

合成孔径声呐相关合成算法中的伪目标问题

李 蓉, 孙 超, 杨益新

(西北工业大学声学工程研究所, 西安 710072)

摘 要: 本文将用于合成孔径声呐成像的相关合成算法推广到合成孔径技术的伪目标抑制当中, 放宽了不出现伪目标的采样条件, 从而提高了声呐运动速度, 改善了图像的质量, 提高了声呐的成像率。如果声呐采样间距已定, 则相应的声阵物理长度可以缩短, 从而使得方位分辨率有所提高。计算机仿真结果验证了所提思路的有效性。

关键词: 声呐; 合成孔径; 伪目标; 相关合成算法; 采样率

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

On alias target problem in coherent addition algorithm of synthetic aperture sonar

LI Rong, SUN Chao, YANG Yixin

(Institute of Acoustic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: It is shown in this paper that the sampling rate is relaxed in the coherent addition algorithm for synthetic aperture sonar without alias targets. Thus the sonar can move faster, the image quality is improved, and the mapping rate is increased. If the sampling interval is fixed, the length of the physical aperture can be reduced, and the azimuth resolution is improved.

Key words: sonar; synthetic aperture; alias targets; coherent addition algorithm; sampling rate

1 引 言

合成孔径声呐的基本原理是通过声阵的匀速直线运动, 将沿航迹方向的回波数据相干累加, 形成较大的虚拟孔径, 从而提高方位分辨率。合成孔径技术相对于常规声呐技术的突出优势在于它可以只用小孔径的物理声阵, 得到与距离和频率都无关的高方位分辨率。

在合成孔径成像过程中, 物理阵要以一定的间距 D_{pulse} 对虚拟大孔径内的一系列发射脉冲的回波进行采样。早先的合成孔径雷达的设计者为了提高采集数据的频率, 选择以 $L_r/2$ (L_r 是雷达发射器方位向长度) 而不是半波长 ($\lambda/2$) 做为采样间距 ($L_r > \lambda$), 通过将物理阵波束的零点指向伪目标方向来抑制伪目标。但是对于伪目标抑制的效果却很少进行讨论。

本文则提出, 用于合成孔径成像的相关合成算法, 不仅在选取 $L_r/2$ 作为间距时不会出现伪目标, 而且还可以进一步放宽采样条件, 降低 L_r 与 D_{pulse} 的比值, 从而在 L_r 固定的情况下, 提高声呐运动的速度, 使得成像率有所提高; 或者在 D_{pulse} 固定的情况下, 缩短物理声阵的长度, 提高方位分辨率。计算

机仿真实验验证了本文的结论。

2 合成孔径的数学模型

图 1 为包含了航线及目标 P 的斜平面。声呐换能器水平方向长度为 L_r , 其半功率束宽为 $\theta_{-3\text{dB}} = \lambda/L_r$, 其中 $\lambda = c/f_0$ 为发射信号的波长, c 为水中声速, f_0 为信号的中心频率。取声呐平台前进方向为 x 向、与之垂直的斜距 r 方向为 y 向建立坐标系。点目标的坐标为 (x_0, r_0) 。时间起点选择如下: 当 $t = 0$ 时, 平台位置 $x = 0$, 于是有 $x = vt$, 式中 v 表示平台前进的速度。当平台位置为 x 时, 声呐至目标 P 的斜距 r 为:

$$r = [r_0^2 + (x - x_0)^2]^{1/2} = [r_0^2 + (vt - x_0)^2]^{1/2} \quad (1)$$

式中, r_0 为点目标 P 离航线的最小距离, x_0 为 P 点的 x 坐标。

当合成孔径声呐的斜距 r_0 远远大于 $(x - x_0)$ 时, 有以下近似:

$$r \approx r_0 + \frac{(x - x_0)^2}{2r_0} = r_0 + \frac{(vt - x_0)^2}{2r_0} \quad (2)$$

$$|x - x_0| \ll r_0$$

当声呐波束扫过目标时, 回波的到达时间为:

$$\tau = \frac{2r}{c} \quad (3)$$

图 2 是双程斜距 R 与航迹 x 的关系, 它显示了

收稿日期: 2001-03-05; 修回日期: 2001-08-23

作者简介: 李蓉(1977), 女, 陕西省西安市人, 硕士学位, 主要从事阵列信号处理的各算法及其仿真的研究。

在各个航迹点上对应的双程斜距, 也显示了回波的延迟与 x 的关系。

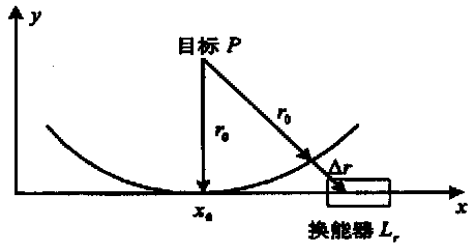


图 1 合成孔径的几何模型

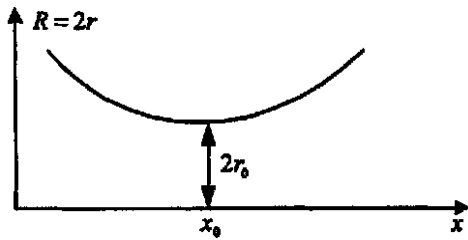


图 2 双程斜距 R 与航迹 x 的关系

在一个物理线列阵中, 由一个固定发射器发射脉冲, 所以脉冲的发射路径相同, 到达时间的不同仅是由返回路径的不同造成的。但是对于一个运动的声呐平台来说, 同一个阵元在运动中发射和接收信号, 往返相移在形成有效辐射图时都起作用, 因而使得合成孔径的等效长度为 $L_{eff} = 2L$ 。因此合成孔径的分辨率比相同孔径的真实线列阵的分辨率高一个两倍的系数^[1~3,5,6]。由这一关系可得出:

$$\theta_{sa} = N(2L) \quad (4)$$

式中 θ_{sa} 是合成孔径的有效半功率束宽, L 是合成孔径的长度。因此合成阵的方位分辨率为:

$$\delta_{sa} = \theta_{sa} r_0 = \frac{\lambda r_0}{2L} \quad (5)$$

要想获得与距离和波长无关的方位分辨率, 必须合成一组不同长度的孔径。每个孔径对应一个焦距。其长度限制为, 在孔径边界处保证目标处于波束内。即满足:

$$L = \theta \cdot r_0 \quad (6)$$

其中 θ 为物理阵的半功率束宽, $\theta = N L_r$ 。因此方位分辨率为:

$$\delta_{sa} = \theta_{sa} \cdot r_0 = L_r / 2 \quad (7)$$

可见 δ_{sa} 与距离、波长无关。

3 相关合成算法

为了充分利用合成孔径系统的高分辨能力, 必须使用相关合成处理。对于接收到的回波信号, 其

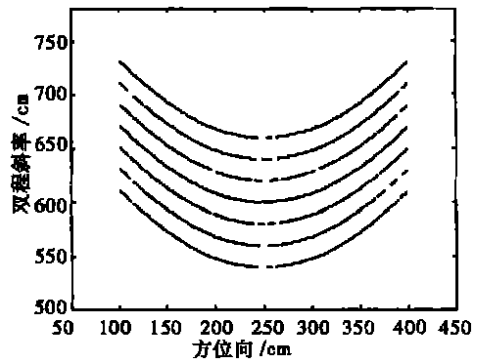
形式如延时求和波束形成器。对每一个合成孔径上的回波信号做时间搬移, 以使得它们在某一期望的聚焦距离上是匹配的(补偿的), 再将这些搬移的回波求和, 从而在待成像点上形成图像。用公式可表示为:

$$c(t) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} e_n(t) * \delta(t + \Delta \tau_n) \quad (8)$$

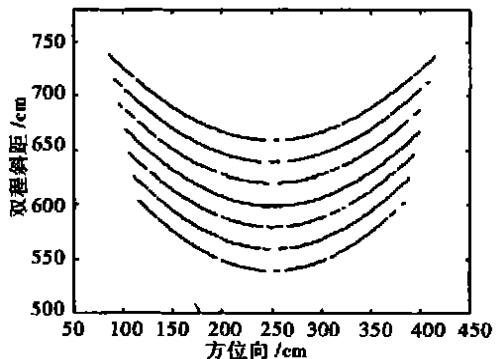
式中 N 表示待成像点对应的合成孔径长度所需的采样点数, $e_n(t)$ 表示第 n 个采样点上接收到的回波(经过距离向相关处理), $\Delta \tau_n$ 是第 n 个采样点对应的回波延迟。

现在结合图 3 进一步说明。图 3(a) 显示的是单个目标点形成的回波数据带。其中双程斜距对应的是回波延迟。图 3(b) 显示的是同一方位、不同斜距的待成像点对应的聚焦函数。相关合成算法就是要将回波数据按照聚焦函数进行延时求和处理, 从而使得目标点得到匹配, 与其它点区别开来。

如图 3(b) 所示, 对于 $x-y$ 平面上的任意一点 (x, y) , 都会在 $x-R$ 平面上对应一条抛物线, 即该点的聚焦函数, 这条抛物线表明了回波的延迟与 x 的关系。在上文中已经给出了抛物线满足的方程。可以看出抛物线的曲率只与该点的斜距有关。图 3(a) 中各条抛物线代表回波中的同相波前。因为聚



(a) 数据带



(b) 聚焦函数

图 3 阵列聚焦

焦函数的形状只与最小斜距有关,而图中各条抛物线对应的是同一个目标点,所以其形状相同。图 3 (b)中的各条抛物线对应的是不同斜距点的聚焦函数,因此其形状各不相同,长度和曲率均随着距离而变化。而两图中的实线均代表了同一点的回波阵中绝对值最大的波前。

将图 3(a)中的数据带沿着图 3(b)中的各条抛物线求和,即将图 3(b)覆盖到图 3(a)上。按照数据带中的每一个同相波前相关迭加是不可能的。因此,选择在脉冲最大绝对值点对应的波前上进行聚焦是非常重要的。若两条实线重叠,则脉冲最大绝对值波前被正确聚焦,那么对应的回波数据就可以同相迭加;反之,对应的回波数据将会互相消减。所以按照目标 (x_0, y_0) 对应的抛物线迭加的数据将会形成峰值,从而被分辨出来^[7]。

4 相关合成算法中不出现伪目标的采样条件

不管是实孔径还是合成孔径,都需要将连续的孔径离散化,为了避免出现伪目标,须满足一定的采样要求。从声呐阵的观点来看,伪目标来自于栅瓣。取目标的斜距为 r_0 ,如果存在伪目标,则由合成阵的栅瓣位置可得伪目标相对于真实目标的距离为:

$$\Delta x = r_0 \tan \left[\frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{D_{\text{pulse}}} \right) \right] \quad (9)$$

如果 $\lambda < L_r$,则通常避免这些栅瓣的方法是保证阵元间距 D_{pulse} 满足式(10):

$$D_{\text{pulse}} \leq \frac{L_r}{2} \quad (10)$$

式(10)表示脉冲发射间距不能大于声呐物理孔径长度 L_r 的一半,即将合成阵的栅瓣和发射-接收阵的零点取在同一位置,通过合成阵的波束图与发射-接收阵的波束图相乘,消除栅瓣,所得图像将只有主瓣。如果我们过采样,则不会消除栅瓣,但是栅瓣会受到声呐波束图较远旁瓣的抑制。对于这一方法的效果,文献[4]中进行了讨论,指出伪目标还是存在的。

但是在合成孔径声呐中,由于合成孔径的长度满足式(6),则结合式(9)可得,当 $\Delta x > L$,即 D_{pulse} 与 L_r 满足:

$$L_r > \lambda \tan [0.5 \times \sin^{-1} (\lambda / D_{\text{pulse}})] \quad (11)$$

时,不会出现伪目标。这是因为当 L 满足式(6)时,斜距为 r_0 的目标对应的回波矩阵的宽度也为 L ,所以在相关合成算法中,待成像平面上可成像区域的宽度为目标方位正负 L ,即 $(x_0 \pm L)$ 。超过此范围,

会因为无数据而无法成像,所以无法出现伪目标。当 $\Delta x \leq L$,即 D_{pulse} 与 L_r 满足

$$L_r \leq \lambda \tan [0.5 \times \sin^{-1} (\lambda / D_{\text{pulse}})] \quad (12)$$

时,伪目标落在可成像区域内,所以图像中会出现伪目标。各种情况列表如下:

表 1 L_r 与 D_{pulse} 的不同关系对伪目标的影响

$L_r \leq \lambda \tan [0.5 \times \sin^{-1} (\lambda / D_{\text{pulse}})]$	$\Delta x \leq L$ 有伪目标
$L_r > \lambda \tan [0.5 \times \sin^{-1} (\lambda / D_{\text{pulse}})]$	$\Delta x > L$ 无伪目标

表 2 L_r 与 $2D_{\text{pulse}}$ 的不同关系对伪目标的影响

$L_r = 2D_{\text{pulse}}$	$\Delta x > L$ 无伪目标
$L_r > 2D_{\text{pulse}}$	$\Delta x > L$ 无伪目标

所以,不仅是在 $L_r = 2D_{\text{pulse}}$ 的采样条件下,而是只要满足式(11),相关合成的图像中就不会出现伪目标。

而在不出现伪目标的前提下, L_r 与 D_{pulse} 的比值越小越好。因为当 L_r 固定时, D_{pulse} 越大,使得成像率越高;而当 D_{pulse} 固定时, L_r 越小,则方位分辨率($\delta_a = L_r/2$)越高。所以条件(11)放宽了采样条件,可以使得成像率或者方位分辨率提高。

5 仿真及讨论

在前面分析的基础上,现在就单目标和双目标的情况分别做仿真验证研究,通过具体数据讨论采样条件的放宽对成像率或方位分辨率的改善效果。

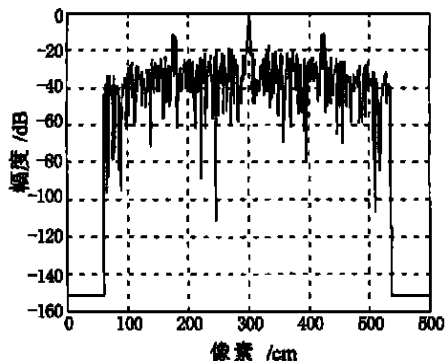
5.1 单目标

以高斯包络的线性调频信号作为发射信号,中心频率为 $f_0 = 37.5\text{kHz}$,带宽为 $B = 0.75\text{kHz}$,则 $\lambda = 4\text{cm}$ 。在单目标情况下,取 $r_0 = 300\text{cm}$, $D_{\text{pulse}} = 5\text{cm}$,做出 $L_r = D_{\text{pulse}} = 5\text{cm}$ 、 $L_r = 2D_{\text{pulse}} = 10\text{cm}$ 、 $L_r = 3D_{\text{pulse}} = 15\text{cm}$ 以及 $L_r = \lambda \tan [0.5 \times \sin^{-1} (\lambda / D_{\text{pulse}})] = 8\text{cm}$ 的合成孔径声呐图像。下面给出的是斜距为 R_0 处的方位向切面图。其中星号‘*’表示理论上应出现伪目标的位置。

由图 5 可见,在 $L_r = 2D_{\text{pulse}}$ 的采样条件下,相关合成的图像中确实没有出现伪目标。第(12)式取等号时为出现伪目标的临界情况,如图 7 所示。所以当 $D_{\text{pulse}} = 5\text{cm}$ 时,在不出现伪目标的前提下, L_r 可以缩短 2cm,方位分辨率由原来的 5cm,提高到 4cm。图 6 是过采样的情况。图 4 是不满足式(11)时出现伪目标的情况。

5.2 双目标

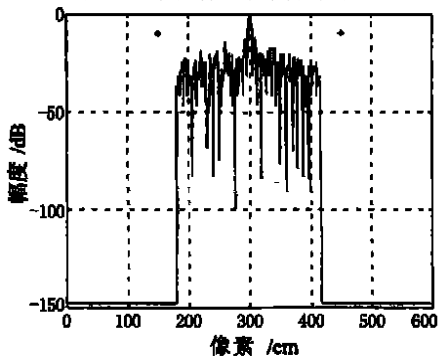
如果存在多个目标,由于目标相对位置的结果,



$L_r = 5\text{cm}, D_{\text{pulse}} = 5\text{cm}, L = 240\text{cm}$

$\Delta x = 150\text{cm}, L > \Delta x$, 有伪目标

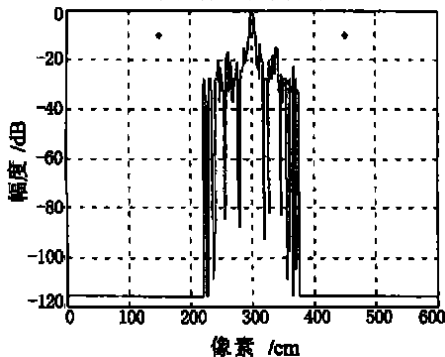
图4 单目标方位向切面图



$L_r = 10\text{cm}, D_{\text{pulse}} = 5\text{cm}, L = 120\text{cm}$

$\Delta x = 150\text{cm}, L < \Delta x$, 无伪目标

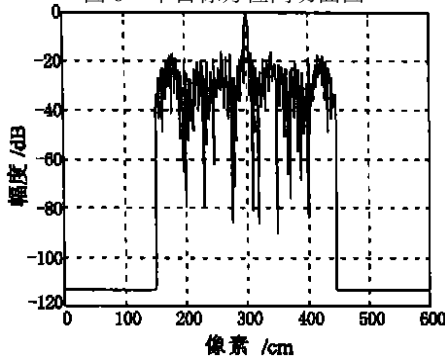
图5 单目标方位向切面图



$L_r = 15\text{cm}, D_{\text{pulse}} = 5\text{cm}, L = 80\text{cm}$

$\Delta x = 150\text{cm}, L < \Delta x$, 无伪目标

图6 单目标方位向切面图

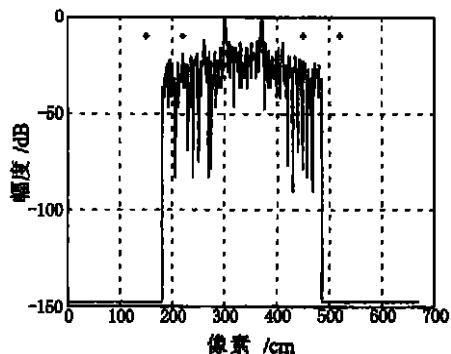


$L_r = 8\text{cm}, D_{\text{pulse}} = 5\text{cm}, L = 150\text{cm}$

$\Delta x = 150\text{cm}, L = \Delta x$, 有伪目标

图7 单目标方位向切面图

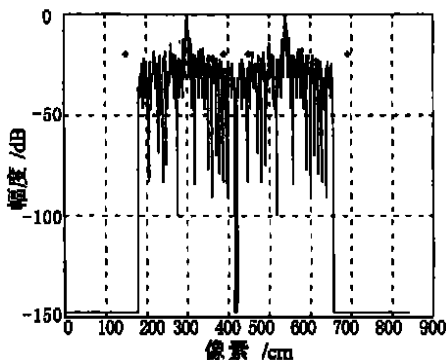
有可能使得伪目标的理论位置处存在回波数据。这样看似可能产生伪目标,但是由于这些数据已经不是该实目标对应的数据,所以已经失去了传统意义上伪目标存在的条件。下面对于双目标的情况,只给出 $L_r = 2D_{\text{pulse}} = 10\text{cm}$ 时的结果。取目标间距分别为 $70\text{cm} < \Delta x$ 和 $240\text{cm} > \Delta x$,可以看出,虽然存在数据,但是星号处,并未出现伪目标。



$L_r = 10\text{cm}, D_{\text{pulse}} = 5\text{cm}, L = 120\text{cm}$

$\Delta x = 150\text{cm}, x_2 - x_1 = 70\text{cm}$,

图8 双目标方位向切面图



$L_r = 10\text{cm}, D_{\text{pulse}} = 5\text{cm}, L = 120\text{cm}$

$\Delta x = 150\text{cm}, x_2 - x_1 = 240\text{cm}$,

图9 双目标方位向切面图

5.3 对成像率及方位分辨率改善效果的讨论

现在通过具体数据,讨论放宽采样条件对改善成像率及方位分辨率的效果。

如果取中心频率为 8kHz ,则波长 λ 为 18.75cm 。在 D_{pulse} 为定值的情况下,设 $D_{\text{pulse}} = 19\text{cm}$,则 $L_r = 2D_{\text{pulse}} = 38\text{cm}$, $\delta_{sa} = 19\text{cm}$;而若采用 $L_r = \lambda \tan [0.5 \times \sin^{-1}(\lambda D_{\text{pulse}})] = 22\text{cm}$,则 $\delta_{sa} = 11\text{cm}$,可见物理声阵的长度 L_r 缩短了 16cm ,方位分辨率提高了 8cm 。随着 D_{pulse} 的增大,改善将会越来越小。如果 L_r 为定值,设为 22cm ,则 $D_{\text{pulse}} = L_r / 2 = 11\text{cm}$,而若 $D_{\text{pulse}} = \lambda \sin(2 \tan^{-1}[(\lambda L_r)]) = 19\text{cm}$,则采样间距增大 8cm ,可以提高成像率。当

(下转第43页)

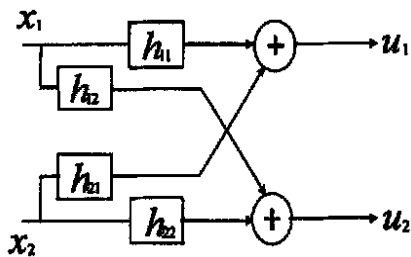


图 3 卷积混合盲源分离的时域实现

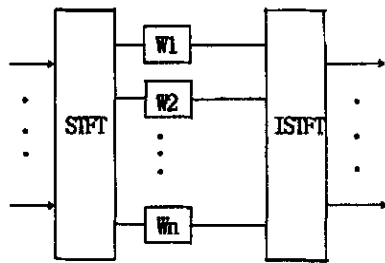


图 4 卷积混合盲源分离的频域实现

3.3 目的

盲波束形成的目的和盲源分离的目的也是一致的: 都要提取信号抑制干扰。在传统波束形成中, 因为分离出的信号是不同方向的信号, 所以波束形成的作用除了提高 SINR 外, 还有定向、分辨率的要求。盲源分离的最终目的也是要求对任意方向都能分离开来。也就是满足了定向和分辨率的要求。

4 结 语

通过以上讨论可以看出: 宽带盲波束形成和卷积混合模型盲源分离无论从信号模型、系统框图还是从处理目的来说都是一致的。卷积混合模型盲源分离算法可以用来解决宽带盲波束形成问题。在后续的工作中我们将研究具体的, 更具通用性的卷积混合盲源分离算法, 以应用到宽带盲波束形成中。

参考文献:

- [1] Alle-Jan Vander Veen. Algebraic method for deterministic blind beamforming[J]. Proceeding of the IEEE, 1998, 86 (10): 1987-2008.
- [2] Stephan V. Shell, William A. Gardner. Blind adaptive spatiotemporal filtering for wide-band cyclostationary signals [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1993, 41(5): 1961-1964.
- [3] C. B. Papadimas, A. J. Paulraj. A constant modulus algorithm for multiuser signal separation in presence of delay spread using antenna arrays[J]. IEEE Signal Processing Letter, 1997, 4(6): 178-181.
- [4] Kung Yao. Blind beamforming on a randomly distributed sensor array system[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(8): 1555-1567.
- [5] Lambert R. H. Multichannel blind deconvolution: FIR Matrix Algebra and Separation of Multipath Mixture[D]. Ph. D. dissertation, University of Southern California, 1996. 8-9.
- [6] Barry D. Van Veen, Kevin M. Buckley. Beamforming: A versatile approach to spatial filtering [J]. IEEE ASSP Magazine, 1988: 4-24.

(上接第 36 页)

$L_r = \lambda$ 时, 这种改善最大, 采样间距增大值等于 $N/2$; 随着 L_r 的增大, 改善越来越小。

6 结 论

本文提出了不管 λ 与 L_r 的关系如何, 在合成孔径声呐成像的相关合成算法中, 以 $L_r/2$ 为采样间距不会产生伪目标。并且进一步给出了不出现伪目标时 L_r 与 D_{puke} 应满足的关系, 放宽了采样要求, 使得成像率或者方位分辨率有所提高。并且对于以相关合成算法为基础的其它合成孔径声呐成像算法, 上述结论都应成立。

参考文献:

- [1] L. J. Cutrona. Comparison of sonar system performance achievable using synthetic aperture techniques with the performance achievable by more conventional means[J]. J. A. Acoust. Soc. Am., 1975, 58(2): 336-348.

- [2] N. C. Yen and W. Carey. Application of synthetic aperture processing to towed array data[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1989, 86(2): 754-765.
- [3] M. P. Hayes P. T. O. Gough. Test results using a prototype synthetic aperture sonar[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1989, 86(6): 2328-2333.
- [4] K. D. Rolt H. Schmidt. Azimuthal ambiguities in synthetic aperture sonar and synthetic aperture radar imagery[J]. IEEE J. of Oceanic Engineering, 1992, 17(1): 73-79.
- [5] V. S. Riyait, M. A. Lawlor, A. E. Adams, O. R. Hinton, B. S. Sharif. Comparison of the mapping resolution of the ACID synthetic aperture sonar with existing sidescan systems[A]. BreSt: Proceedings of IEEE Oceans' 94 Conf. [C], 1994. III: 559-564.
- [6] M. A. Lawlor, A. E. Adams, O. R. Hinton, V. S. Riyait, B. Sharif. Methods for increasing the azimuth resolution and mapping rate of a synthetic aperture sonar[A]. BreSt: Proceedings of IEEE Oceans' 94 Conf. [C], 1994. III: 565-570.
- [7] Zaiqing Meng. A study on a synthetic aperture sonar[D]. Loughborough University of Technology: Ph. D thesis, 1995. 70-75.