

# 一种单波束前视声呐成像方法

张铁栋 万 磊 马 悦

(水下智能机器人技术国防科技重点实验室, 哈尔滨, 150001)

**摘要** 提出了一种针对单波束前视声呐特点的改进成像方法: 通过采用波束内插的方法, 解决了由于声呐角度维回波数据过少所导致生成图像画质低的问题; 通过坐标转换, 将声呐数据转化成按图像处理要求的图像格式, 并通过物体点畸变成因分析, 给出了简易运动补偿公式。通过试验验证了该方法是一种有效的单波束前视声呐成像方法。

**关键词** 前视声呐; 波束内插; 图像校正

目前, 水下机器人在海洋开发中扮演着越来越重要的角色, 而海洋环境的特殊性决定了水下机器人需要采用许多有别于陆上机器人的技术, 其中之一就是必须配备各种水声设备, 其中图像声呐作为水下机器人的主要传感设备, 担负着感知环境信息的重要任务, 通过对该传感器所成声图像的分析, 水下机器人可获得前方障碍物的方位、距离、形状等信息, 从而引导水下机器人的前进方向。

目前国际上可以用水下机器人上的前视声呐主要分三大类: 单波束机械扫描声呐、多波束预成电子扫描声呐、三维成像声呐以及侧扫声呐。单波束机械扫描声呐由于体积小、结构简单、价格便宜、成像质量高, 因而近几年在水下机器人系统中得到了广泛的应用。然而由于单波束机械扫描声呐是通过机械旋转单波束基阵从而形成全方位或固定扇面内的扫描探测的, 因此依据使用目的经常需要解决下面两个问题: (1) 如何依据每次接收到的固定扇区内的回波数据生成高质量的水声图像; (2) 如何解决由于水下机器人受到海流的影响发生航迹偏差, 而引起声呐成像出现畸变问题。本文研究工作主要根据上述两个问题展开, 通过对采集数据进行波束内插、坐标转换和图像校正解决上述问题, 最后通过大量的试验, 验证了所提出的是一种适用于水下机器人系统的稳定声成像方法。

## 1 单波束前视声呐成像特性

单波束前视声呐属于扇扫声呐, 与多波束声呐成像不同, 单波束前视声呐只形成一个波束, 一般利用基阵的自然方向性, 即在  $\alpha = 0^\circ$  的方向上形成极值进行定向, 因此在一次收发过程中只能观察一个波束所覆盖的波束空间, 若需要探测一个固定区域, 则需要用机械的方法来转动波束, 使其逐步搜索并覆盖整个区域, 转动的次数以步进角度决定。

由于每次只能观察一个波束指向空间, 因此每次只能接受到该指向上的采样数据, 采样数据的大小, 反映了回波的强弱, 在图像上, 则体现在像素的高低。通过将各个指向上的采样数据进行合成, 则可获得该扫描区域的全景图像。而采样数据间的时间间隔代表了径向距离分辨率, 各个指向间的间隔 (即步进角度), 则代表了角度分辨率; 因此, 采样数据越多, 步进角度越小, 则合成的图像分辨率越高, 图像细节越清晰, 依据所生成图像的定位精度与识别的准确性也就越高<sup>[1]</sup>。

然而, 采样数据的增多, 步进角度变小则使得整个区域的扫描时间增长, 不能满足实际的任务需要, 因此为追求较快的扫描率, 一般在采样数目较少, 步进角度较大模式下进行工作。

## 2 波束内插

由于声呐角度维的回波信息太少, 在扫描宽度内形成的波束数量有限, 通常为几十个, 如果仅依据有限的采样数据生成图像, 则整幅图像水平分辨率非常低, 图像“马赛克”现象非常严重。考虑到声呐系统中相邻多个波束间有一定的覆盖宽度, 因此当目标方位对准某一波束时, 相邻波束仍有一定的输出。在这种情况下, 通过相邻波束的输出幅度就可以内插出中间多个波束的输出值, 从而使图像变得柔和、清晰, 使目标分辨率和定位精度都得到较大的提高。因此无论是线阵还是圆阵, 其主瓣附近的指向性均可近似为二次形状<sup>[2]</sup>, 所以在内插算法上选择更逼真地反映阵指向性的二次内插算法。

结合单波束声呐的成像速度, 采用拉格朗日二次插值法<sup>[3]</sup>, 表达式为:

$$P_n(x) = \sum_{k=0}^{n-1} A_k(x) \cdot y_k \quad (1)$$

其中,  $A_k(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{n-1} \frac{x - x_j}{x_k - x_j}$ ;  $n$  为插值所需已知函数点数, 对抛物插值  $n=3$ ;  $y_k$  为已知函数值;  $A_k$  是所用函数权值。

由 (1) 式可得两点间内插四点的八点内插公式如下:

$$\begin{cases} P\left(x_{\frac{4}{5}}\right) = (18y_{-1} + 9y_0 - 2y_1)/25 \\ P\left(x_{\frac{3}{5}}\right) = (12y_{-1} + 16y_0 - 3y_1)/25 \\ P\left(x_{\frac{2}{5}}\right) = (7y_{-1} + 21y_0 - 3y_1)/25 \\ P\left(x_{\frac{1}{5}}\right) = (3y_{-1} + 24y_0 - 2y_1)/25 \\ P\left(x_{\frac{1}{5}}\right) = (-2y_{-1} + 24y_0 + 3y_1)/25 \\ P\left(x_{\frac{2}{5}}\right) = (-3y_{-1} + 21y_0 + 7y_1)/25 \\ P\left(x_{\frac{3}{5}}\right) = (-3y_{-1} + 16y_0 + 12y_1)/25 \\ P\left(x_{\frac{4}{5}}\right) = (-2y_{-1} + 9y_0 + 18y_1)/25 \end{cases} \quad (2)$$

为避免内插数值小于 0 或者超出回波的最大强度值  $r_{\max}$ , 做如下规定:

$$\begin{cases} P(x_i) = 0 & P(x_i) < 0 \\ P(x_i) = P(x_i) & 0 \leq P(x_i) \leq r_{\max} \\ P(x_i) = r_{\max} & P(x_i) > r_{\max} \end{cases}$$

### 3 坐标转换

合成的声呐图像主要用于后续的图像处理, 而图像处理算法都是针对笛卡尔坐标系下存储的像素值进行处理的, 而声呐的采样数据是以极坐标形式进行的, 因此需要将极坐标系下的像素值转化到笛卡尔坐标系下<sup>[4]</sup>。如图 1 所示,  $X$ 、 $Y$  轴以像素作为刻度, 单位间距取为距离分辨率数值, 点 A、B 和点 C、D 分别是两个波束中的采样点, 即像素点。根据坐标轴转化算法, 则笛卡尔坐标系下的坐标  $(x, y)$  应为:

$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta \\ y &= r \cos \theta \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $r$  是半径;  $\theta$  为当前时刻扫描方位角。

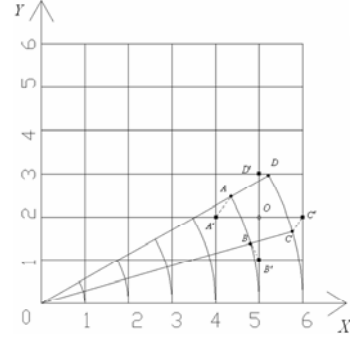


图1 极坐标与笛卡儿坐标像素转换示意图

由于像素数为整数, 则经过四舍五入取整后, A、B、C、D四点分别对应A'、B'、C'、D', 而点O则没有像素点进行对应, 因此经过转化后的图像中, 会存在漏点, 从而形成蝶形花纹。如图2所示, 这对于图像处理来说是难以接受的<sup>[5]</sup>。

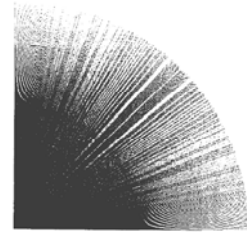


图2 蝶形图样

为避免该种情况出现, 采用零阶内插法来实现像素点之间的转换。设A、B、C、D四点处的像素值分别是 $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$ 、 $P_D$ , 距O点的距离分别为 $d_A$ 、 $d_B$ 、 $d_C$ 、 $d_D$ , 则O点处的像素值取为 $P_o = P_i$ , 其中:

$$d_i = \min[d_A, d_B, d_C, d_D] \quad (4)$$

根据 (4) 式, 通过遍历笛卡尔坐标系中每一个像素点, 则可以确定笛卡尔坐标系中每一个像素点的像素值。若 A、B、C、D 四点所围成区域中包含多个像素点, 则也都按 (4) 式确定各自像素值。经由 (4) 式换算, 图2变为图3, 成像质量得到大幅提升。



图3 内插后图样

## 4 图像校正

### 4.1 图像畸变分析

水下机器人载体由于受到水下海流的影响, 航迹会出现偏差, 从而造成声呐的基阵方向发生改变, 依据此时的声呐数据生成的图像则会出现成像畸变情况, 需要进行校正。为分析问题方便, 建立大地坐标系  $OXYZ$  和运动坐标系  $OX'Y'Z'$ , 如图 4 所示, 在载体静止时, 两坐标系坐标轴重合, 声呐基阵位于  $Y$  轴, 法线沿  $X$  轴方向, 对于物体点  $M(\rho, \alpha, \beta)$ ,  $\rho$  为距离,  $\alpha$  为水平方位角,  $\beta$  为倾角, 其他参数符号的选取参见文献[6]。

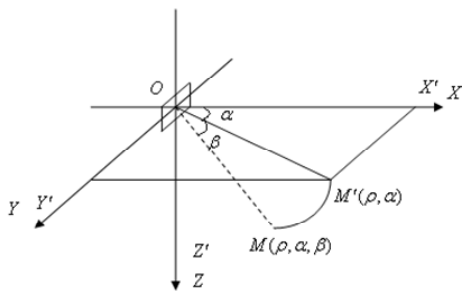


图 4 大地坐标系与运动坐标系示意图

设声波在水下的平均传播速度  $V_2=1500$  m/s, 声呐由发送声波到收到点  $M$  反射声波的时间为  $t_1$ , 则有:

$$\rho = V_2 t_1 / 2$$

由于前视声呐是二维图像声呐, 在垂直方向上没有分辨率, 因此仅能给出  $M$  点在水平面上的位置信息, 而不能给出  $M$  点在垂直方向上的位置信息。根据声波传播原理,  $M$  点在水平面位置信息与同一声波波面上的对应点  $M'$  是一致的<sup>[7-9]</sup>, 即以极坐标点  $M'(\rho, \alpha)$  来表示, 即  $M$  点对应在水平面的坐标应为:

$$\begin{cases} x = \rho \cdot \cos \alpha \\ y = \rho \cdot \sin \alpha \end{cases}$$

由此可见, 物体点畸变现象的产生, 正是由于  $\rho$ 、 $\alpha$  两个参数变化造成的。

### 4.2 校正公式

水下机器人在水下运动时具有六个自由度, 分别是沿着  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的平移运动和绕着  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的旋转运动, 但由于水下机器人在水下运动时遵循平面运动假设, 因此可以认为上述运动是相互独立的。

首先考虑平移运动, 就目前的研究来看, 水下机器人最大航速  $V_{\max} \leq 4$  m/s, 水下机器人最大位移

$S$  与探测距离  $l$  比值为:

$$\frac{S}{2l} = \frac{V_{\max}}{V_2} = \frac{4}{1500}$$

$$\text{即: } \frac{S}{l} = \frac{8}{1500} \approx 0.005$$

由上式可见, 相对于探测距离来说, 平移运动所引起的偏差可以忽略不计, 考虑到声呐换能器收发时间很短, 因此可以假设水下机器人先平移运动再发接声呐数据。基于上面假设, 则每次发射和接收过程都只存在旋转运动影响, 即  $\rho$  在每个收发过程中是保持不变的, 而只有  $\alpha$  是变化的。

下面考虑转动运动的影响。由于水下机器人多为回转体, 因此横摇运动可以忽略不计。对于纵倾运动来说, 声呐基阵位置没有发生改变, 只是基阵的俯仰角度发生了变化, 因此, 只是回波数据的强度有所变化, 而不会影响距离值  $\rho$  和  $\alpha$ , 此情况可以不予考虑。剩下只有偏航的影响, 在有航偏角时基阵坐标系发生偏转, 即仅对  $(X, Y)$  平面起作用, 而与  $Z$  无关。但在运动坐标系下, 点  $M'$  位置由  $(\rho, \alpha)$  变到  $(\rho', \alpha')$ , 如图 5 所示。令  $\theta_y$  表示航偏角, 由几何关系, 可推导出两个位置之间关系为:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha' + \theta_y \\ \rho = \rho' \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) 即为将受偏转影响的图像像素修正到大地坐标系中所需要进行的运算。

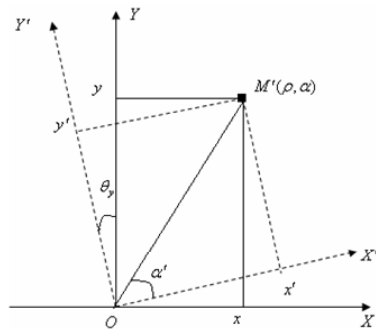


图 5 大地坐标系与运动坐标系转换关系示意图

## 5 试验结果

为了验证算法的可行性, 采用 Tritech International Ltd 公司提供的单波束二维声呐, 声呐的载体选为本试验室自主研发的水下机器人, 在湖里做了大量的实验。该声呐的具体参数如下<sup>[10]</sup>:

工作频率: 650~950 kHz

垂直波束宽：40°(650 kHz); 35°(800 kHz)

30°(950 kHz)

水平波束宽：3.0°(650 kHz); 2.5°(800 kHz)

2.0°(950 kHz)

扫描角度：0°~180°

载体平台内安装两块板载计算机，相互之间通过网络进行数据交换。其中一块作为主控计算机，连有惯性导航系统、推力系统以及深度计等传感器，另一块与前视声呐通过串口连接进行数据处理，并通过与主控计算机连接以获得载体姿态信息。整个试验系统的框图见图 6。

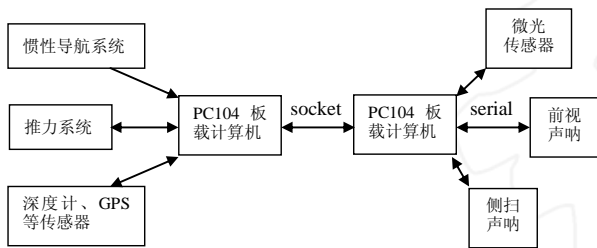
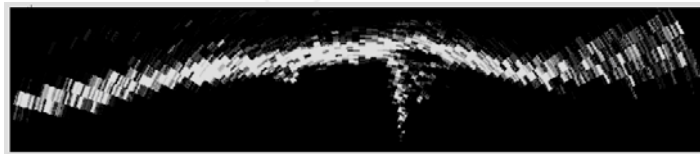


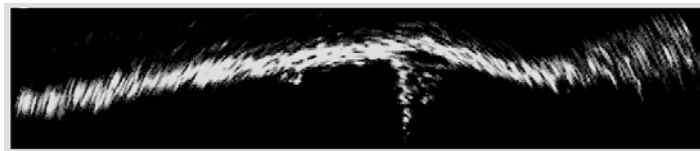
图 6 试验系统结构

由于篇幅所限，本文只给出部分处理结果，并对图像进行了适当裁减，以便缩小显示区域。如图 7、图 8。图 7 是声呐对湖边码头壁岸的探测所获得图像。图 7(a)是根据声呐采集数据直接生成图像，由图中可见，由于角度维的回波数据偏少，图像中出现明显的马赛克现象，不利于进行图像后处理。图 7(b)是采用本文提出的插值坐标转换公式处理后的声图像，由图中可见图像纹理细腻，图像清晰，图像画质得到极大改善。

图 8 是当水下机器人旋转时，声呐对湖边码头壁岸的探测所获得的图像。由图 8(a)可看出，由于水下机器人的运动导致壁岸发生了畸变，由直线形状畸变成了曲线。利用本文提出的方法，从惯性导航系统中获得当前水下机器人的当前姿态信息，根据公式(5)进行校正，结果如图 8(b)所示，壁岸又恢复到正确的形状。

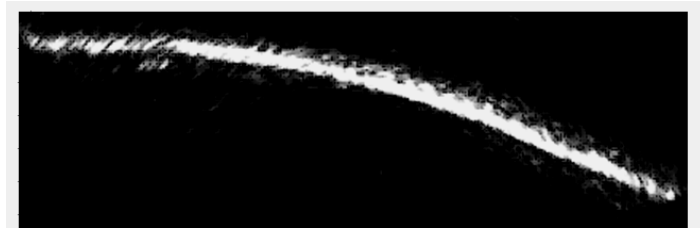


(a)未进行插值与坐标变换的声图像

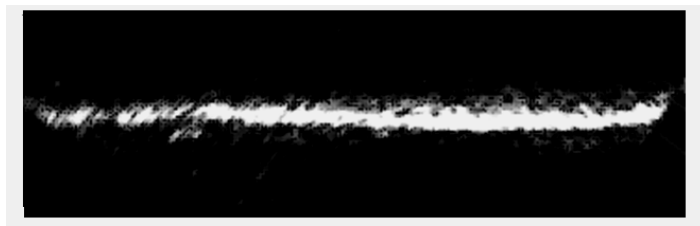


(b)插值与坐标变换后的声图像

图 7 插值与坐标变换前后的对比图



(a)畸变声呐图像



(b)校正后的声呐图像

图 8 校正前后的图像对比

## 6 结论

通过试验分析证明,采用本文提出的结合波束内插、坐标转换和图像校正的单波束声呐成像方法,可以生成高质量的声呐图像,并具有良好的稳定性,对于水下机器人系统中的单波束声呐成像来说,是一种行之有效的方法。

### 参考文献:

- [1]张铁栋. 前视声呐后置图像处理算法研究[D]. 哈尔滨工程大学,2004:10-15.
- [2] 关浩.海底小目标的成像与检测研究[D].哈尔滨工程大学,1997:52-58.
- [3]丁凯. 水下目标声探测与跟踪技术的研究[D]. 哈尔滨工程大学,2006:20-24.

- [4]徐鹏飞. 水下目标声探测技术的研究[D]. 哈尔滨工程大学,2005:20-26.
- [5] Andrea Trucco. Image Projection and Composition With a Front-Scan Sonar System: Methods and Experimental Results[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2003. 28( 4):687-698.
- [6] 施生达. 潜艇操纵性[M]. 北京:国防工业出版社,1995:10-11
- [7]刘文帅.适用于水下小目标探测的图像变换及稳定技术[J]. 电视技术,1995,40(7):11-15.
- [8]雷万明.基于回波数据的高分辨力机载 SAR 运动补偿[J]. 电子与信息学报,2004,126(12):1908-1914.
- [9]李燕平.一种基于回波数据的运动补偿方法[J]. 数据采集与处理,2007,22(1):1-7.
- [10] Tritech International Ltd. Sonar Log Data & Decode Manual.

(上接第 13 页)

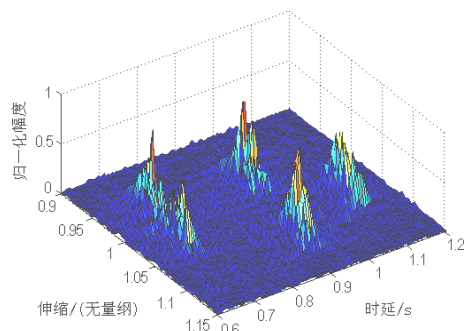


图6 目标时延-时间伸缩分布图

## 5 结束语

常用的 Wigner-Ville 分布的信号检测在多目标的情况下交叉项较难消除,严重影响对低速运动目标的检测。本文根据广义边缘时频分布能增强时频分析的分辨率并减少其交叉项干扰的研究结果,提出基于广义边缘 CWD-Hough 变换的处理方法来检测低速运动目标并对其进行成像。CWD-Hough 变换在 Wigner-Ville 分布的基础上作积分平滑,自相关项集中,交叉项很小,能很好地对多目标进行分辨。从计算机仿真的结果可以看出这种提取信号在时频域分布特性参数的时延-时间伸缩声成像方法

是有效的,它能增强目标回波信号的时频分布,得到更好的时延-时间伸缩像,从而更利于检测出低速运动目标并精确估计出运动参数。

### 参考文献:

- [1] 张静远,金裕红. 宽带目标回波模型的物理解释及小波变换表示[J]. 海军工程大学学报,2005,17(4):1-4.
- [2] Weiss L G, Young R K, Sibul L H. Wideband processing of acoustic signals using wavelet transforms,Part I [J]. JASA 1994, 96(2):850-856.
- [3] Werness S, Carrara W, et al. Moving target imaging algorithm for SAR data[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1990.26(1):57-66.
- [4] 颜礼彬,石敏,张静远,等. 一种改进的多脉冲宽带相关成像算法[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2006, 30(6):1019-1022.
- [5] Cohen L. Time-frequency Analysis[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall ,1995.
- [6] Xia X G, Owech ko Y, Soffer B H,et al. On generalized marginal time-frequency distribution[J]. IEEE Trans. on signal processing, 1996,44(11):2882-2886.