

基于新型阵列结构的多波束 SAS 逐点成像算法研究

姚永红* 周 天 李海森 徐 剑

(哈尔滨工程大学水声技术重点实验室 哈尔滨 150001)

摘 要: 该文基于多波束测深和合成孔径技术原理, 提出了多波束合成孔径声呐(Synthetic Aperture Sonar, SAS)的实现方案, 设计了一种新型的多接收阵元阵列结构, 有针对性地推导了相关数学模型, 并仿真实现了逐点成像算法。计算机仿真结果表明: 相比于传统多波束测深声呐, 新方案的方位向分辨率有了明显的提高; 相比于常规合成孔径声呐, 新方案能够得到更多的目标信息, 且能改善成像效果。

关键词: 合成孔径声呐; 多波束; 测深; 逐点成像算法

中图分类号: U666.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)-04-0838-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00730

Research on the Dot-by-dot Imaging Algorithm for Multi-beam SAS Based on a New Array Configuration

Yao Yong-hong Zhou Tian Li Hai-sen Xu Jian

(Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The paper proposes a scheme for the realization of multi-beam Synthetic Aperture Sonar (SAS) based on the multi-beam bathymetry and aperture synthetic principle, designs a new multiple receiver array structure, deduces correlated math model, and simulates the dot-by-dot imaging algorithm according to the array structure. Computer simulation results show that: compared with multi-beam bathymetry sonar, the new scheme can remarkably improve the along-track resolution, and compared with conventional SAS, the new scheme can get more information of the target and enhance the imaging quality.

Key words: Synthetic Aperture Sonar (SAS); Multi-beam; Bathymetry; Dot-by-dot imaging algorithm

1 引言

多波束测深声呐是当代海洋开发、地形测绘、资源探寻的重要设备。其采用多波束形成技术在垂直于测量船航向的铅垂面内形成若干个波束, 并通过信号处理手段估计出每个波束方向的深度, 这些深度点随着测量船的航行组合成一条带状水深图。与侧扫声呐相比, 多波束声呐具有全覆盖、高效率等特点^[1-3]。然而, 由于多波束测深声呐的基阵一般都安装距海底较远的测量船上, 声呐投射到海底的波束脚印大, 导致其航向分辨率较侧扫声呐低。

合成孔径技术能够采用小物理孔径基阵, 依靠信号处理虚拟合成大孔径基阵来提高方位分辨率^[4,5]。传统的合成孔径声呐基于侧扫声呐的阵列结构, 能够有效地对空间目标进行高分辨探测成像, 但是其只能用斜距和方位向来表示目标位置信息,

不能得到目标的深度和距离信息^[6-9]。

针对上述情况, 本文将合成孔径技术与多波束测深技术相结合, 提出了多波束合成孔径声呐的实现方案, 设计了多接收阵元阵列结构, 给出了相应的数学模型, 并针对此新型阵列结构、仿真实现了逐点成像算法。仿真结果表明此声呐具有传统的合成孔径声呐所不具备的测深功能, 并且可以有效提高常规多波束测深声呐在方位向上的分辨性能。

2 多波束 SAS 阵列结构

图 1 给出了基于多波束测深和合成孔径技术原理的多波束 SAS 阵列结构示意图。其中, 接收基阵是一个垂直结构, 分为方位向接收阵和距离向接收阵。对比于常规多波束测深声呐的 Mills 交叉阵列结构, 多波束 SAS 阵列结构是在沿航迹方向的方位向上增加了一条接收阵, 此多元接收阵用于方位向采样间距过大时, 剔除图像中伪目标^[10]。

从该阵列结构可以看出, 发射换能器在航向上具有大物理孔径, 因此它能在垂直于航向的距离向上形成宽波束, 平行于航迹向上形成窄波束; 距离向接收阵在距离向有大孔径, 因此它在平行于航迹

2010-07-12 收到, 2010-11-11 改回

国家自然科学基金(41006057), 国家 863 计划项目(2007AA09Z124), 中国高等学校博士点基金(20070217022)和 underwater acoustic technology national key laboratory open research fund

*通信作者: 姚永红 yyh51130@163.com

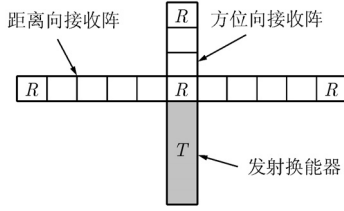


图 1 多波束 SAS 阵列结构

向能形成宽波束，距离向形成窄波束。多波束测深声呐就是根据发、收波束交叉部分的回波来估计不同波束方向的深度。

图 2 给出了本文提出的多波束 SAS 系统工作原理示意图。多波束 SAS 在每一个方位处向海底发射信号，回波信号经多波束形成处理后，声呐能接收到距离向上多个波束方向的回波，对每一个波束输出信号作合成孔径处理，便能得到方位向的高分辨率，该波束内目标的深度可以通过角度和斜距计算得到。本文以下部分将对相关数学模型进行推导，并仿真实现与此阵列结构对应的逐点成像算法。

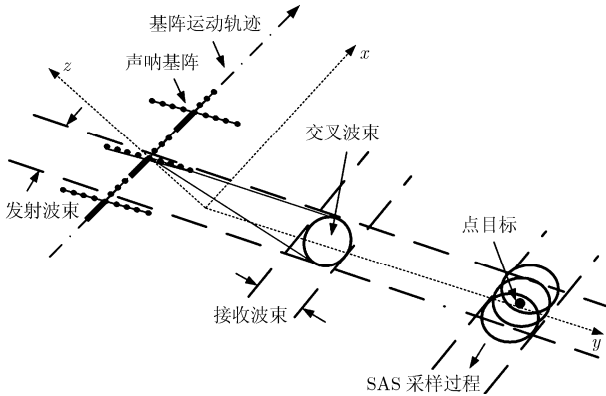


图 2 基于多波束的多接收阵元 SAS 系统工作原理示意图

3 多波束 SAS 逐点成像算法

3.1 逐点成像算法原理

逐点成像算法^[7,11,12]也称时域相干累加算法，其原理是计算虚拟合成孔径长度内的各个接收位置的时间延迟，并根据声呐基阵运动过程中信号传播路径的几何关系，通过延时补偿后叠加的方法对成像区域中每一个像素点进行聚焦成像，从而得到整个目标场景的图像。在使用相干叠加前需对回波信号进行距离向脉冲压缩，以得到距离向的高分辨率。该算法概念清晰，实现简单，成像结果精确，这也是本文选择此算法来说明文中所提新方案优越性的原因。

与传统 SAS 中的逐点成像算法相比，多波束 SAS 中的逐点成像算法增加了距离向多波束形成、

方位向解模糊两个步骤。下面对多波束 SAS 中的逐点成像算法进行具体描述。

3.2 多波束 SAS 逐点成像算法

(1)阵列模型 图 3 给出了基于多波束测深原理的多接收阵元 SAS 系统信号传播几何关系。其中发射阵元尺寸为 D_T ，接收阵元尺寸为 D ，方位向接收阵元个数为 N_x ，距离向接收阵元个数为 N_y 。声呐基阵航线距目标的高度为 h_p ，点目标位于坐标 $(x_p, y_p, 0)$ 处。假设基阵的速度为 v ，其中发射阵元沿航迹方向（方位向）以满足连续无重叠采样的脉冲重复频率 $f_r=2v/(N_x D)$ 发射线性调频信号：

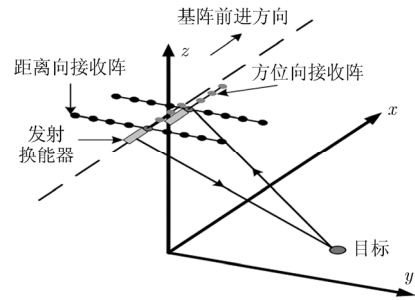


图 3 多波束 SAS 信号传播几何关系

$$s(t) = p_0(t) \exp(j\omega_0 t) \quad (1)$$

式中 $p_0(t) = \text{rect}(t/T) \exp(j\pi\mu t^2)$ 为信号的包络， T 为发射脉冲的长度， ω_0 为载波角频率， μ 为信号的线性调频斜率。

(2)方位向接收阵回波信号处理 设第 m 个脉冲发射时刻发射换能器位于坐标 $(0, x_m, h_p)$ 处，则方位向接收阵各阵元接收到的回波信号为

$$e_{mn}(t) = s(t - R(x_m - x_p, u_n; r_p)/c) \quad (2)$$

$$u_n = (D + D_T)/2 + (n - 1)D \quad (3)$$

$$r_p = \sqrt{y_p^2 + h_p^2} \quad (4)$$

$$R(x, u_n; r_p) = \left\{ \sqrt{x^2 + r_p^2} + (x + u_n)(v/c) + \left[\left[\sqrt{x^2 + r_p^2} + (x + u_n)(v/c) \right]^2 + [1 - (v/c)^2] (u_n^2 + 2u_n x) \right]^{1/2} \right\} / [1 - (v/c)^2] \quad (5)$$

式中 c 为声速， u_n 表示收发阵元间隔， n 为方位向接收阵元序号 $(n=1, 2, \dots, N_x)$ ， r_p 表示点目标的斜距， $R(x, u_n, r_p)$ 表示双程传播距离。

对各回波信号进行距离向脉冲压缩，其过程如下：

首先，对每个回波数据进行距离向傅里叶变换，即

$$e_{mn}(\omega) = \text{FFT}[e_{mn}(t)] \quad (6)$$

然后, 进行距离向脉冲压缩, 即

$$Ee_{mn}(\omega) = e_{mn}(\omega) \cdot S^*(\omega) \quad (7)$$

其中 $S^*(\omega)$ 为发射信号频谱的共轭。

最后, 得到脉冲压缩后的时域信号

$$Ee_{mn}(t) = \text{IFFT}(Ee_{mn}(\omega)) \quad (8)$$

成像区域任何一点 (x_i, r_i) 的成像可用下式表示

$$I(i) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_x} Ee_{mn}(R(x_m - x_i, u_n; r_i)/c) \quad (9)$$

其中 r_i 为斜距, M 为合成孔径长度内所发射脉冲数。

注意到, 这部分的信号处理就是常规的多子阵合成孔径处理逐点成像, 从成像结果得到的目标信息只有方位和斜距。由于方位向采样满足连续无重叠采样, 且采样间隔是 $D/2$, 故此部分成像结果不会出现方位模糊, 即图像中不会出现伪目标。

(3) 距离向接收阵回波信号处理 从多波束 SAS 阵列结构可以看到, 距离向接收阵的中心阵元也是方位向接收阵的第 1 个接收阵元。该阵元接收到的回波信号为

$$ee_0(t) = s\left(t - \frac{R(x_m - x_p, (D + D_T)/2; r_p)}{c}\right) \quad (10)$$

现将点目标置于极坐标系中, 来说明距离向接收阵信号处理。如图 4 所示, 在该方位采样处, 点目标相对于距离向接收阵位于 $P(r_0, \theta_0)$ 处。距离向接收阵各阵元的回波信号可表示为

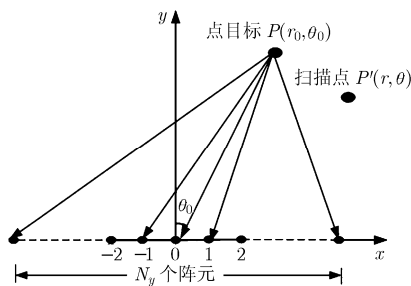


图4 距离向接收阵接收目标回波信号几何模型

$$w_i(t) = ee_0\left(t - \frac{r_{i0} - r_0}{c}\right) \quad (11)$$

$$r_{i0} = \begin{cases} r_0, & i=0 \\ \sqrt{r_0^2 + l_i^2 + 2l_i r_0 \sin(\theta_0)}, & i < 0 \\ \sqrt{r_0^2 + l_i^2 - 2l_i r_0 \sin(\theta_0)}, & i > 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中 i 为接收阵元序号, r_{i0} 为目标到距离向接收阵元 i 的斜距, l_i 为阵元 i 到阵中心的距离。

对距离向接收基阵各阵元所接收的回波信号按球面波扩展(与方位向合成孔径处理保持一致)进行

时延波束形成, 得到波束输出为

$$y(t) = \sum_{i=-(N_y-1)/2}^{i=(N_y-1)/2} w_i\left(t - \frac{r_{i0} - r_0}{c} + \frac{r_i - r}{c}\right) \quad (13)$$

$$r_i = \begin{cases} r, & i=0 \\ \sqrt{r^2 + l_i^2 + 2l_i r \sin(\theta)}, & i < 0 \\ \sqrt{r^2 + l_i^2 - 2l_i r \sin(\theta)}, & i > 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中 r_i 是被扫描点到阵元 i 的距离, r 是被扫描点的斜距, θ 是被扫描点的角度。 r, θ 是用于波束形成的参数, 通过对 r, θ 的搜索, 当时延补偿量 $(r_i - r)/c$ 等于时延量 $(r_{i0} - r_0)/c$ 时, 各阵元接收信号形成同相叠加, 出现最大强度的波束输出:

$$y(t) = \sum_{i=-(N_y-1)/2}^{i=(N_y-1)/2} ee_0(t) \quad (15)$$

式(15)就是该方位处角度为 θ_0 的波束输出, 利用不同方位处相同角度的波束输出进行逐点合成孔径成像, 便可以得到该角度波束的成像结果。可以看出, 该角度波束的合成孔径成像可以看成是一个单发、单收常规 SAS 成像, 采样间隔为 $(N_x D)/2$, 所以在方位向上有栅瓣出现, 即存在伪目标。因此需要参照方位向接收阵合成孔径处理所得结果来剔除伪目标, 再根据 $H=r_0 \cos(\theta_0)$ 与 $Y=r_0 \sin(\theta_0)$ 来得到目标的距离、深度信息。将不同角度波束的图像拼起来便能得到整个发射波束的图像。

(4) 算法实现步骤

(a) 按照式(13), 式(14), 将距离向接收阵信号进行波束形成处理, 得到不同角度波束的波束输出。

(b) 利用式(5), 式(9)计算同一波束内各像素点在不同时刻的时延, 采用时延波束形成对该波束内各像素点进行逐点成像, 得到该波束的图像。

(c) 通过对方位向接收阵回波信号合成孔径处理, 确定目标的方位向斜距位置, 结合上一步的结果, 剔除伪目标, 唯一确定目标的 3 维位置。

(d) 拼接各波束图像, 得到整个发射波束所照射的场景图像。

4 计算机仿真与性能分析

为了验证文中提出的多波束 SAS 系统的优越性以及逐点成像算法的有效性, 本节进行了计算机仿真, 对多波束 SAS 与传统的多波束声呐、常规 SAS 的性能进行了详细比较。

4.1 与传统多波束声呐比较

仿真场景为单个点目标, 仿真参数为: 中心频率 $f_0=20$ kHz, 信号带宽 $B=7.5$ kHz, 脉冲宽度 $T=5$ ms, $D=0.2$ m, 方位向接收阵阵元数 $N_x=4$, 距离

向接收阵阵元个数 $N_y=31$ ，基阵速度 $v=4$ m/s，脉冲重复频率 $f_r=10$ Hz，声速 $c=1500$ m/s，采样频率 $f_s=150$ kHz，形成波束个数为 60。点目标 A 的坐标为 $(x,r,\theta)=(0,50,\pi/6)$ (与航迹水平距离为 25 m)，其中 x 为方位向坐标， r 为斜距向坐标， θ 为点目标所在波束角度。常规多波束声呐和多波束 SAS 对点目标的成像结果如图 5 所示。

图 5(a)表示常规多波束声呐对正下方的成像结果，因其不能对接收波束内方位向各点进行分辨，所以成像结果为沿方位向的一条亮线；图 5(b)表示多波束 SAS 的成像结果，因其经过合成孔径处理，故方位向分辨率得到提高，成像结果为一亮点。很显然，采用本文提出的方法，能有效提高多波束测深声呐的方位向分辨率。

4.2 与常规 SAS 比较

(1)仿真参数同 4.1 节，另设一点目标 B ，坐标为 $(x,r,\theta)=(0,50,\pi/3)$ 。 A, B 两点位于同一方位向平面内、斜距相同，但波束角度不同，也即两点深度、距离不同。常规 SAS 与多波束 SAS 对 A, B 两点目标的成像结果如图 6 所示。

图 6(a)表示常规 SAS 对 A, B 两点的成像结果，由于常规 SAS 不能得到目标的角度信息，不能对目标在距离、高度上进行分辨，所以对 A, B 的成像结果是在斜距为 50 m 处的一个亮点；图 6(b)表示多波束 SAS 对 A, B 的成像结果，因多波束 SAS 能对不同角度波束内的目标分别进行成像，所以能将目标从距离上进行分辨，由成像结果可以看出位

于不同距离上的两个点目标；在此基础上，还能进一步得到目标的深度信息，如图 6(c)所示，两目标相对于声呐基阵的深度分别为 43.3 m，25 m；相对于声呐基阵的水平距离分别为 25 m，43.3 m。

(2)仿真参数同 4.1 节，再设一点目标 C ，其坐标为 $(x,r,\theta)=(2,50,\pi/3)$ ， A, C 两点位于不同的方位向平面内、斜距相同、波束角度不同。采用常规 SAS 与多波束 SAS 对 A, C 两点的目标成像结果如图 7 所示。

图 7(a)表示常规 SAS 对 A, C 两点目标的成像结果，可以看出，常规 SAS 能从方位向上将两目标分辨，也能得到目标的斜距，却不能得到目标距声呐基阵的水平距离。图 7(b)所示的多波束 SAS 成像结果能从方位、距离上将 A, C 进行分辨，图 7(c)则给出了两目标的 3 维位置。

(3)为了比较噪声对常规 SAS 逐点成像算法和多波束 SAS 逐点成像算法的影响，在信噪比为 -10 dB 的环境下(其它仿真条件同 4.1 节)，采用两种算法分别对点目标 B 进行成像，得到结果分别如图 8(a)，图 8 (b)所示。

从图 8(a)，图 8(b)的成像结果对比可以看出，采用本文阵列结构和算法的成像结果在非目标位置处的输出幅度较常规 SAS 逐点成像结果明显降低，也即意味着更易将目标从周围环境中区分出来，成像质量得到了改善。因此，多波束 SAS 逐点算法性能要优于常规 SAS 逐点算法。

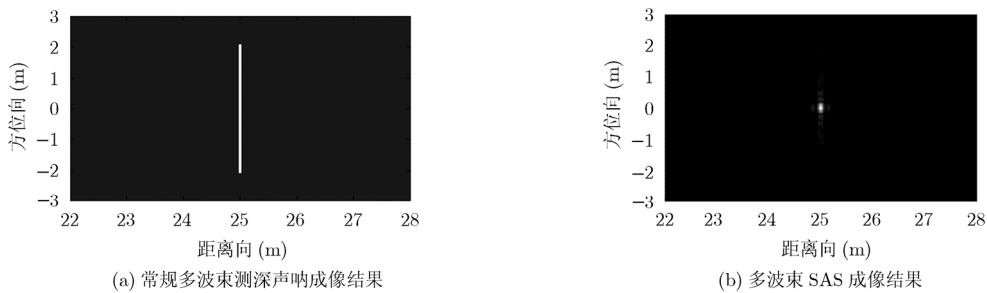


图 5 多波束 SAS 与常规多波束的成像比较

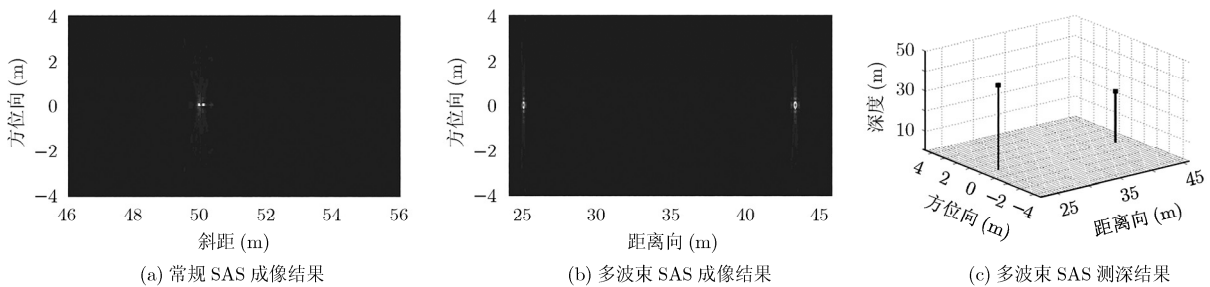


图 6 多波束 SAS 与常规 SAS 成像结果对比 1

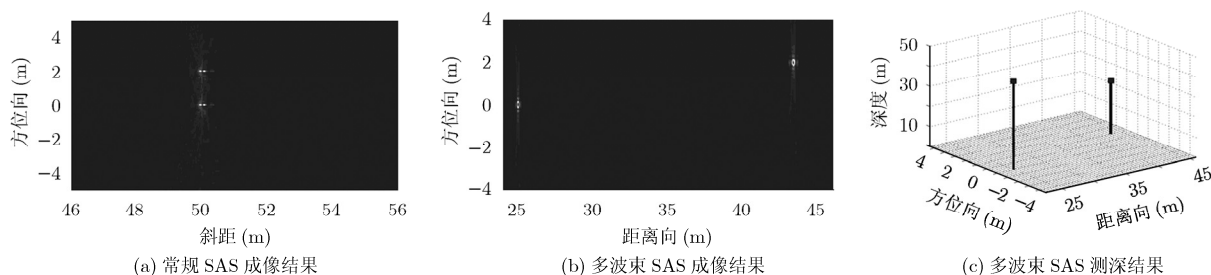


图7 多波束 SAS 与常规 SAS 成像结果对比 2

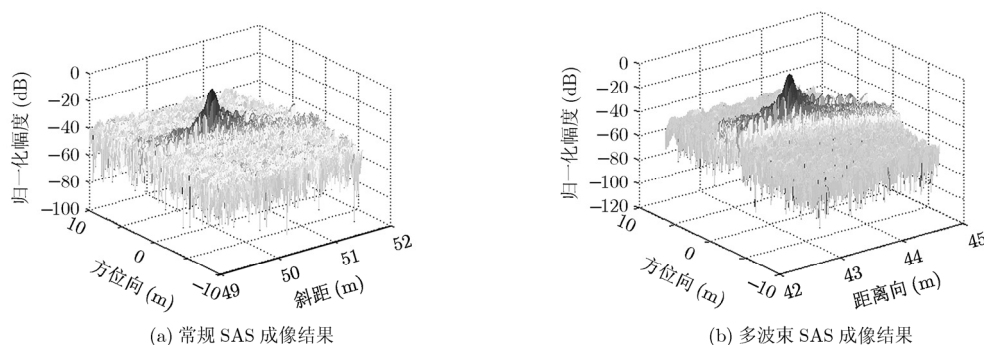


图8 常规 SAS 与多波束 SAS 成像 3 维幅度图

5 结论

本文基于多波束测深和合成孔径技术原理,提出了多波束合成孔径声呐的实现方案,及相关阵列结构和成像算法,其目的是为了提升多波束测深声呐的方位向分辨性能。文中建立了多波束 SAS 数学模型,推导了多波束 SAS 的逐点成像算法。仿真结果表明,相比于常规 SAS,多波束 SAS 得到的目标成像结果能够给出更多的信息,且能改善成像效果,性能优势明显,充分证明了文中所提方案与算法的有效性和可行性。

参考文献

- [1] 么彬. 多子阵空间建模水声成像技术研究[D]. [博士论文, 哈尔滨: 哈尔滨工程大学水声工程学院, 2009.
Yao Bin. Study on multiple sub-array special module underwater acoustic imaging technology [D]. [Ph.D. dissertation], Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [2] 马建林, 金菁, 刘勤等. 多波束与侧扫声呐海底目标探测的比较分析[J]. 海洋测绘, 2006, 26(3): 10-12.
Ma Jian-lin, Jin Jin, and Liu Qin, *et al.* Multi-beam echosounder versus side scan object detection a comparative analysis [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2006, 26(3): 10-12.
- [3] 周天, 李海森, 朱志德等. 多波束测深系统多子阵检测法的改进及其性能分析[J]. 声学技术, 2005, 24(3): 152-156.
Zhou Tian, Li Hai-sen, and Zhu Zhi-de, *et al.* Performance analysis of improved multiple sub-array detection method in multi-beam bathymetry system [J]. *Technical Acoustics*, 2005, 24(3): 152-156.
- [4] 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.
- [5] Courmontagne P, Telandro T, and Asada A. An improvement on SAS image formation [C]. OCEANS '09 IEEE Bremen: Balancing Technology with Future Needs, Bremen, Germany, 2009: 1-8.
- [6] Jiang X K, Sun C, and Feng J. A novel image reconstruction for synthetic aperture sonar with single transmitter and multiple-receiver configuration[C]. Proceedings of the IEEE Oceans 2004 Conference Proceedings, Kobe, Japan, 2004: 1940-1944.
- [7] 徐江, 唐劲松, 张春华等. 多子阵合成孔径声呐逐点成像算法[J]. 信号处理, 2003, 19(2): 157-160.
Xu Jiang, Tang Jin-song, and Zhang Chun-hua. Beam formation imaging algorithm for synthetic aperture sonar [J]. *Signal Processing*, 2003, 19(2): 157-160.
- [8] 杨海亮, 唐劲松, 张森. 基于非停走停及方位非均匀采样的多接收阵合成孔径声呐 CS 成像算法[J]. 高技术通讯, 2009, 19(9): 939-945.
Yang Hai-liang, Tang Jin-song, and Zhang Sen. A chirp scaling imaging algorithm with non-uniform sampling in azimuth and without approximation of stop-and-hop for multiple-receiver synthetic aperture sonar [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2009, 19(9): 939-945.
- [9] Callow H J. Signal processing for synthetic aperture sonar

- image enhancement [D]. [Ph.D. dissertation], New Zealand: University of Canterbury, Christchurch, 2003.
- [10] 李蓉, 孙超, 杨益新. 合成孔径声呐相关合成算法中的伪目标问题[J]. 声学技术, 2003, 22(1): 33-34.
- Li Rong, Sun Chao, and Yang Yi-xin, *et al.*. On alias target problem in coherent addition algorithm of synthetic aperture sonar [J]. *Technical Acoustics*, 2003, 22(1): 33-34.
- [11] 刘兴华. 干涉合成孔径声呐系统设计和成像算法研究[D]. [博士论文], 北京: 中国科学院声学研究所, 2008: 19-22.
- Liu Xin-hua. Research on system design and image reconstruction algorithms for interferometric synthetic aperture sonar [D]. [Ph.D. dissertation], Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences. 2008: 19-22.
- [12] Sawa T, Aoki T, and Yoshida H, *et al.*. Modified synthetic aperture algorithm for sonar systems [J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2010, 24(2): 142-148.
- 姚永红: 男, 1984年生, 硕士生, 研究方向为合成孔径声呐成像算法.
- 周天: 男, 1980年生, 副教授, 研究方向为水下目标探测与识别.
- 李海森: 男, 1962年生, 教授, 研究方向为水声信号处理.
- 徐剑: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为水下目标探测与识别.