

一种基于分段 DPC 和拟合的合成孔径声呐运动补偿方法

江泽林* 刘 维 李保利 刘纪元 张春华

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘 要: 为了解决大测绘带条件下合成孔径声呐的运动误差在斜距向上的空变性会影响运动补偿效果的问题, 该文提出了一种基于分段的偏移相位中心(Displaced Phase Center, DPC)算法和拟合的运动误差估计及补偿方法。该方法首先对原始回波数据在斜距向上进行分段, 利用 DPC 算法估计各个子段的斜距运动误差, 其后利用最小二乘方法对声呐运动的横荡误差和升沉误差进行估计, 最后对不同斜距上的原始回波数据做逐点非均匀运动补偿处理。仿真和湖试数据处理结果证明了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径声呐; 运动补偿; 分段偏移相位中心方法; 拟合

中图分类号: U666.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)05-1185-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01096

A Motion Compensation Method for Synthetic Aperture Sonar Based on Segment Displaced Phases Center Algorithm and Errors Fitting

Jiang Ze-lin Liu Wei Li Bao-li Liu Ji-yuan Zhang Chun-hua

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: To solve the problem that the Synthetic Aperture Sonar (SAS) motion errors' distinct variety in large slant range may reduce the imaging resolution, this paper proposes an improved motion error fitting and compensation method based on segment Displaced Phase Center (DPC) algorithm and motion errors fitting. Firstly the raw data are segmented in slant range and each segment's motion error is estimated using the DPC algorithm. Then the sway and heave are estimated using the Least-Square (LS) estimation method. Finally, the raw data are compensated point by point in slant range with the estimated sway and heave. The proposed algorithm is applied to the simulated data and lake-trial dataset, and the result confirms that the proposed method improves the SAS imaging resolution.

Key words: Synthetic Aperture Sonar (SAS); Motion compensation; Segment Displaced Phase Center (DPC); Fitting

1 引言

合成孔径声呐(Synthetic Aperture Sonar, SAS)利用小孔径基阵在方位向(沿轨方向)的移动合成虚拟大孔径, 通过对不同位置的回波进行相干处理, 获得高分辨率的成像^[1,2]。在合成孔径声呐成像过程中, 运动补偿是提高成像精度的重要手段。其方法大致分为 3 类: 第 1 类是利用姿态传感器获得的声呐姿态数据, 第 2 类是利用原始回波数据, 第 3 类是自聚焦方法^[3]。偏移相位中心(DPC)是一种广泛应用的基于原始回波数据的运动补偿方法, 其基本原理是, 对于多子阵合成孔径声呐系统, 在相邻两帧回波数据存在重叠阵元的前提下, 利用数据的空间相关性估计声呐基阵的运动误差^[4]。

然而运动误差对不同斜距上的回波数据会产生不同的相位偏差, 即具有斜距向空变性^[5,6]。这种空变性会导致回波数据相关性下降, 从而降低 DPC 方法的补偿效果。文献[6]提出了对原始数据进行分段, 再对各子段应用 DPC 算法估计误差并补偿的改进方法。然而一方面, 各个子段的运动误差仍然具有斜距向空变性, 只是通过控制子段长度将空变性减弱; 另一方面, 补偿结果会在相邻子段的衔接上产生接缝, 影响图像的成像质量。

基于以上背景, 本文提出了一种基于分段 DPC 方法和拟合的运动补偿方法。方法首先将全测绘带数据划分为若干段落, 对各个子段分别应用 DPC 算法, 从而获得一定数量的误差估计样本。之后利用运动误差与斜距向的空间变化关系, 使用最小二乘估计算法拟合声呐的横荡误差和升沉误差, 最后使用这些误差估计值对回波数据在斜距上做逐点的运

2012-08-28 收到, 2013-01-18 改回

*通信作者: 江泽林 jiangzelin1985@126.com

动补偿。本文最后对仿真数据和湖试数据进行了处理,处理结果验证了提出方法的有效性。

2 理论分析

2.1 合成孔径声呐回波模型分析

合成孔径声呐的平动运动误差有横荡(sway)、升沉(heave)、纵荡(surge)3类,如图1所示。其中纵荡误差的影响较小,本文仅研究横荡误差和升沉误差对相位误差的影响。

在斜距-方位运动坐标系中,设某时刻声呐的理想位置位于 $(0,u)$ 处,如图2所示。发射信号为 $p(t)$,照射区域目标强度为 $ff(r,y)$, r 为斜距,回波信号为

$$ee(t,u) = \iint \frac{ff(r,y)p(t-t_1)}{(4\pi)^2(r^2+(u-y)^2)} dr dy \quad (1)$$

其中

$$t_1 = 2\sqrt{r^2+(u-y)^2}/c \quad (2)$$

在横荡误差和升沉误差共同引起斜距误差 ΔR 的影响下,设实际位置位于 $(\Delta R,u)$ 处。此时回波信号为

$$\tilde{ee}(t,u) = \iint \frac{ff(r,y)p(t-t_2)}{(4\pi)^2((r+\Delta R)^2+(u-y)^2)} dr dy \quad (3)$$

其中

$$t_2 = 2\sqrt{(r+\Delta R)^2+(u-y)^2}/c \quad (4)$$

考虑到 $\Delta R \ll r$,有

$$\tilde{ee}(t,u) = ee(t-\Delta t,u) \quad (5)$$

其中

$$\Delta t = t_2 - t_1 \approx \frac{2}{c} \frac{\Delta R \cdot r}{\sqrt{r^2+(u-y)^2}} \quad (6)$$

在窄波束条件下,有 $u-y \ll r$,此时式(6)可进一步简化为

$$\Delta t \approx 2\Delta R/c \quad (7)$$

即

$$\tilde{ee}(t,u) = ee\left(t - \frac{2\Delta R}{c}, u\right) \quad (8)$$

式(8)显示了在窄波束条件下合成孔径声呐回

波信号与斜距误差的关系。下面分析斜距误差 ΔR 与横荡误差 Δx 及升沉误差 Δz 的关系。

如图3所示,设垂直纸面为声呐的前进方向。在理想航迹下某时刻声呐位于 A 处,引入横荡误差和升沉误差后的实际位置位于 A' 处。目标的距离向距离为 x , β 为点目标 P 对应的俯视角。

根据上述设定,则理想斜距 r 和实际斜距 r' 分别为

$$r = \sqrt{x^2+h^2} \quad (9)$$

$$r' = \sqrt{(x+\Delta x)^2+(h+\Delta z)^2} \quad (10)$$

对 r' 做变形并近似处理,得斜距误差为

$$\Delta R = r' - r \approx \Delta x \cdot \sin \beta + \Delta z \cdot \cos \beta \quad (11)$$

由斜距误差引起的相位误差为

$$\Delta \varphi = 2\pi \cdot f \frac{2\Delta R}{c} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \left(\frac{\Delta x \sqrt{r^2-h^2}}{r} + \frac{\Delta z \cdot h}{r} \right) \quad (12)$$

从式(12)可以看出,相位误差受到斜距的影响,目标斜距不同,由横荡误差和升沉误差引起的回波相位误差也不同,即表现为运动误差的斜距向空变性。

2.2 DPC 运动误差估计方法

DPC方法通过选择合适的平台运动速度,使相邻两帧回波数据的相位中心有部分重叠,通过对重叠相位中心的回波数据求相关,寻找相关函数的峰值位置,从而得到运动误差。如图4所示,对重叠相位中心得到的两组数据进行处理,则

$$\Delta R = N \cdot c/(2f_s) \quad (13)$$

式(13)中, ΔR 表示斜距向的运动误差, N 表示相关峰到相关序列中心的偏移量, $c/(2f_s)$ 为距离向采样间隔。

使用传统的DPC做运动补偿时,利用式(13)获得运动误差后,通过式(12)将其转变为相位误差,将相位误差直接补偿给原始回波数据同一帧的所有采样样本。即认为运动误差对同一帧斜距上所有点的相位影响是相同的。但实际上从式(12)可以看出,相位误差与斜距是相关的。

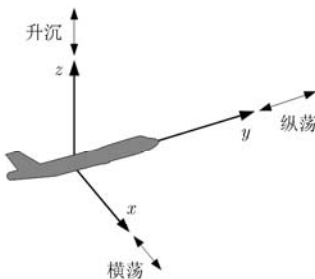


图1 合成孔径声呐平动运动误差示意图

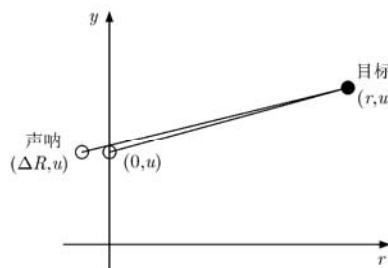


图2 合成孔径声呐运动误差示意图(斜距-方位坐标系)

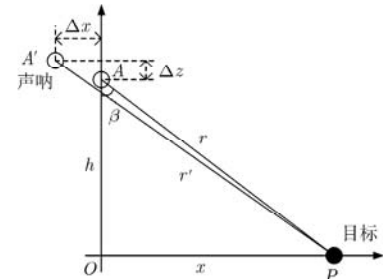


图3 横荡和升沉引起的运动误差端射示意图

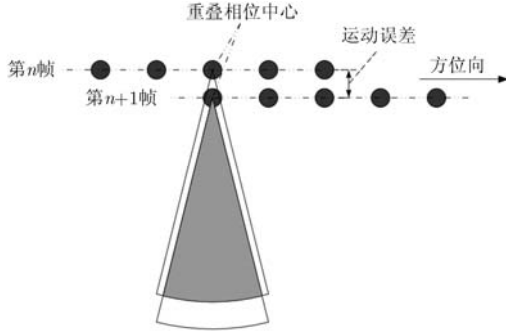


图4 DPC示意图

2.3 精确拟合横荡误差和升沉误差

由前述可知，DPC运动补偿方法未考虑相位误差在斜距上的空变性。综合式(11)和式(13)，考虑相位误差空变性因素的运动误差满足

$$N \cdot \frac{c}{2f_s} = \frac{\Delta x \cdot \sqrt{r^2 - h^2}}{r} + \frac{\Delta z \cdot h}{r} \quad (14)$$

为此在斜距上将原始数据划分为若干段落，并对各个子段分别应用DPC运动误差估计方法，获得误差引起的偏移量样本向量为

$$\mathbf{N} = [N_1, N_2, \dots, N_k] \quad (15)$$

其中 k 为在斜距上划分子段的数量。根据式(14)，应获得各个子段偏移量样本对应的斜距值。

设发射信号为线性调频信号，对点目标回波模型进行简化处理，声呐位于重叠相位中的前一个相位处，则 t_0 时延后的目标接收信号可表示为

$$ee_1(t) = \text{rect}\left(\frac{t-t_0}{T}\right) \exp\{j\pi K(t-t_0)^2\} \quad (16)$$

加入运动误差后，声呐位于重叠相位的后一个相位处，目标回波信号可表示为

$$ee_2(t) = \text{rect}\left(\frac{t-t_0+\Delta t}{T}\right) \exp\{j\pi K(t-t_0-\Delta t)^2\} \quad (17)$$

其中

$$\Delta t = 2\Delta R/c \quad (18)$$

对 $ee_1(t)$ 和 $ee_2(t)$ 求相关，在时间带宽积 $TBP \gg 1$ 的条件下，可得

$$\Re(t) \approx T \text{sinc}(KT(t-\Delta t)) \quad (19)$$

将时间变量变换为斜距变量，有

$$\Re(r) = T \text{sinc}\left(\frac{2KT}{c}(r-\Delta R)\right) \quad (20)$$

由式(20)可以看出，当 $r = \Delta R$ 时，相关函数得到峰值，这也即DPC算法的来源。

式(20)适用于点目标回波模型，当目标为水底底质较为均匀的一定范围区域时， ΔR 将不是一个恒定值，设其变化范围为 ΔR_1 至 ΔR_2 ，则

$$\begin{aligned} \Re(r) &\approx \int_{\Delta R_1}^{\Delta R_2} T \text{sinc}\left(\frac{2KT}{c}(r-\Delta R)\right) d\Delta R \\ &= -\frac{c \cdot \text{SinIntegral}\left(\frac{2KT(r-\Delta R)}{c}\right)}{2K} \Bigg|_{\Delta R_1}^{\Delta R_2} \end{aligned} \quad (21)$$

其中 $\text{SinIntegral}(\cdot)$ 函数是 $\text{sinc}(\cdot)$ 函数的积分。在 $r = \Delta R$ 处对式(21)进行泰勒展开

$$\begin{aligned} \Re(r) &= \left\{ -T(r-\Delta R) + \frac{2K^2T^3}{9c^2}(r-\Delta R)^3 \right. \\ &\quad \left. + O((r-\Delta R)^5) \right\} \Bigg|_{\Delta R_1}^{\Delta R_2} \end{aligned} \quad (22)$$

略去5次方及更高阶项，归并后得

$$\begin{aligned} \Re(r) &= -\frac{2K^2T^3}{3c^2} \left((\Delta R_2 - \Delta R_1)r^2 \right. \\ &\quad \left. - (\Delta R_2^2 - \Delta R_1^2)r + \frac{\Delta R_2^3 - \Delta R_1^3}{3} \right) \\ &\quad + (\Delta R_2 - \Delta R_1) \end{aligned} \quad (23)$$

式(23)表明在考虑空变性的情况下，数据相关峰位置大致出现在 $(\Delta R_1 + \Delta R_2)/2$ 处。在运动误差和子段长度较小的情况下， ΔR 与 r 可近似为正线性关系或负线性关系，为此选择各子段中心处的斜距值构成斜距上的距离向量为

$$\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_k] \quad (24)$$

这时即需根据样本向量 \mathbf{N} 和 \mathbf{r} 以及式(14)估计参数 Δx 和 Δz ，这是一个非线性估计。使用最小二乘估计对横荡误差和升沉误差进行估计^[7]。估计算子为

$$\min_{\Delta x, \Delta z} \sum_{i=1}^k \left(\frac{\Delta x \cdot \sqrt{r_i^2 - h^2}}{r_i} + \frac{\Delta z \cdot h}{r_i} - N_i \cdot \frac{c}{2f_s} \right)^2 \quad (25)$$

设

$$Q = \sum_{i=1}^k \left(\frac{\Delta x \cdot \sqrt{r_i^2 - h^2}}{r_i} + \frac{\Delta z \cdot h}{r_i} - N_i \cdot \frac{c}{2f_s} \right)^2 \quad (26)$$

估计等价于求解方程式(27)：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial \Delta x} &= \sum_{i=1}^k \left(\frac{2\sqrt{r_i^2 - h^2}}{r_i} \left(\frac{\Delta x \cdot \sqrt{r_i^2 - h^2}}{r_i} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{\Delta z \cdot h}{r_i} - N_i \cdot \frac{c}{2f_s} \right) \right) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \Delta z} &= \sum_{i=1}^k \left(\frac{2h}{r_i} \left(\frac{\Delta x \cdot \sqrt{r_i^2 - h^2}}{r_i} + \frac{\Delta z \cdot h}{r_i} - N_i \cdot \frac{c}{2f_s} \right) \right) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

即

$$\begin{bmatrix} k - \sum_{i=1}^k \frac{h^2}{r_i^2} & h \cdot \sum_{i=1}^k \frac{\sqrt{r_i^2 - h^2}}{r_i^2} \\ h \cdot \sum_{i=1}^k \frac{\sqrt{r_i^2 - h^2}}{r_i^2} & h^2 \cdot \sum_{i=1}^k \frac{1}{r_i^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} = \frac{c}{2f_s} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k \frac{N_i \sqrt{r_i^2 - h^2}}{r_i} \\ h \cdot \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{r_i} \end{bmatrix} \quad (28)$$

2.4 数据斜距向分段策略

在计算偏移量样本向量时，需要对原始数据在斜距上做分段处理。根据参数估计相关理论，样本数越多，估计误差越小。但样本数增加意味着原始数据分割子段的数量也要增加。根据文献[8]，横荡误差估计值的精度 σ_γ 决定了子段样本数量的 Cramer-Rao 下限。即

$$\sigma_\gamma = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda}{2} \frac{1}{\sqrt{BW}} \frac{1}{\sqrt{K}} \sqrt{\frac{1}{\rho} + \frac{1}{2\rho^2}} \quad (29)$$

式中 B 为信号带宽， K 为重叠阵元个数， ρ 为信噪比。 W 为互相关窗的持续时间，该值即反应了子段的采样点数。式(29)表明，如果各子段的采样点数减小，各子段估计得到的误差的精度也会降低。以上分析表明，为了提高误差估计的精度，式(25)要求子段数量尽可能多，而式(29)要求各个子段内的采样点数也尽可能多。

此外，从式(29)还可以看到，子段采样点数(由 W 表征)与信噪比 ρ 成反向相关，即在其他参数不变的情况下，给定一个固定的误差估计值精度，信噪比越高，则子段采样点数可以更小。

3 数据分析

3.1 仿真分析

对点阵目标进行仿真分析。点目标设置方式为：方位向三行点目标，相邻两行之间的距离为 9 m，距离向相邻两列点目标之间的距离为 5 m。为原始数据添加的横荡误差和升沉误差的实际值和估计值如图 5 所示。

点目标成像结果如图 6 所示。从成像结果可以

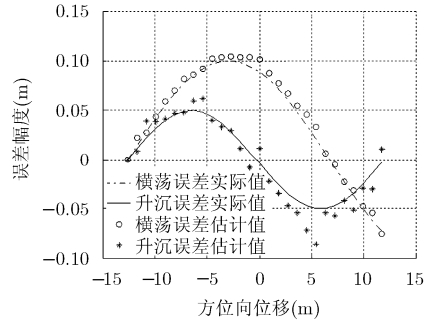


图 5 横荡误差和升沉误差的实际值和估计值

看出，本文提出的方法对传统的 DPC 运动补偿方法有较好的改善效果。

3.2 实际数据分析

2009 年项目组在千岛湖进行了合成孔径声呐湖试试验。千岛湖为人工湖，湖底有丰富的梯田、河流等地貌特征。对某航次的数据分别进行不做运动补偿、使用 DPC 算法运动补偿、使用本文提出方法运动补偿情形下的成像。该段数据对应的声呐拖体在航行时的距底深度如图 7 所示，这些数据由多普勒计程仪(DVL)测量获得。利用本文提出的方法估计得到的横荡误差和升沉误差分别如图 8 和图 9 所示。从图 8 的数据可以得到，横荡误差有一个固定的直流偏移量 0.021 m，即在该段航次内，声呐拖体可能受到了侧方横流的影响。从图 9 的数据可以得到，升沉误差的直流偏移量为 0.003 m，说明在垂直方向上受到水流的影响较小。升沉误差的取值范围在 -0.015 ~ +0.024 m 之间。

成像结果如图 10 所示。图中所示的 A 区域，在未补偿的成像结果中，只能推测为平整的田地，经过 DPC 补偿后，依稀可以看见 3 条类似田垄的地貌，经本文提出的方法补偿后，该地貌更为清晰。图中所示的 B 区域为亮条状地貌，在补偿前发生了严重的散焦，经 DPC 运动补偿后，散焦受到一定的抑制，经本文提出的方法补偿后，散焦被进一步抑制。图中所示的 C 区位于成像的远端，不做运动补偿的成像结果中发生了严重的散焦，经 DPC 补偿后，改进效果并不明显，经本文提出的方法补偿后，散焦抑制明显。

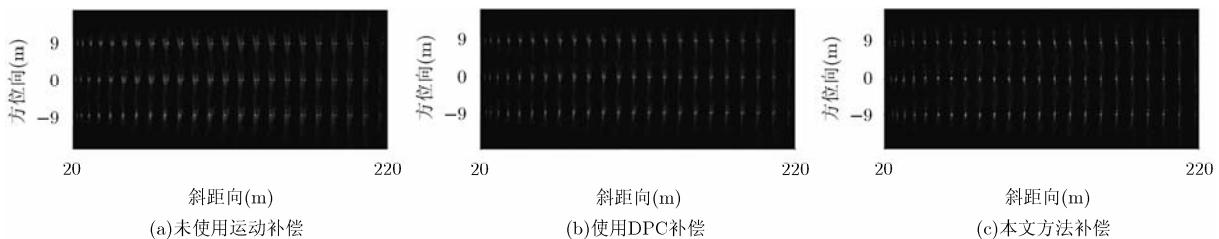


图 6 仿真点目标成像结果

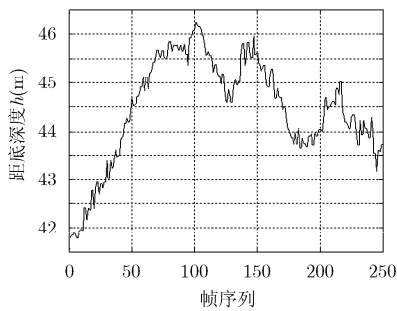


图7 声呐距底深度

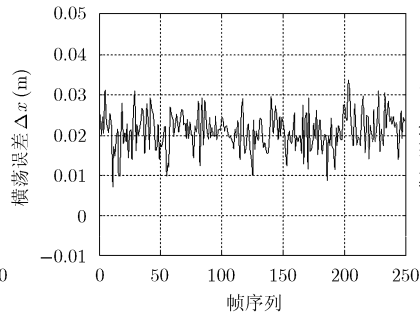


图8 横荡误差估计值

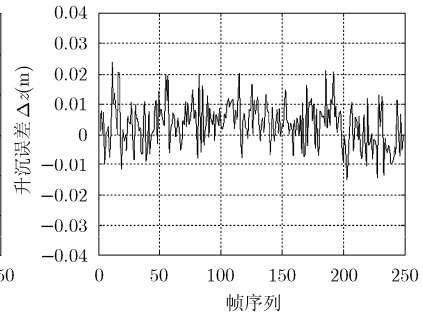


图9 升沉误差估计值



图10 地貌成像结果

4 结论

在合成孔径声呐的应用中，当测绘带较宽时，声呐运动误差在斜距上的空变性对相位误差的影响较大，进而降低了回波数据的相关性和误差估计的精度。本文首先分析了引入声呐平动误差中影响较大的横荡误差和升沉误差后的声呐回波模型，以及斜距上的空变性对相位误差的影响；其后介绍了DPC运动补偿方法；最后提出了基于分段DPC和拟合的合成孔径声呐运动补偿方法。该方法首先对原始回波数据在斜距上进行分段，并使用DPC算法估计各个子段的运动误差，其后利用最小二乘估计方法对声呐运动的横荡误差和升沉误差进行估计，最后使用估计结果对不同斜距上的原始回波数据做逐点的非均匀的运动补偿。对仿真数据和湖试数据的分析表明了该方法的有效性。

参考文献

- [1] Hayes M P and Gough P T. Synthetic aperture sonar: a review of current status[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2009, 34(3): 207-224.
- [2] Hansen R E and Callow H J. Challenges in seafloor imaging and mapping with synthetic aperture sonar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3677-3687.
- [3] Zhu San-wen, Yue Jian-ping, and Jiang Wei-tao. SAS autofocus based on phase gradient autofocus[C]. 4th International Workshop on Chaos-Fractal Theory and Its Applications (IWCFTA 2011), Hangzhou, China, Oct. 19-22, 2011: 298-301.
- [4] Schmaljohann H and Groen J. Motion estimation for synthetic aperture sonars[C]. 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2012), Nuremberg, Germany, April 23-26, 2012: 78-81.
- [5] Fornaro G. Trajectory deviations in airborne SAR: analysis and compensation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 997-1009.
- [6] Zhu S, Tang J, and Chen M. Segment DPCA motion compensation for SAS[C]. 2nd International Congress on Image and Signal Processing (CISP 09), Tianjin, China, Oct. 17-19, 2009: 1-5.
- [7] Schonhoff T and Giordano A A. Detection and Estimation Theory and Its Applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 423-432.
- [8] Bellettini A and Pinto M A. Theoretical accuracy of synthetic aperture sonar micro navigation using a displaced phase-center antenna[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, 27(4): 780-789.

江泽林：男，1985年生，博士生，研究方向为水声信号处理。

刘维：男，1980年生，副研究员，研究方向为水声信号处理。

李保利：男，1981年生，助理研究员，研究方向为水声信号处理。

刘纪元：男，1963年生，研究员，博士生导师，研究方向为水声信号处理、声呐成像等。

张春华：男，1962年生，研究员，博士生导师，研究方向为水声信号处理、声呐系统研究等。