

一种用于水声运动目标成像的空间散射模型

冯 杰, 刘德铸, 曾 锋

(中国电子科技集团公司第三研究所, 北京 100015)

摘要: 水声成像过程中为了分析所接收的运动目标回波、理解接收信号的形成机理, 提出了一种用于该情况的空间散射模型, 并利用此模型仿真了“T”型阵成像声呐接收的回波信号。对信号的分析说明了空间散射模型的正确性。以空间散射模型为基础, 利用傅里叶变换波束形成算法对不同条件下的球体目标进行了水声成像, 并分析了成像性能。性能分析说明了水声目标大小、距离等因素对成像的影响情况, 还特别强调了在运动情况下目标的成像情况。以上工作完成了对“T”型阵水声成像过程的模拟, 为成像过程回波信号研究和成像声呐研制提供了理论基础和仿真手段。

关键词: 空间散射模型; 水声成像; FFT 成像算法

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-04-0304-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.04.004

A spatial scattering model for underwater acoustic moving target imaging

FENG Jie, LIU De-zhu, ZENG Feng

(The Third Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: A spatial scattering model is proposed for analyzing the echo reflected by a moving target and comprehending the signal's production in underwater acoustic imaging, and the signals of the “T” pattern imaging sonar are simulated by the spatial scattering model. Analysis shows the validity of the spatial scattering model. Based on the spatial scattering model, sphere target in different conditions are imaged by FFT beam forming method and the performance is analyzed. Results show the effects of underwater acoustic target's size, distance, and especially target moving on imaging. Above-mentioned work finishes the simulation of the “T” pattern array's imaging, so the spatial scattering model is supplied as a theoretical tool and a simulation method for signal researching and imaging sonar developing.

Key words: spatial scattering model; underwater acoustic imaging; FFT beam forming method

0 引言

水声成像^[1]由于采用了较为直观的表达方式, 在水下目标的探测与识别中得到了广泛的应用。作为一种主动声呐, 当成像声呐在发射换能器发射声波进入水体之后, 接收换能器接收的则是由波束覆盖范围内目标各部位散射所形成的回波信号。该信号是各散射回波相互混叠形成的, 因此需要根据空间散射模型来对此物理过程进行建模与分析。

基于散射模型进行的分析有很多^[2-4], 但这些模型都作了较大的简化, 且当目标运动时也只是根据多普勒信息对信号进行了简单的频谱搬移^[2,3]。而当空间发射位置和接收位置不同时, 空间双程多普

勒效应对有限长信号散射的影响并不能够简化^[4]。因此本文提出了一种描述运动目标回波散射过程的空间散射模型。同时基于该模型仿真的回波信号, 本文利用傅里叶变换波束形成算法^[5]进行了球体水声目标的成像处理。相比于其它文献^[1-5], 本文进行的水体建模、信号处理以及目标成像过程更为具体, 从而为水声成像的应用分析提供了一种有效手段。

1 空间散射模型

1.1 基本公式

首先进行空间散射过程的推导。如图 1 所示, 考虑在 $t=t_0$ 时刻声波开始从发射换能器发出, 而匀速运动目标相对发射换能器的速度为 v_m , $t=t_1$ 时刻声波波前与目标相遇。同理 $t=t'_0$ 时刻发出的声波会在 $t=t'_1$ 时刻与目标相遇。由此可得到:

$$(c+v_m)(t_1-t_0)=r_m \quad (1)$$

收稿日期: 2013-05-22; 修回日期: 2013-08-17

作者简介: 冯杰(1972—), 男, 陕西延安人, 博士, 高级工程师, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 刘德铸, E-mail: liudezhu_2008@163.com

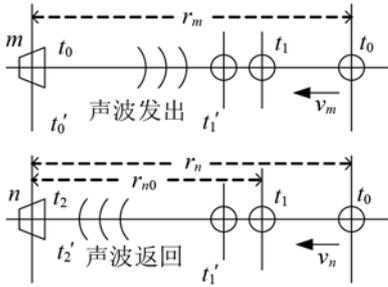


图1 双程多普勒空间散射过程
Fig.1 Space Doppler scattering of round-trip route

$$c(t'_1 - t'_0) + v_m(t'_1 - t_0) = r_m \quad (2)$$

于是有下两式成立：

$$t_1 = \frac{r_m}{c + v_m} + t_0 \quad (3)$$

$$t'_1 = \frac{r_m}{c + v_m} + t'_0 - \frac{v_m}{c + v_m}(t'_0 - t_0) \quad (4)$$

继续考虑声波由目标处返回到接收换能器的情况。匀速运动目标相对接收换能器的速度为 v_n ， $t = t_1$ 时刻声波波前从目标处反射，在 $t = t_2$ 时刻声波波前到达接收换能器的接收端。同理 $t = t'_1$ 时刻返回的声波会在 $t = t'_2$ 时刻被接收端接收。于是得到：

$$c(t_2 - t_1) = r_n - v_n(t_1 - t_0) = r_{n0} \quad (5)$$

$$c(t'_2 - t'_1) + v_n(t'_1 - t_1) = r_n - v_n(t_1 - t_0) = r_{n0} \quad (6)$$

进一步利用式(3)~(6)，得到：

$$t_2 = \frac{r_n}{c} - \frac{v_n}{c} \frac{r_m}{c + v_m} + t_1 = \frac{r_n}{c} - \frac{c - v_n}{c + v_m} \frac{r_m}{c} + t_0 \quad (7)$$

$$t'_2 = \frac{r_n}{c} - \frac{v_n}{c} \frac{r_m}{c + v_m} + t'_1 - \frac{v_n}{c}(t'_1 - t_1) = \frac{r_n}{c} + t'_0 - \frac{v_m + v_n}{c + v_m}(t'_0 - t_0) + \frac{c - v_n}{c + v_m} \frac{r_m}{c} \quad (8)$$

由式(3)、(4)、(7)、(8)得到含有多普勒信息的单程和双程声波信号压缩公式如下：

$$t'_1 - t_1 = (1 - \frac{v_m}{c + v_m})(t'_0 - t_0) \quad (9)$$

$$t'_2 - t_2 = (1 - \frac{v_n}{c})(t'_1 - t_1) = \frac{c - v_n}{c + v_m}(t'_0 - t_0) \quad (10)$$

同时还得到：

$$t'_2 = t'_0 + \frac{r_m - v_m(t'_0 - t_0)}{c + v_m} + \frac{r_n - v_n(t'_2 - t_0)}{c - v_n} \quad (11)$$

式(11)说明了在双程传播过程中任意时刻 t'_2 接收的信号，相对于该信号发射时刻 t'_0 以及整个发射波前 t_0 的关系，而这恰好与 Doisy Y^[4]对信号所作的描述是一致的。

1.2 散射建模

考虑如图2所示的“T”型阵空间模型的具体情况，假设以垂直发射线阵的几何中心为原点 O

建立左手坐标系。在此定义波束空间内存在有目标物体，它上面分布着尺寸远小于信号波长的微小体元，并假定水体介质各向同性。

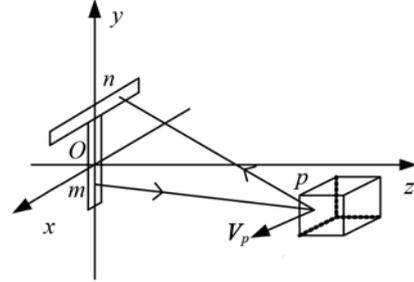


图2 “T”型阵的空间散射原理
Fig.2 The scattering geometry relationship of “T” pattern array

考虑在 $t_T = t_0$ 开始从阵元 m 发射信号 $S(t_T)$ 。当信号在传播时，以速度向量 V_p 移动的目标体元 p 会对该信号进行反射。如果 t_R 时刻水平接收线阵的接收阵元 n 接收到该体元 p 所散射的该目标回波信号，于是有下式成立：

$$t_R = t_T + \frac{\|p - m - r_{pm}\|}{c} + \frac{\|p - n - r_{pn}\|}{c} \quad (12)$$

式中： p 、 m 、 n 分别表示体元 p 、发射接收阵元 m 和 n 相对 O 的位置向量； r_{pm} 、 r_{pn} 分别表示此次发射和接收过程中散射点相对发射接收阵元 m 和 n 产生的位移； c 为声波在水中的声速。由式(11)可得到 t_T 与 t_R 之间的关系：

$$t_R = t_T + \frac{r_{mp} - (V_p \cdot u_{mp})(t_T - t_0)}{c + V_p \cdot u_{mp}} + \frac{r_{np} - (V_p \cdot u_{np})(t_R - t_0)}{c - V_p \cdot u_{np}} \quad (13)$$

式中： r_{mp} 和 r_{np} 分别表示信号收发过程中散射体元 p 相对于发射接收阵元 m 和 n 的距离； u_{mp} 和 u_{np} 分别表示从发射接收阵元 m 和 n 到散射体元 p 的单位向量。

以式(13)为基础，若 $S_m(t - t_0)$ 是“T”型阵阵元 m 发射的信号，则单个散射体元 p 对阵元 n 所接收信号 $S_n(t - t_0)$ 的贡献为：

$$S_n(t - t_0) = S_m \left[\frac{c + V_p \cdot u_{mp}}{c - V_p \cdot u_{np}} (t - t_0) - \frac{r_{mp}}{c} - \frac{c + V_p \cdot u_{mp}}{c - V_p \cdot u_{np}} \frac{r_{np}}{c} \right] \quad (14)$$

此时的收发阵元 m 和 n 相对目标散射体元 p 运动引起的多普勒信息就隐含在该式中。如果接收阵列含有 N 个接收阵元，则每一个所接收的回波 $R_n(\Delta t)$ 就是发射阵列中所有的 M 个发射阵元所发射的、且波束照射在运动目标上的所有 P 个散射体元散射回波的总和，于是根据式(14)的关系可知：

$$R_n(\Delta t) = \sum_{m=1}^M A_m e^{j\phi_m} \sum_{p=1}^P A_p e^{j\phi_p} \cdot S_m \left[\frac{c + V_p \cdot u_{mp}}{c - V_p \cdot u_{np}} \Delta t - \frac{r_{mp}}{c} - \frac{c + V_p \cdot u_{mp}}{c - V_p \cdot u_{np}} \frac{r_{np}}{c} \right] \quad (15)$$

此时 $\Delta t = t - t_0$, A_m 与 ϕ_m 是发射阵元 m 在发射信号时引入的初始幅度和相位, A_p 与 ϕ_p 则是运动目标散射体元 p 对阵元接收信号引入的附加幅度和相位。

通过设计不同形状和体积的水下运动目标, 再利用式(15), 就可以仿真成像声呐回波并作进一步的处理。具体利用空间散射模型进行回波仿真的实现示意过程如图 3 所示。

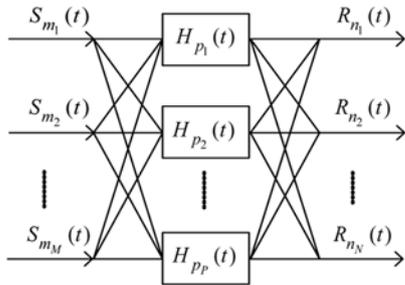


图 3 利用空间散射模型实现回波仿真。
Fig.3 The realization of space scattering model

2 水声目标与回波仿真

2.1 水声目标

利用空间散射模型对水声运动目标进行建模过程, 要将目标表面看作是散射体元所构成的集合, 散射体元的排列反映了目标的体积和形状, 每个散射体元具有不同的反射系数, 目标的回波就等于空间一定范围内的散射体元回波的相干求和。

以球体运动目标为例进行分析。如果球体中心的坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 球体的半径为 r , 则球体在图 2 所示“T”型阵左手坐标系中的曲面方程为

$$(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 = r^2 \tag{16}$$

由于发射信号受到了遮挡, 并不是所有球体上的散射体元都对接收回波产生贡献。如图 4 中阵元 m 所发射的声波只会照射到球体的部分散射体元上。而同样由于遮挡, 也只有部分散射体元会对阵元 n 所接收的回波产生贡献。因此, 球体上对回波产生贡献的散射体元被限制在阵元 m 和 n 收发波束共同照射到的曲面区域上。具体的情况要考虑阵元 m 、阵元 n 以及球体三者之间相互的空间位置关系。

作为一个水声运动目标的球体, 它的整体运动会反映到它上面每一个散射体元的运动上。即式(15)中不仅要考虑目标上的各散射体元的幅度 A_p 和相位 ϕ_p , 还必须考虑到各散射体元的运动速度 \mathbf{v}_p 。通常 A_p 近似高斯分布; 由于没有特殊相位趋向, ϕ_p 近似均匀分布。球体的整体运动情况已知, 各散射体元的运动速度 \mathbf{v}_p 经过计算后可明确设定。

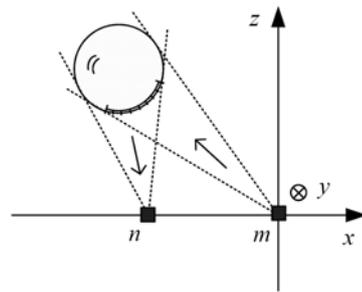


图 4 水声目标对成像声呐回波的贡献
Fig.4 The contribution of target for signal

2.2 回波仿真

基于上述的空间散射模型, 当明确了 (1) 收发阵元与目标位置; (2) 发射信号特征; (3) 目标形状、速度及距离等参数后, 就可以仿真出成像声呐各接收阵元接收到的目标回波信号。图 5(a)给出的是“T”型阵成像声呐发射阵元发出的原始发射信号, 图 5(b)给出了经过半径为 0.6 m 的球体目标散射的多个接收阵元所获得的回波。

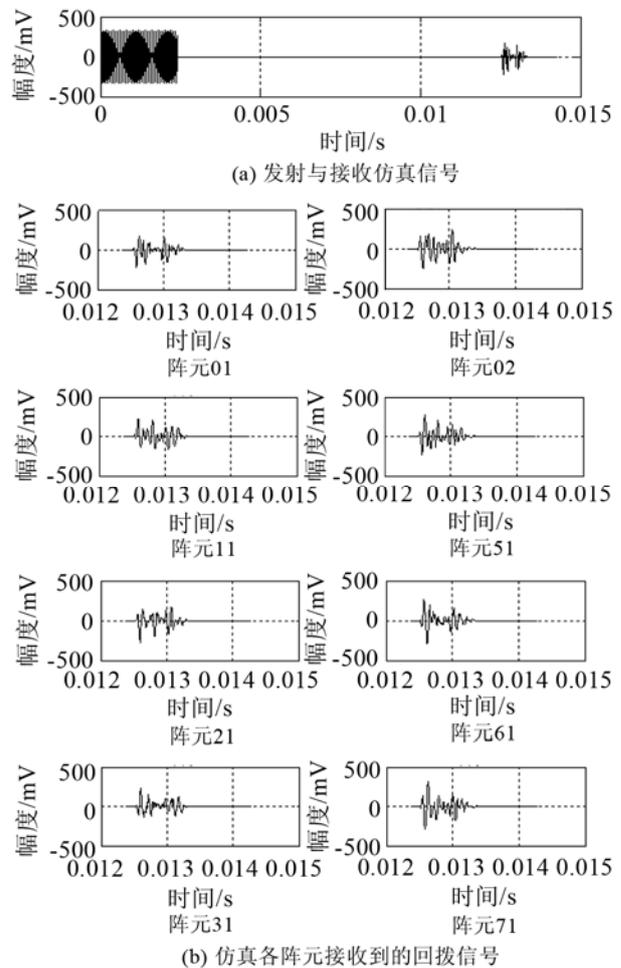


图 5 发射与接收仿真信号及仿真各阵元接收到的回波信号
Fig.5 The simulated signals for underwater acoustic imaging

在仿真中，“T”型阵的发射线阵(共61个阵元)的阵元间距为2.0 mm，而接收线阵(共80个阵元)的阵元间距同样为2.0 mm。发射的窄带CW脉冲信号频率300 kHz，脉宽120 μs。以发射阵的第31号阵元作为坐标原点，发射束控沿着z轴方向。带通采样的采样率145 kHz。此时目标球心相对坐标原点的速度为3 m·s⁻¹，并考虑球体各体元相对球心的旋转速度均为0。由图5看出，经过球体目标散射后成像声呐所接收到的信号具有明显的散射叠加效果，进一步观察，由于收发阵元空间位置的不同，各接收阵元所获取信号的时延、多普勒以及散射叠加情况均存在着一定的差异。

3 成像算法与性能分析

3.1 “T”型阵成像算法

如图6所示，一个“T”型阵的成像要首先利用垂直方向的线阵发射信号。当该波束照射到成像区域内的目标时，目标将会反射回波，该“T”型阵再用水平方向的接收线阵接收该回波信号。

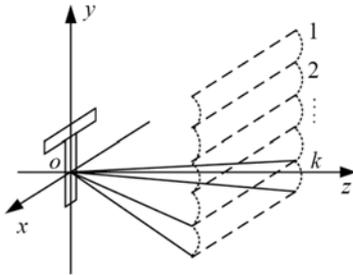


图6 “T”型阵与三维成像
Fig.6 The “T” pattern array and 3-D imaging

垂直线阵只有在垂直方向上具有指向性，而水平线阵只具有水平方向上的指向性。于是我们对发射线阵进行垂直束控，并进一步通过接收线阵的水平束控，可以形成一张水平二维切片成像。经过k次的发射控制和相应的接收处理，就可以获得k张二维切片图像。将一组二维图像进行三维合成，就会得到成像声呐要求的三维图像。此处的三维合成不属于空间散射模型与仿真信号处理的说明范围，相关情况参见文献[6]。

本文基于空间散射模型和仿真信号，利用FFT波束形成算法^[5]来获取二维切片图像。具体的FFT波束形成算法先要在时域进行相干累积，然后进行空域的波束形成。具体步骤如下：

(1) 对每个接收阵元在 $[t_r, t_{r+1}]$ 同步采集的回波数据在发射窄带信号频点 f_0 处进行离散傅里叶变换，得到相干累积信号 $X_n(t)$ 为

$$X_n(t) = \sum_{r=r_1}^{r_2} x_r(t) e^{i2\pi f_0 t} \quad (17)$$

(2) 对所有接收阵元的同步相干累积信号 $X_n(t)$ 进行空域的 N_F 点FFT变换，得到该次采集回波数据相应聚焦距离处的空间能量分布：

$$B_r(t) = \sum_{n=1}^{N_F} X_n(t) e^{i2\pi f_0 d_n/c} \quad (18)$$

(3) $B_r(t)$ 就是在聚焦距离 d_n 确定情况下的空间回波能量。重复进行以上两步骤的计算，就会得到一张二维切片图像。

3.2 性能分析

基于已确定的空间散射模型、“T”型阵仿真回波和FFT波束形成算法，此处的成像分析主要考察球体目标的各种情况对二维切片成像的影响程度。

图7为“T”型阵球体目标散射的二维切片成像效果。除了球体速度外，仿真中考虑的条件与图5相同。可以看到球体目标的清晰轮廓。其中球体目标的球心离坐标原点距离为10 m，球体半径为0.6 m，坐标原点与球心的连线相对于z轴的夹角为20°，球体目标相对于坐标原点的整体速度为0，球体上的散射体元数量设置为500。在信号处理过程中“T”型阵的每一个接收阵元在发射频点处采用了8点离散傅里叶变换，而空域则采用了180点的聚焦FFT变换方法进行处理。

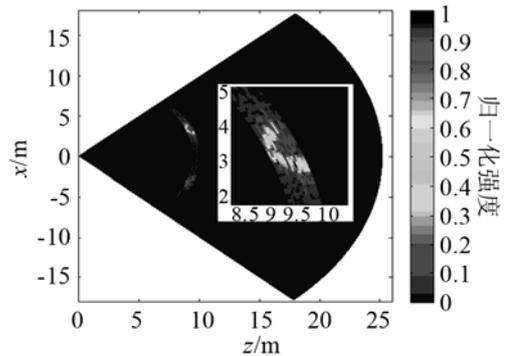


图7 典型球体目标的图像
Fig.7 The typical slice image of sphere target

图8是球体半径为0.3 m时的成像效果，其它条件与图7相同。通过比较可以看出：由于“T”型阵发射信号脉冲宽度和目标大小不匹配，加之FFT波束形成算法固有分辨率处理能力的限制，当目标的体积较小时，通过成像已不能区分目标的形状。

当球体目标球心离坐标原点距离为20 m时的“T”型阵二维切片成像效果如图9所示，其它条件与图7相同。对比可见：同样体积的球体目标，在较远处由于受到处理算法分辨率的限制而使得成像较为模糊，识别较为困难。

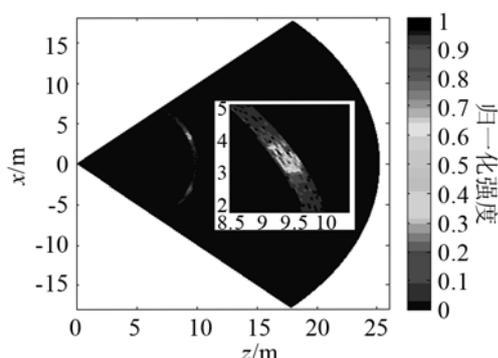


图 8 体积较小球体目标的图像

Fig.8 The slice image when the radius of the sphere is 0.3m

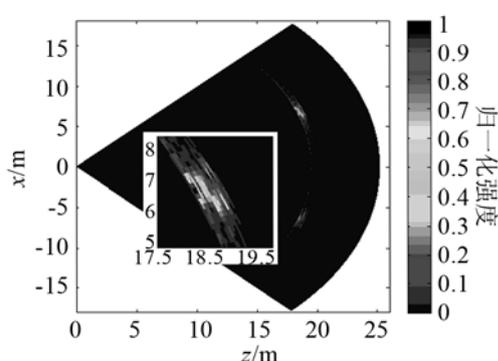


图 9 距离较远球体目标的图像

Fig.9 The slice image when the distance of the sphere is 15m

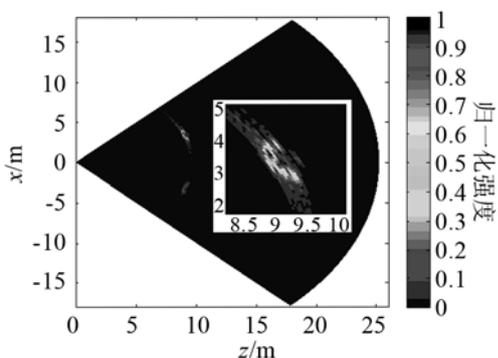


图 10 速度较快球体目标的图像

Fig.10 The slice image when the velocity of the sphere is 3m/s

当球体目标球心相对于坐标原点速度为 3 m/s 时的“T”型阵二维切片成像效果如图 10 所示,其它条件与图 7 相同。对比可见:速度较快的球体目标由于具有较大的多普勒频偏,各阵元接收信号的相干性产生变化。这也使“T”型阵对于该球体目

标的成像质量存在着一定的差异,但从二维切片图中可以看到球体目标轮廓,不影响基本的观察。

4 结 论

随着海洋开发利用程度的不断加深,水声成像越来越为人们所关注。本文的空间散射模型可对水中目标的表面声学特性进行模拟,再利用 FFT 波束形成算法,可对水声球体运动目标进行成像仿真。以上工作可使研发人员更明晰水声成像的整体过程,将极大地方便水声成像的理论研究和设备研制。

由于采用数字化的方式描述水声散射的时空连续积分过程,且成像目标的形状及速度等情况将更为复杂,本文的工作还需要深入进行。基于构造复杂的表面,空间散射模型可实现空间不同位置的发射和接收阵元的信号级建模,因此还可推广到更为复杂的水声成像情况中。

致谢:哈尔滨工程大学水声工程学院张友文教授就本文的一些问题给出了建议,电视电声研究所张学磊和王志峰工程师对本文提出了修改意见,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Sutton J L. Underwater acoustic imaging[J]. Proceedings of the IEEE, 1979, 67(4): 554-566.
- [2] 葛凤翔, 惠俊英, 蔡平. 界面混响信号的仿真研究[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(12): 1922-1927.
GE Fengxiang, HUI Junying, CAI Ping, et al. Research on the interface reverberation simulation[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2001, 23(12): 1922-1927.
- [3] Murino V, Trucco A. Three-dimensional image generation and processing in underwater acoustic vision[J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(12): 1903-1948.
- [4] Doisy Y. Theoretical accuracy of Doppler navigation sonars and acoustic Doppler current profilers[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(2): 430-441.
- [5] Murino V, Trucco A. Underwater 3D imaging by FFT dynamic focusing beamforming[C]// IEEE International Conference Proceedings (ICIP-94), Image Processing, 1994, 1(13): 890-894.
- [6] LI Chen, LI Ruyuan, YUAN Yujin. 3-D target recognition based on sliced images[C]// International Conference on Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT). 2010, 450-453.