2)) + \frac{(L-P)(L-1-P)}{2} (H-M)^2 + (L-1-P)(H-P \times M)^2\}}{(H-M)^2 + (L-1-P)(H-P \times M)^2} \quad (12)$$

其中, $P = \left\lfloor \frac{H-1}{M} \right\rfloor$, 表示相互重叠的子阵数,“ $\lfloor \cdot \rfloor$ ”

表示下取整; $\frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2}$ 表示各基元的输入信噪比。只有当

$L-1 \geq P$ 时,式(12)分母中的

$$\frac{(L-P)(L-1-P)}{2} (H-M)^2 + (L-1-P)(H-P \times M)^2$$

项才存在。

由式(12)得到:在基元总数 Q 和子阵个数 L 一定的情况下,子阵长度 H 的增加可以提高处理输出信噪比;在子阵长度 H 与子阵间隔 M 一定的情况下,增加子阵个数 L 可以提高处理输出信噪比;而当基元总数 Q 和子阵长度 L 一定时,在满足 $H \geq 2M$ 的条件下, P 越接近于 2,多子阵处理的输出信噪比越高。

5 海试数据处理

为了验证上述理论分析结果的正确性,选择东

海某浅海海域的实验数据进行处理,实验基阵为 32 元均匀线列阵,基阵与海底夹角 $\alpha=45^\circ$,基元间隔 $d=1.72\text{cm}$,信号波长 $\lambda=3.33\text{cm}$ 。处理结果如图 1~图 3 所示。

图中,纵坐标为回波到达时刻。对于 FFT 波束形成,像素值表征了波束输出幅度的数值;对于相位斜率图像,像素值表征了 K 的数值;对于多子阵检测法,像素值表征了某时刻某方向回波出现概率的大小。

图 1 中,子阵长度 $H=8$,子阵间隔 $M=3$,子阵个数 $L=3$,使用基元总数 $Q=14$;根据式(12)可以得到其输出信噪比:

$$(S/N)_{out} = 63(\frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2})^2$$

图 2 中,子阵长度 $H=8$,子阵间隔 $M=3$,子阵个数 $L=9$,使用基元总数 $Q=32$;根据式(12)可以得到其输出信噪比:

$$(S/N)_{out} = 196.5(\frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2})^2$$

图 3 中,子阵长度 $H=24$,子阵间隔 $M=8$,子阵个数 $L=2$,使用基元总数 $Q=32$;根据式(12)可以得到其输出信噪比:

$$(S/N)_{out} = 398.8(\frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2})^2$$

从上述三种子阵结构处理结果可以看到,对于第一种子阵结构,由于只利用部分基元的数据,多子阵处理的输出信噪比低,检测性能比较差;第二种子阵结构利用了全部的基元数据,给出了较

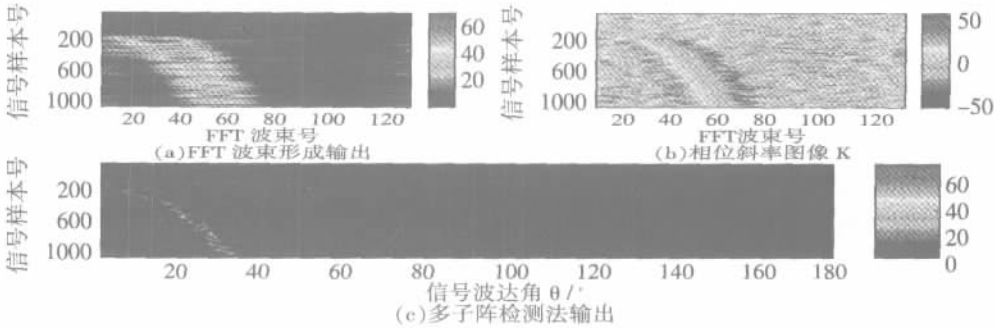


图1 第一种子阵结构处理结果
Fig.1 Results of the first subarray configuration

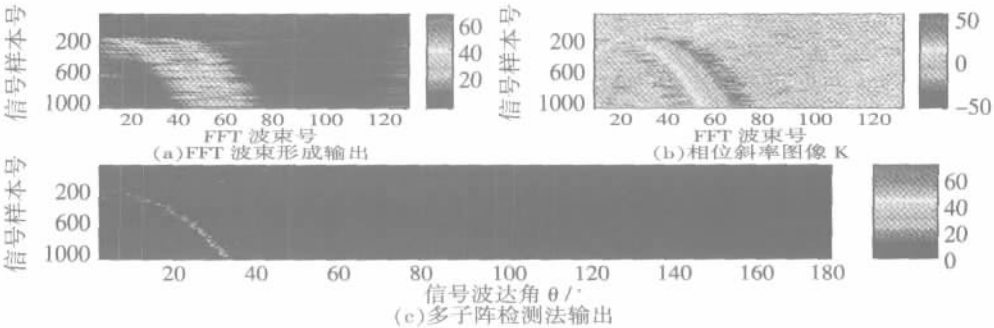


图2 第二种子阵结构处理结果
Fig.2 Results of the second subarray configuration

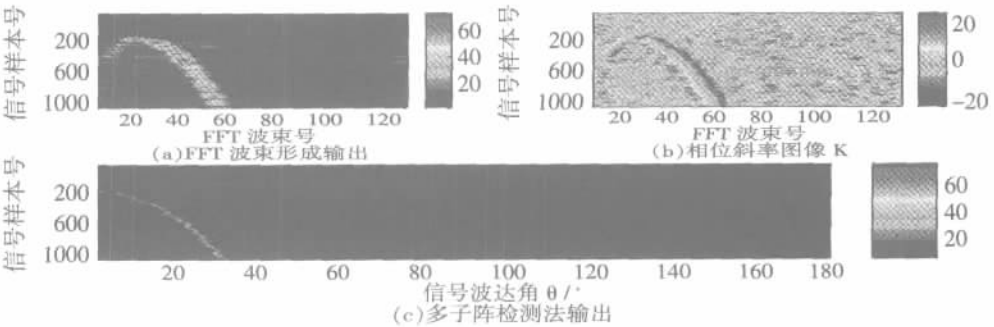


图3 第三种子阵结构处理结果
Fig.3 Results of the third subarray configuration

好的检测效果。第三种子阵结构的输出信噪比比第二种子阵高,从图中也可以看到,其检测性能比第二种子阵还要好。本文前面已经分析得到子阵的长度不能很长,而对于第三种子阵结构,子阵长度 $H=24$,是整个基阵长度的 $3/4$,比较长的子阵却还能得到比较理想的效果,是因为试验海区的水深比较深的原因。

6 结 论

本文从多波束测深系统的两种相位检测法出发,分析了分裂子阵相位检测法和多子阵检测法的处理过程及特点,讨论并推导了它们对应的输出信噪比,得出如下结论:

(1) 在基元总数、子阵长度和子阵间隔相同的情况下,因为多子阵利用了全部的基元数据,多子阵处理的输出信噪比显然高于同子阵长度的分裂子阵。应优先选用多子阵处理方法。

(2) 对于多子阵检测法来说,为了提高输出信噪比,子阵结构的选取与基元总数、子阵个数、子阵长度、子阵的中心间隔等有关。根据多子阵检测法的要求,在优化参数的基础上,可以实现多波束测深系统的超宽覆盖,改善海底检测性能。

参 考 文 献

[1] 聂良春,朱琦,李海森.幅度-相位联合检测法在多波束测

深系统中的应用研究[J].声学技术,2005, 24(2):85-88

NIE Liang-chun, ZHU Qi, LI Hai-sen. Research On application of amplitude-phase detection method in multi-beam bathymetric system[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(2):85-88.

[2] Luren Yang, Torfinn Tøft. Multibeam sonar bottom detection using multiple subarrays[A]. In Proc Oceans' 97 [C], 1997:932-938.

[3] 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,2003, 23(5):1-5.

NIE Liangchun, ZHU Qi, LI Haisen. The determination of orders of the polynomial regression model in multi-beam phase difference series[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2003, 23(5):1-5.

[4] 周天,朱志德,李海森.多子阵幅度-相位联合检测法在多波束测深系统中的应用[J].海洋测绘,2004,24(4):7-10.

ZHOU Tian, ZHU Zhide, LI Haisen. The application of multi-subarray amplitude-phase united detection method in multi-beam bathymetry system[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2004, 24(4):7-10.

[5] 田坦. 声纳技术[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2000
TIAN Tan. Sonar Technology[M]. Harbin:Harbin Engineering University Press, 2000.

[6] 郑兆宁,向大威.水声信号被动检测与参数估计理论[M].北京:科学出版社,1981.

ZHENG Zhaoning, XIANG Dawei. Passive detection and parameter estimation theories of underwater acoustic signal[M]. Beijing:Science Press, 1981.

(上接第 151 页)

[4] 汤渭霖. 声呐目标回波的亮点模型[J].声学学报,1994, 3 (19):92-100.

TANG Weilin.Highlight model of echos from sonar targets[J].ACTA ACUSTICA, 1994, 3(19):92-100;

[5] 李秀坤. 水雷目标特征提取与识别研究[D]. 哈尔滨工程大学博士论文. 2000.58-66.

LI Xiu-kun.Extraction and recognition of mine character-

istics[D]. Doctor's Dissertation of Harbin Engineering University. 2000.58-66.

[6] 王学军. 水下目标回声识别的特征提取和分类研究 [D]. 上海交通大学博士论文, 1998.20-23.

WANG Xuejun. Research on extraction and recognition of the underwater targets[D]. Doctor's Dissertation of Shanghai Jiao tong University, 1998.20-23.