

水下目标空间源数特征提取与识别方法

赵水兵¹, 严 冰¹, 樊书宏², 刘晓东¹

(1. 西安精密机械研究所, 西安 710075; 2. 西北工业大学, 西安 710072)

摘要: 针对水下目标识别正横阵位问题, 并进一步扩大目标识别的阵位范围。给出了目标识别的阵列形式, 用水平线列阵进行目标亮点水平方位的源数估计。提取并找出了能反映水下潜艇目标空间特征的特征量。提出了基于信噪比监督的空间源数识别方法, 给出了相关矩阵的空间平滑的特征值, 还提出了基于信噪比和盖尔圆半径监督的目标特征的自动分类方法。对本文提出的方法进行了大量计算机仿真, 仿真结果表明, 该方法可在正横阵位有效识别目标。

关键词: 水下目标; 识别; 特征; 源数

中图法分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-03-0342-05

A method of space source number feature extraction and automatic recognition for underwater targets

ZHAO Shui-bing¹, YAN Bing¹, FAN Shu-hong², LIU Xiao-dong¹

(1. National Key Laboratory for Underwater Information Process & Control, Xi'an 710075;

2. Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Underwater target recognition is discussed under the condition of abeam bearing attacking, and the attacking angle on the bow is increased. According to the shape of array, space source numbers, which stand for space highlight numbers, can be estimated. Submarine space feature are found and extracted. A new method based on the space source number under certain SNR condition is presented for cross attack issue of underwater target recognition, and the automatic classification of target features on the basis of certain SNR and radius of Gael circle is studied. Simulations show that this method is valid under various conditions.

Key words: underwater target; recognition; feature; source number

1 引 言

基于分裂波束的目标方位走向的目标识别方法, 在正横方位阵位探测目标时, 不能很好地识别目标。同一般的点源目标回波声学干扰器不同, 真实目标是空间多亮点反射体, 正确地识别空间主要源数就可区分开真实目标和点源干扰器, 达到目标识别的目的。本文研究了在正横方位附近探测目标时的水下目标识别方法, 提出了基于空间信号源数的目标特征提取与识别方法, 解决正横方位目标识别

问题, 同时在非正横阵位识别也有很强的识别能力, 并给出了算法的仿真实验结果。

2 目标识别的阵列结构形式

由于真实目标回波亮点分布主要集中在空间的水平维上, 所以提取水平维的目标空间域特征需要水平线列阵即可。本文研究主要的阵列结构形式为均匀线列阵。

在探测系统发射窄带信号时, 目标的反射亮点回波是空间的 d 个远场窄带信号, 一般 d 为 2~6, 目标亮点反映到处理的阵列上相当于空间的多源, 从而通过源数估计可识别是否为真实的体目标。均匀线列阵 M 个相同阵元间隔为 Δd , 如图 1 所示, 阵元

收稿日期: 2007-06-10; 修回日期: 2007-08-05

作者简介: 赵水兵 (1979-), 男, 江苏人, 助理工程师, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 赵水兵, E-mail, zhaosb1979@163.com

无指向性。

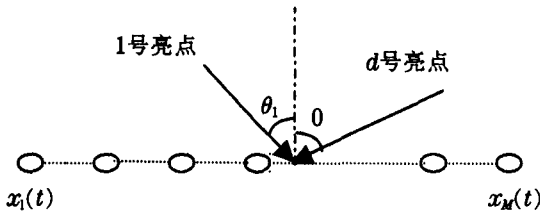


图1 均匀线阵列
Fig.1 Uniform linear array

在图1中,选择1号阵元为参考点入射平面波波长为 λ , θ_i 为入射波与阵列法线的夹角。第 k 个阵元接收到的第 i 个信号的时间延迟为:

$$\tau_k(\theta_i) = (k-1)\tau_0(\theta_i) = (k-1) \cdot \frac{\Delta d}{c} \cdot \sin\theta_i \quad (1)$$

其中: $\tau_0(\theta_i) = (\Delta d/c) \cdot \sin\theta_i$ 是第 i 个信号在相邻的两阵元之间的时间延迟; c 是水中声波的传播速度。在各个阵元为各向同性、增益为1的情况下,接收信号表达为:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^d \tilde{s}_i(t) \\ \sum_{i=1}^d \tilde{s}_i(t) e^{-j\frac{2\pi\Delta d}{\lambda} \sin\theta_i} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^d \tilde{s}_i(t) e^{-j\frac{2\pi\Delta d(M-1)}{\lambda} \sin\theta_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_M(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

3 空间信号源数特征提取

3.1 相关矩阵的空间域平滑处理

由于目标反射的亮点在空间上存在着相干性,所以接收信号的自相关矩阵会出现降秩,影响源数特征的提取。所以在特征提取前,应在空间域对自相关矩阵进行平滑处理。这里采用前后向空域平滑处理。阵列形状如图2所示。图中, M 为总的阵元个数, $r(i)$ 为参加前项平滑的子阵序列,每个子阵由 L 个阵元组成。 $R(i)$ 为参加后项平滑的子阵序列,每个子阵也由 L 个阵元组成。

第 k 个子阵前向平滑的自相关矩阵为:

$$\mathbf{R}_k^f = \mathbf{A}(\Theta) \mathbf{D}^{k-1} \tilde{\mathbf{R}}_s (\mathbf{D}^{k-1})^H \mathbf{A}^H(\Theta) + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{A}(\Theta) = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_d)]^T$,

$$\mathbf{a}(\theta_i) = [e^{-j\omega_0 \tau_{1,i}}, e^{-j\omega_0 \tau_{2,i}}, \dots, e^{-j\omega_0 \tau_{M,i}}]^T$$

$$\mathbf{D} = \text{diag}[e^{-j\frac{2\pi\Delta d}{\lambda} \sin\theta_1}, \dots, e^{-j\frac{2\pi\Delta d}{\lambda} \sin\theta_d}]$$

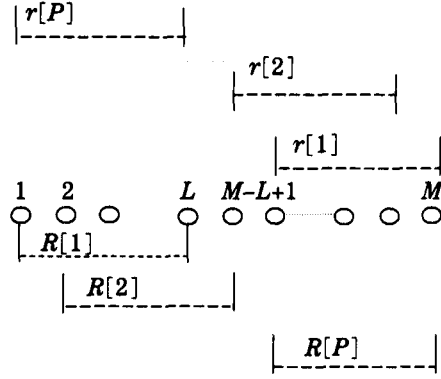


图2 前后向空域平滑处理子阵示意图
Fig.2 Sub-arrays for fore and after spatial smoothing

则前向平滑自相关矩阵为:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}^f &= \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \mathbf{R}_i^f = \mathbf{A}(\Theta) \bar{\mathbf{S}} \mathbf{A}^H(\Theta) + \sigma^2 \mathbf{I}, \\ \bar{\mathbf{S}} &= \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P \mathbf{D}^{k-1} \tilde{\mathbf{R}}_s (\mathbf{D}^{k-1})^H \end{aligned} \quad (4)$$

后向平滑的第 k 个子阵的自相关矩阵为:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_k^b &= \mathbf{A}(\Theta) \mathbf{D}^{k-1} \hat{\mathbf{R}}_s (\mathbf{D}^{k-1})^H \mathbf{A}^H(\Theta) + \sigma^2 \mathbf{I} \\ \hat{\mathbf{R}}_s &= E[\mathbf{D}^{1-M} \tilde{\mathbf{R}}_s (\mathbf{D}^{k-1})^H] \end{aligned} \quad (5)$$

后向平滑自相关矩阵为:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}^b &= \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \mathbf{R}_i^b = \mathbf{A}(\Theta) \bar{\mathbf{S}} \mathbf{A}^H(\Theta) + \sigma^2 \mathbf{I}, \\ \bar{\mathbf{S}} &= \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P \mathbf{D}^{k-1} \hat{\mathbf{R}}_s (\mathbf{D}^{k-1})^H \end{aligned} \quad (6)$$

前后向平滑自相关矩阵为:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}} &= \frac{1}{2} [\bar{\mathbf{S}} + \bar{\mathbf{S}}] = \mathbf{A}(\Theta) \tilde{\mathbf{S}} \mathbf{A}^H(\Theta) + \sigma^2 \mathbf{I}, \\ \tilde{\mathbf{S}} &= \frac{1}{2} [\bar{\mathbf{S}} + \bar{\mathbf{S}}] \end{aligned} \quad (7)$$

前后向空域平滑对 d 个相干亮点信号解相干,至少需要 $3d/2$ 个阵元。解相干能力较前两种方法更有效。

3.2 基于接收信号相关矩阵的目标特征提取

本文主要研究直接分析接收信号的相关矩阵并提取代表源数特征的盖氏圆盘的特征提取方法。基于接收信号相关矩阵的盖尔圆盘源数估计方法对源数估计主要利用阵列相关矩阵特征值大小进行估计,源数估计只要知道特征值分布即可。盖尔果斯林(Gerschgorin)圆盘定理,可估计各特征值位置。利用此原理,可估计空间源数。

设 $N \times N$ 维矩阵 $\mathbf{R}$, r_{ij} 为其元素, $r_j = \sum_{i=1, i \neq j}^N |r_{ij}|$, $(i=1,$

$2, \dots, N$), 则 O_i 圆盘为盖氏圆盘, $O_i: |Z-r_i| \leq r_i$, 利用酉变换分离盖氏圆盘, 目的是使噪声圆盘与信号圆盘分开, 信号圆盘有较大盖氏半径, 含 K 个特征值, 噪声圆盘有较小的盖氏半径, 含 $N-K$ 个特征值。从而从盖氏圆盘中确定源数。如有 $R=U\Sigma U^H$, 将取样协方差矩阵 $\hat{R}$ 分解为:

$$\hat{R} = \begin{bmatrix} \hat{R}_{N-1} & \hat{r} \\ \hat{r}^H & \hat{r}_{NN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$\hat{R}_{N-1}$ 是除去末行末列的 $(N-1) \times (N-1)$ 维子矩阵, 再对 $\hat{R}_{N-1}$ 进行分解得:

$$\hat{R}_{N-1} = \hat{U}_{N-1} \hat{\Sigma}_{N-1} \hat{U}_{N-1}^H \quad (9)$$

式中 $\hat{U}_{N-1}$ 是 $\hat{R}_{N-1}$ 的特征矢量构成的酉矩阵, $\hat{\Sigma}_{N-1}$ 是 $\hat{R}_{N-1}$ 的特征值按降值排列构成的对角阵, $\hat{\Sigma}_{N-1} = \text{diag}(\hat{\lambda}'_1, \hat{\lambda}'_2, \dots, \hat{\lambda}'_{N-1})$, 对于相关矩阵有 $(\hat{\lambda}'_{K+1} = \hat{\lambda}'_{K+2} = \dots = \hat{\lambda}'_{N-1} = \sigma_n^2)$ 。

用 $\hat{U}_{N-1}$ 构成一个酉交换矩阵 $T(TT^H=I)$, 变换后协方差矩阵 $\hat{R}_T$ 为:

$$\hat{R}_T = T^H \hat{R} T = \begin{bmatrix} \hat{\lambda}'_1 & & & & \rho_1 \\ & \hat{\lambda}'_2 & & & \rho_2 \\ & & \ddots & & \vdots \\ & & & \hat{\lambda}'_{N-1} & \rho_{N-1} \\ \rho^*_1 & \rho^*_2 & \dots & \rho^*_{N-1} & \hat{r}_{NN} \end{bmatrix} \quad (10)$$

这 $\rho_i = \hat{e}'^H \hat{r} = \hat{e}'^H A_{N-1} \hat{R}_S b_N^*$, $i=1, \dots, N-1$ 。

变换后的矩阵 R_T 的前 $N-1$ 个盖氏圆盘 $O_1, \dots, O_{N-1}$ 的盖氏半径为:

$$r_i = |\rho_i| = |\hat{e}'^H A_{N-1} \hat{R}_S b_N^*| = |\hat{e}'^H \hat{r}|, i=1, \dots, N-1 \quad (11)$$

由于噪声相对应的特征矢量 $\hat{e}'^H (i=K+1, \dots, N-1)$ 与信号方向矢量构成的矩阵 A_{N-1} 是正交的, 所以, 当 $i=K+1, \dots, N-1$ 时的 O_i , 其盖氏半径为零, 然而, 若 $\hat{R}_T$ 是满秩信号空间的特征矢量与 A_{N-1} 不正交, 其盖氏半径不为零, 这样上式 $\hat{R}_T$ 变成:

$$\hat{R}_T = \begin{bmatrix} \hat{\lambda}'_1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \rho_1 \\ \vdots & \ddots & & & & & \\ 0 & & \hat{\lambda}'_K & 0 & & 0 & \rho_K \\ 0 & & 0 & \hat{\lambda}'_{K+1} & & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & & \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \hat{\lambda}'_{N-1} & 0 \\ \rho^*_1 & \dots & \rho^*_K & 0 & \dots & 0 & \hat{r}_{NN} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$\hat{R}$ 矩阵经 U 变换后 $\hat{R}_T$ 特征值不变, 使其与噪声相对应的盖氏半径为零, 这样可用信号圆盘及噪声圆盘数决定源数。两类盖氏圆盘分开程度与取样数有关, 取样数 M 越大, 越能将盖氏圆盘分开。

3.3 盖氏圆盘估计

由上边算式可知, 盖氏半径大于与特征量在 $\hat{r}$ 上投影成正比, 由许瓦兹不等式:

$$r_i = |\rho_i| = |\hat{e}'^H \hat{r}| = |\hat{e}'^H A_{N-1} \hat{R}_S b_N^*| \leq |\hat{e}'^H A_{N-1}| \|\hat{R}_S b_N^*\| = k \|\hat{e}'^H A_{N-1}\| \quad (13)$$

这里 $k = \|\hat{R}_S b_N^*\|$, 与 k 无关, 所以盖氏半径只决定于 $\|\hat{e}'^H A_{N-1}\|$, 若 $\hat{e}'_i$ 是与噪声相应特征矢量, 则 r_i 变得很小, 它的大小与取样数 M 的增加是下降关系, 若 $M \rightarrow \infty$, 则 $r_i \rightarrow 0$ 。若是与信号相应的特征矢量, 则 r_i 比零大。因此在决定源数时采用下式为准则:

$$\text{GDE}(k) = r_k - \frac{D(M)}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} r_i > 0 \quad (14)$$

式中 k 在 $1 \sim N-2$ 范围内, $D(M)$ 是与取样数 M 有关的调整因子, 它在 1 与 0 之间选取, 当 $M \rightarrow \infty$ 时, $D(M) \rightarrow 0$ 。当 k 由小变大时, 使 $\text{GDE}(k_0)$ 第一次出现负值的, 则源数为 $k=k_0-1$ 。这种源数估计方法运算量小。

4 目标识别方法

在前述的特征得到后, 可快速的进行目标的分类和识别。这里给出信噪比监督的空间源数分类与识别方法。

相关矩阵经盖氏变换后得到的相关矩阵的特征值为 $|\lambda_k|, k=1, 2, \dots, N$, 则取:

$$A = \min \{|\lambda_k|\} \quad (15)$$

$$B = \max \{|\lambda_k|\} \quad (16)$$

定义样本距离 $D(x_i, y_i) = |x_i - y_i|$, A 类 (H_1) 重心

$$x_A = \frac{1}{M_A} \sum_i \lambda_i, \lambda_i \in A, M_A \text{ 为属于 } A \text{ 类的数目。} B \text{ 类 } (H_0)$$

$$\text{重心 } x_B = \frac{1}{M_B} \sum_i \lambda_i, \lambda_i \in B, M_B \text{ 为属于 } B \text{ 类的数目。}$$

如果 $D(\lambda_k, x_A) \geq D(\lambda_k, x_B)$, 则 $\lambda_k \in B$, 如果 $D(\lambda_k, x_A) < D(\lambda_k, x_B)$, 则 $\lambda_k \in A$ 。循环重复上述分类过程, 直到分出两类: $A = \{\lambda_A\}; B = \{\lambda_B\}$ 。计算 $F = \frac{x_A}{x_B}$ 。

如果 $F < SN$, 将 B 类中最大的归入 A 类; 如果 $F \geq SN$, 原分类不变。

计算 A 类中的特征值个数 N_A :

$$N_A=1, \Rightarrow H_0 \quad (17)$$

$$N_A \geq 2, \Rightarrow H_1 \quad (18)$$

计算 A 、 B 两类中的盖氏圆的平均半径 $\bar{r}_A$ 、 $\bar{r}_B$:

$$\bar{r}_A = \frac{1}{N_A} \sum_i r_i, r_i \in A; \quad \bar{r}_B = \frac{1}{N_B} \sum_j r_j \quad (19)$$

如果 $\bar{r}_A \geq \bar{r}_B$, 则确认式(17)、(18)的结果。如果 $\bar{r}_A < \bar{r}_B$, 则将 B 类中最大的归入 A 类, 回到式(17)、(18), 直到确认满足。

5 目标识别仿真结果

点源声诱饵识别: 仿真中声诱饵欺骗发射信号脉宽为 50ms, 信噪比为 6dB, 舷角 90° 。经不同情况的多次仿真后, 识别器处理的结果判为 H_0 情况, 即点源干扰器材。典型的回波的盖尔圆的分布如图 3 所示。在图 3 中横坐标为估计相关矩阵的特征值, 纵坐标表示了以相关矩阵的特征值为圆心, 以盖尔圆半径为半径的特征值的分布区域。采用本文给出的基于信噪比监督的空间源数识别方法可得到稳定的识别结果 H_0 。通过大量的不同阵位情况的实验, 该方法均可正确的识别点源诱饵。

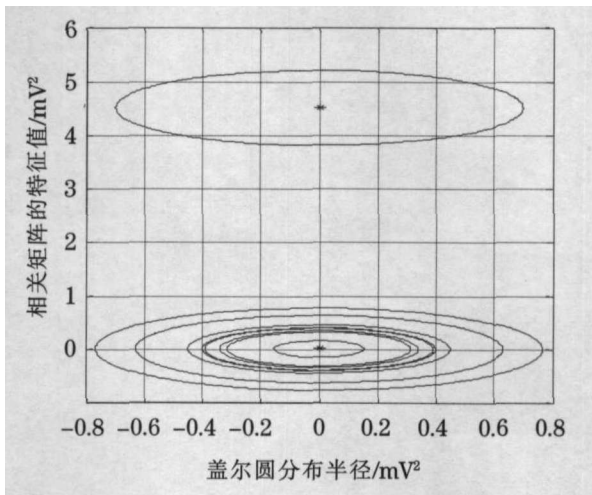


图 3 诱饵回波的特征量分布, 舷角 20°
Fig.3 Eigenvalues of bait echo at 20°

多亮点目标识别仿真: 仿真中声发射信号脉宽为 50ms, 信噪比为 6dB, 舷角分别为 90° 、 45° 、 20° 。经不同情况多次仿真, 识别器处理的结果判为 H_1 情况, 即真实目标。经本文提出的阵列信号处理后, 典型目标回波盖尔圆分布如图 4、图 5、图 6 所示。

由图中可见信号和噪声分离的较为清晰, 同时在信号区域内至少存在两个以上的源, 是亮点体目标的特征, 通过这里提出的分类方法可进一步识别

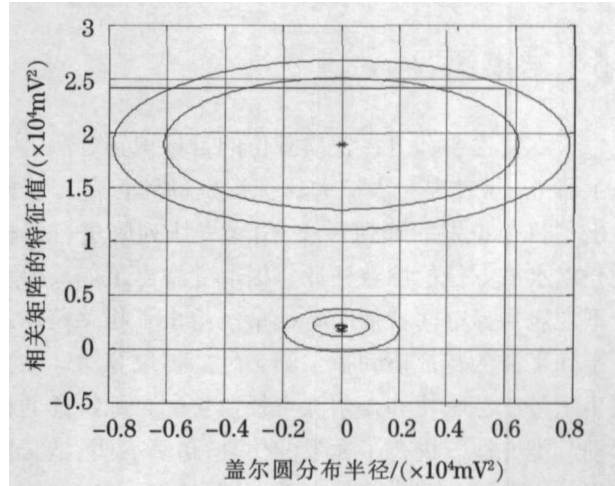


图 4 目标回波的特征量分布, 舷角 90°
Fig.4 Eigenvalues of target echo at 90°

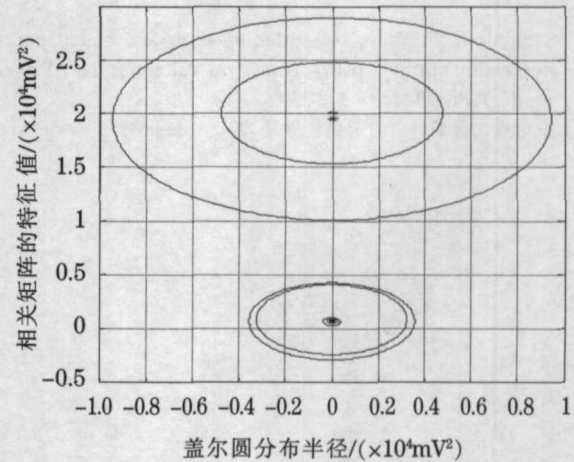


图 5 目标回波的特征量分布, 舷角 45°
Fig.5 Eigenvalues of target echo at 45°

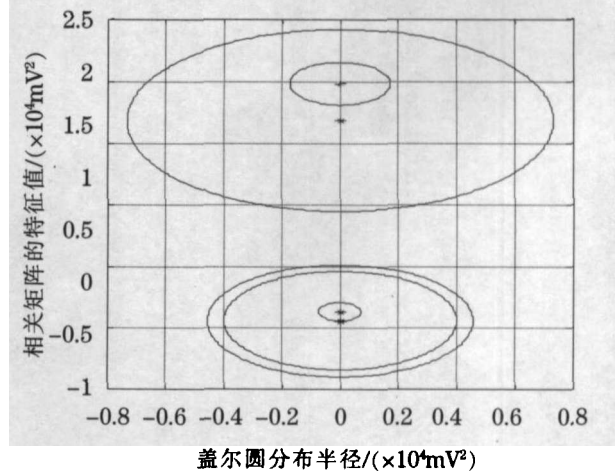


图 6 目标回波的特征量分布, 舷角 20°
Fig.6 Eigenvalues of target echo at 20°

为是真实的亮点目标 H_1 。大量的统计仿真实验表明此时可正确的识别目标。仿真表明, 此时采用这种目标识别方法可以在正横阵位(舷角 90°)到迎击或追击阵位(舷角 $\pm 20^\circ$)范围内, 信噪比大于 6dB 时,

可正确识别出点源诱饵和真实亮点目标。

5 结束语

本文主要针对在正横阵位的目标识别方法进行了研究,同时进一步扩大目标识别的阵位范围。给出了目标识别的阵列形式,用水平线列阵进行目标亮点水平方位的源数估计。提取并找出了能反映水下潜艇目标空间特征的特征量。给出了相关矩阵的空间平滑的特征值和盖尔圆半径的提取算法。并提出了基于信噪比和盖尔圆半径监督的目标特征的自动分类方法。进行了大量的仿真,仿真表明:本文提出的方法可在正横阵位有效识别目标。

参 考 文 献

- [1] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1986, 34(4): 276-280.
 - [2] 王永良, 陈辉. 空间谱估计理论与算法[M]. 清华大学出版社, 2004, 43-49.
 - [3] 王明洲. 水下目标识别技术研究[D]. 西北工业大学, 2003, 65-79.
 - [4] 李琼. 阵列信号处理中的校准技术[D]. 中国科学技术大学, 2003, 12-15.
 - [5] 郭丽华, 王大成. 水下目标特征提取方法研究[J]. 声学技术, 2005, 24(3): 148-151.
 - [6] 刘朝晖, 付战平, 王明洲. 基于方位走向法和互谱法的水中目标识别[J]. 兵工学报, 2006, 27(5): 932-936.
- WANG Yongliang, Chen Hui. Theory and algorithms of spatial spectrum estimation[M]. Publishing Company of Tsinghua University, 2004, 43-49.
- WANG Mingzhou. Research on target recognition technique of underwater target[D]. North-western Polytechnical University, 2003, 65-79.
- LI Qiong. Calibration technique of the array signal processing[D]. China Science and Technology University, 2003, 12-15.
- GUO Lihua, WANG Dacheng. Extraction of features of underwater target[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(3): 148-151.
- LIU Zhaohui, FU Zhanping, WANG Mingzhou. Underwater target identification based on the methods of bearing and cross-spectrum[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(5): 932-936.