

双站合成孔径声纳系统原理研究

林卫明^{①②} 朱振波^① 蒋兴舟^①

^①(海军工程大学 武汉 430033)

^②(空军雷达学院 武汉 430010)

摘要: 该文建立了发射站固定的双站合成孔径声纳模型, 并对其分辨特性等原理进行了分析和研究, 得到了距离分辨力、脉冲重复频率以及测绘速率严格的数学解, 同时给出了有关计算机仿真。仿真结果验证了理论分析的正确性, 表明了双站合成孔径声纳成像方法可行、有效。

关键词: 双站合成孔径声纳; 测绘速率; 散射; 脉冲重复频率

中图分类号: U666.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)02-0405-05

Research on Principle of the Bistatic Synthetic Aperture Sonar

Lin Wei-ming^{①②} Zhu Zhen-bo^① Jiang Xing-zhou^①

^①(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

^②(Air Force Radar Academy, Wuhan 430010, China)

Abstract: Firstly, a Bistatic Synthetic Aperture Sonar (Bi-SAS) configuration with fixed transmitter is given in this paper, and then the azimuth and range resolution, the Pulse Repetition Frequency (PRF) and the mapping rate of the Bistatic-SAS are studied in detail. The analytical solutions are obtained, consequently, the computer simulation are presented in the end. The simulation results validate the correctness of the theory and show the validity of the method in the Bistatic-SAS image.

Key words: Bistatic synthetic aperture sonar; Mapping rate; Scattering; Pulse repetition frequency

1 引言

合成孔径声纳(Synthetic Aperture Sonar, SAS)理论源于合成孔径雷达, 其基本原理就是利用声纳与目标之间的合作运动提高声纳方位分辨力, 进而实现目标成像。合成孔径技术引入声纳的主要目的是对水下小目标(如水雷)及海底进行高分辨成像, 目前已有不少文献进行了深入的研究^[1,2]。双站合成孔径声纳(Bistatic Synthetic Aperture Sonar, BiSAS)是指发射系统和接收系统(含天线)安装在不同载体上的合成孔径声纳。从实际情况出发, 图 1 给出了发射站固定的双站 SAS 系统工作示意图。图中, 装有发射机的载体固定在某个位置上, 接收机装在水下自主航行体上, 并以一定的速度和方向作匀速直线运动, 假设以正侧视方式工作; 发射机以一定的脉冲重复频率发射信号, 接收机接收来自目标

平面的回波信号。这样, 与常规 SAS 的条带成像一样, BiSAS 成像的区域(即测绘带)是平行于接收平台运动轨迹的一条“带”。以下研究和探讨均建立在此模型基础上进行。

与常规 SAS 相比, BiSAS 由于收、发分置, 一方面灵活性好, 收发配置位置不受限制, 接收机是无源设备, 工作时间相对可以延长; 另一方面可充分利用目标的散射特性(收发几何配置不同, 目标反射特性就不同), 同时也可利用目标的非后向散射信息来进行成像, 获取的信息比常规 SAS 丰富; 因此, BiSAS 在民用和军用上将有很好的应用前景。在民用方面, 它将广泛应用于海洋测绘和勘探、港口清理、水下考古、打捞等领域, 进行海底底质、地貌、工程结构分析等, 对数字地球研究具有重要意义。在军用方面, 可进行沉底水雷和掩埋水雷的探测和识别。因此 BiSAS 成像技术, 在国民经济发展和国防建设中具有重要的现实意义。

除美国研究人员在本世纪初发表了几篇关于 BiSAS 探讨性文章之外, 至今未见国内外有关理论分析文献的公开发表, 利用实验进行 BiSAS 研究受到美国专家的普遍重视。Edwards 博士通过实验, 阐述了 BiSAS 下相干和非相干波束形成过程的不同性能特点^[3]; LePage 教授在意大利厄尔巴岛做了“GOATS98”试验后指出, BiSAS 对海底包括暴露、半埋及深埋目标的成像是可行的^[4]。两人均在实验条件下, 验证了 BiSAS 通过水下自主航行体能够对水中目标进行探测和

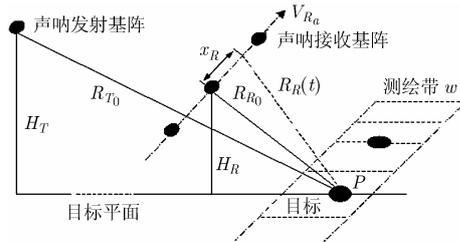


图 1 发射站固定的双站 SAS 系统工作示意图

成像。但是，作为一项新概念的SAS技术，BiSAS有大量的内容值得研究。

本文建立了发射站固定的BiSAS模型，并对其基本原理进行了研究。发射站固定的BiSAS回波信号的多普勒历史仅由接收机平台运动决定，其方位向分辨力以及脉冲重复频率的选取等问题，与常规SAS有较大的不同。本文将对发射站固定的BiSAS的分辨特性、脉冲重复频率的选取和测绘速率等问题进行研究。

2 BiSAS 距离和、多普勒等值线

在BiSAS结构中，距离和、多普勒等值线会发生变化。目标的距离特性通常采用目标至收发天线相位中心的距离和来描述，波束照射区域内等距离和的目标回波将同时到达接收机，目标平面上到收发天线相位中心等距离和的点的集合称为等距离和曲线。目标的频率特性主要由载体相对目标运动产生的多普勒频率来描述，平台相对目标运动而产生等多普勒频率的所有平面点的集合称为等多普勒曲线。

在图1模式结构中，接收机处在发射波束相位中心的位置上，以收发天线相位中心连线在目标平面投影的中心点为原点，以投影线为 x 轴，然后按照右手准则建立直角坐标系，得到距离和、多普勒等值线如图2和图3所示。从图2所示的曲线看，发射站固定的BiSAS的等距离和曲线是一族椭圆，而椭圆弧与圆弧接近，说明发射站固定的BiSAS受椭圆特性的影响较小；从图3看出多普勒等值曲线呈双曲线特性。图4为等距离和曲线与多普勒等值曲线的覆盖图，该覆盖图反映了发射站固定的BiSAS对水中(底)照射区域不同散射点回波的距离多普勒识别能力。 TR 连线左右两端附近，等距离和曲线与多普勒等值曲线的覆盖轮廓线形成了名义上的正交，表明发射站固定的BiSAS工作在前侧视或斜侧视状态时，在二维网格上对水中(底)不同散射点回波距离多普勒的识别能力较好。 TR 连线垂直平分线附近，两组轮廓线名义上是平行的，表明当工作在前视状态时，距离多普勒无法在二维网格上对水中(底)不同

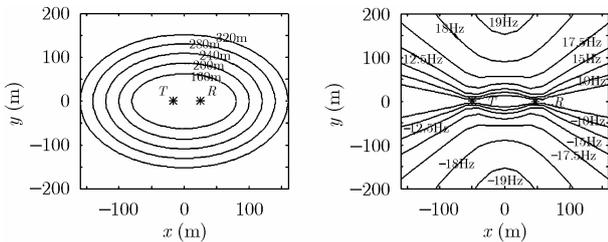


图2 等距离和曲线

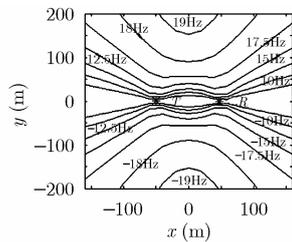


图3 多普勒等值曲线

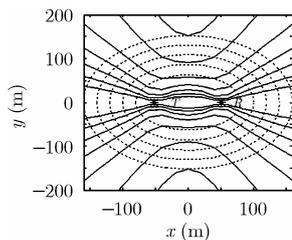


图4 等距离和曲线与多普勒等值曲线的覆盖图

散射点回波定位识别，而随着前视探测范围的增大，还会出现目标定位的模糊。

3 BiSAS 目标散射特性和分辨力特性分析

3.1 BiSAS 目标散射特性

对于BiSAS，当收发分置后，目标回波主要来自发射源的非入射方向，BiSAS的优点就是能够充分利用目标非入射方向的声散射特性。关于双基地声纳的目标声散射特性，目前国内外已经有了一定的研究。文献[5]通过双基地声纳目标信号的实验研究，表明双基地声纳具有以下两点目标声散射特性：(1)单基地声纳目标强度的大小，随入射方位角的变化而变化；而双基地声纳目标强度，不仅随着声波入射方位角的变化而变化，而且随着分置角大小的不同而变化；(2)当入射方位角和分置角满足文中判断公式时双基地声纳目标强度可获得最大值。文献[6]从理论上，应用变形柱方法，建立了椭球目标散射声场的数学模型，给出了声散射函数的简单而明确的表达式。以上理论和实验研究，揭示了双基地声纳的目标声散射特性，也证实了目标非入射方向含有丰富的目标信息，这些信息在军事探测和成像领域中将带来意外的收获。发射站固定的BiSAS，收发分置，能够充分利用非后向目标散射成像，来获取更为丰富的目标特性。

3.2 BiSAS 方位分辨力

假定图1模型符合“停-走-停”假设，即接收机基阵运动到某个位置后，停下来静止接收信号，然后再运动到下一个位置，同时暂不考虑声线弯曲，这样 $t=0$ 时刻，声纳发射信号照射到点 P 后经反射到达接收机，回波信号所经历的全部路程为

$$R_0 = R_{T_0} + R_{R_0} \quad (1)$$

式中 R_{T_0} ， R_{R_0} 分别是 $t=0$ 时刻发射天线相位中心和接收天线相位中心到场景中心 P 的距离。设 t 时刻接收天线相位中心到场景中心 P 的距离为 $R_R(t)$ ，则 t 时刻回波信号所经历的路程可以表示为

$$R_t = R_{T_0} + R_R(t) \quad (2)$$

其中

$$R_R(t) = (R_{R_0}^2 + x_R^2)^{1/2} \quad (3)$$

式中 $x_R = V_{R_0} t$ 表示 t 时刻接收机载体所处的位置； V_{R_0} 为接收机载体匀速直线运动的航行速度。在不满足菲涅尔假设条件下，在 $t=0$ 处通过泰勒展开到三次项，式(3)为

$$R_R(t) = R_{R_0} + \frac{(V_{R_0} t)^2}{2R_{R_0}} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)，有

$$R_t = R_0 + \Delta R(t) \quad (5)$$

其中 $\Delta R(t) = \frac{(V_{R_0} t)^2}{2R_{R_0}}$ ，图5给出了发射站固定的BiSAS的收、发距离弯曲量与合成孔径时间的关系，图6给出了其

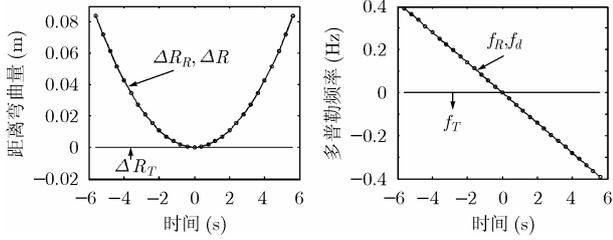


图 5 BiSAS收发距离弯曲量 图 6 BiSAS的多普勒频率

多普勒频率示意图。文献[7]给出窄带 BiSAR 的方位分辨率分析,当发射站固定时,方位向多普勒历史仅由接收机决定,其分辨率下降为单站模式时的一半。对于发射站固定的宽带 BiSAS,由于菲涅尔假设不再成立,因此其方位分辨力应该用 BiSAS 接收波束的 3dB 波束角 θ 来表示,在忽略介质一致性和声纳稳定性影响的情况下,方位向分辨力 $\rho_a = \lambda_0 / \theta$ (λ_0 为载波波长)^[8]。

3.3 BiSAS 距离分辨力

图 7 为 BiSAS 距离关系图, T, R 分别为水中发射机和接收机所处的位置, T_0, R_0 是点 T, R 在水中(底)某一平面上的投影, A, B 为 $R_0 T_0$ 延长线上的两个点,因此 H_T, H_R 可视为发射机和接收机到该平面的深度,设线段 RA, RB 的长度分别为 R_{RA}, R_{RB} , TA, TB 的长度分别为 R_{TA}, R_{TB} , $T_0 A$ 为 l_1 , $R_0 A$ 为 l_2 , 同时点 A, B 间的距离为 Δr_g 。

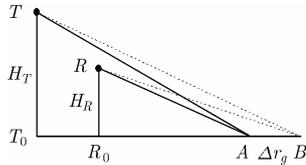


图 7 BiSAS 距离关系图

根据图中关系,点 B 离发射机的距离有

$$R_{TB} = \sqrt{(l_1 + \Delta r_g)^2 + H_T^2} \quad (6)$$

对式(6)在 $\Delta r_g = 0$ 处进行麦克劳林展开,考虑 l_1 远大于 H_T ,并保留展开式的前两项,有

$$R_{TB} = \sqrt{l_1^2 + H_T^2} + \frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + H_T^2}} \cdot \Delta r_g \quad (7)$$

而 $R_{TA} = \sqrt{l_1^2 + H_T^2}$, 所以有

$$R_{TB} - R_{TA} = \frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + H_T^2}} \cdot \Delta r_g \quad (8)$$

同理可求得

$$R_{RB} - R_{RA} = \frac{l_2}{\sqrt{l_2^2 + H_R^2}} \cdot \Delta r_g \quad (9)$$

所以 AB 两点距离向波程差为

$$\begin{aligned} \Delta R &= (R_{TB} - R_{TA}) + (R_{RB} - R_{RA}) \\ &= \left(\frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + H_T^2}} + \frac{l_2}{\sqrt{l_2^2 + H_R^2}} \right) \cdot \Delta r_g \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{令 } k_g = \left(\frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + H_T^2}} + \frac{l_2}{\sqrt{l_2^2 + H_R^2}} \right), \text{ 有}$$

$$\Delta R = k_g \cdot \Delta r_g \quad (11)$$

若要 AB 两点在距离向能够分离开,则要求 $\Delta R/c$ 大于线性调频信号匹配滤波后的主瓣宽度,即

$$\frac{k_g \cdot \Delta r_g}{c} \geq \frac{1}{B} \quad (12)$$

其中 B 为发射线形调频信号带宽。

当式(12)取等号时,得到 BiSAS 的距离向理论分辨率(地距分辨力)的表达式为

$$\rho_g = c / (k_g \cdot B) \quad (13)$$

与常规 SAS 的距离向理论分辨率 $\rho_r = c / (2B)$ 表达式相比, BiSAS 距离向理论分辨率(地距分辨力)表达式的分母常数变为 k_g , k_g 产生的原因主要是由于接收机和发射机分置于两个平台造成的。

4 BiSAS 脉冲重复频率和测绘速率

由于水声环境的特殊性,尽管 SAS 在原理上与 SAR 相同,但在实际应用中却遇到种种限制。声纳载体不规则运动及介质扰动造成的相位误差,对于孔径能否合成起着关键作用。因为水中声传播速度较低(相对于电磁波而言),使得不能采用较高的信号重复频率,从而只能限制载体的运动速度以避免空间降采样引起的方位模糊,结果限制了声纳的测绘速率。而较低的信号重复频率又进一步加剧了载体不规则运动及介质不稳定带来的相位误差的影响,从而增加了成像的难度,进而得不到高质量的 SAS 图像。

4.1 距离模糊对 BiSAS 脉冲重复频率的影响

PRF 的选择是涉及 BiSAS 距离模糊的关键问题,与常规 SAS 有所不同的是, BiSAS 的目标距离是收发平台到目标的距离和。考虑到 BiSAS 的一般使用条件,假定 BiSAS 发射波束的照射区域要宽于接收波束的覆盖区域,这样, BiSAS 的测绘带宽度将主要取决于接收波束覆盖区域的距离向尺度,如图 8 所示。图中, H_R 为接收机平台离水中(底)目标平面的深度,接收波束的俯角为 φ_R , 波束宽度为 θ_R ; H_T 是发射平台离水中(底)目标平面的深度, φ_T 是发射波束的俯角, θ_T 为测绘带 W 所对应的发射波束宽度。接收天线相位中心到测绘带近端 N 和远端 F 的斜距 $R_{R\min}, R_{R\max}$ 。其中,收、发天线相位中心到测绘带近端 N 的斜距

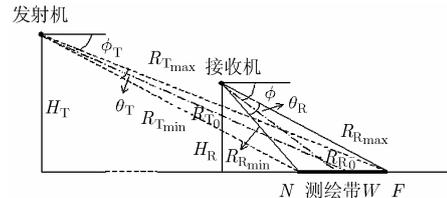


图 8 BiSAS 测绘带

和为 $R_{\min} = R_{T_{\min}} + R_{R_{\min}}$; 远端 F 的收、发斜距和为 $R_{\max} = R_{T_{\max}} + R_{R_{\max}}$, 两者之差为 $\Delta R = R_{\max} - R_{\min}$ 。

由文献[7]可得

$$\Delta R = W \cdot \left[\frac{\cos(\phi_R)}{\cos(\theta_R/2)} + \frac{\cos(\phi_T)}{\cos(\theta_T/2)} \right] \quad (14)$$

定义比例系数 $k = \Delta R/W$ (W 为测绘带宽), 由式(14), 有

$$k = \frac{\cos(\phi_R)}{\cos(\theta_R/2)} + \frac{\cos(\phi_T)}{\cos(\theta_T/2)} \quad (15)$$

BiSAS 系统中, θ_R, θ_T 一般很小, 则 $\cos(\theta_R/2) \approx 1$, $\cos(\theta_T/2) \approx 1$, 将 k 简化

$$k \approx \cos(\phi_R) + \cos(\phi_T) \quad (16)$$

当测绘带 W 确定后, 为防止距离模糊, 应有

$$\Delta R = R_{\max} - R_{\min} \leq c \cdot T_r \quad (17)$$

式中 $T_r = 1/\text{PRF}$, c 为声速。因此应限制脉冲重复频率为

$$\text{PRF} \leq c/\Delta R = \frac{c}{k \cdot W} \quad (18)$$

存在距离模糊时, 与常规 SAS 一样, BiSAS 需要对模糊测绘带(距离维)回波信号功率进行抑制。

4.2 方位模糊对 BiSAS 脉冲重复频率的影响

PRF 除了受距离模糊限制外, 同时还要受到方位模糊的限制。BiSAS 平台在一个脉冲间隔时间内的运动距离为 $V_{R_0} T_r$, 这样, 为了避免方位向的模糊, 这个距离量必须要小于 BiSAS 的方位向分辨力值, 即 $V_{R_0} T_r \leq \rho_a$, 亦即

$$\text{PRF} \geq V_{R_0} / \rho_a \quad (19)$$

综上, BiSAS 的 PRF 要同时受到距离模糊和方位模糊的限制, 即要同时满足式(18)和式(19), 从而

$$\frac{c}{k \cdot W} \geq \text{PRF} \geq \frac{V_{R_0}}{\rho_a} \quad (20)$$

这里需要指出的是, 当双站 SAS 发射机平台远离待观测区域, 而接收机抵近观测区域时, 由于发射波束在方位向的照射区域较宽, 可能会部分地覆盖接收波束旁瓣的指向区域。因此, 对于 BiSAS 方位向模糊的限制问题, 一方面要按采样率要求选择 PRF, 避免方位向采样模糊; 另一方面, 要重点限制接收天线的旁瓣电平, 抑制模糊功率。

4.3 BiSAS 的测绘速率

海洋环境中平台运动的不确定性和可能出现的声音相位不稳定性会影响相位相关性。SAS 绘图速度受到声音传播速度和所需测绘范围的限制。在成像的基础上, SAS 的测绘率是大面积海底测绘的一个重要指标, 而水声传播的低速性导致的空间欠采样问题严重限制了 SAS 测绘率的提高。通过以上分析, BiSAS 受到方位模糊与距离模糊的联合限制。因此, 单阵元 SAS 的测绘速率较低, 不能满足实际工作的需要, 因而提高测绘速率的方法就成为影响 BiSAS 的一个关键技术。

定义发射站固定时 BiSAS 的测绘速率 r_{ac} 为

$$r_{ac} = V_{R_0} \cdot W \quad (21)$$

其中 V_{R_0} 为接收机载体的航行速度, W 为测绘带宽。由式(20)和式(21)得

$$r_{ac} = V_{R_0} \cdot W \leq \frac{c \cdot \rho_a}{k} \quad (22)$$

可以得到 BiSAS 最高测绘速率为

$$r_{ac} = V_{R_0} \cdot W = \frac{c \cdot \rho_a}{k} \approx \frac{c \cdot \rho_a}{\cos(\phi_R) + \cos(\phi_T)} \quad (23)$$

从上式可看出, 发射站固定时 BiSAS 的测绘速率是有限的, 并与接收机天线孔径的水平尺寸有关(即与方位分辨力有关)。举例来说, 对于 $\rho_a = 0.1\text{m}$, $k = 1.5$ 的 BiSAS, 最高测绘速率约为 $100\text{m}^2/\text{s}$, 这显然满足不了大面积高效测绘的要求。针对此问题, 目前已提出了采用多波束、宽带处理和采用“Vernier”多子阵处理技术等设想来提高 SAS 的测绘速率, 理论上多子阵系统的最大测绘率可提高到单子阵的 N 倍(N 为基阵阵元数)。

另外, 从式(23)可求得 BiSAS 最大测绘带为

$$W \approx \frac{c \cdot \rho_a}{v_{R_0} \cdot [\cos(\phi_R) + \cos(\phi_T)]} \quad (24)$$

式(24)说明, BiSAS 的测绘带宽度, 一方面, 与 ρ_a 有关, ρ_a 数值越小(方位分辨力越高), 测绘带宽度就越小; 另一方面, 还与接收机载体运动速度有关, 速度越低, 测绘带宽度就越大, 这一结论与常规 SAS 完全一致。

5 仿真实验

为了验证图1模式, 本文对其成像进行了仿真研究。假设接收基阵为单子阵, 成像目标为点目标(两个点目标相距 2m), 目标距湖底深度 10m, 距水面 60m。仿真参数如下:

载频 $f_0 = 20\text{kHz}$, 信号带宽 $B = 7.5\text{kHz}$, 脉冲宽度 $\tau = 10\text{ms}$, 脉冲重复频率 $\text{PRF} = 10\text{Hz}$, 声基阵尺寸(横向) $d_{R_0} = 0.3\text{m}$, 采样频率 $f_s = 125\text{kHz}$, 航行体速度 $v_{R_0} = 0.8\text{m/s}$, 测绘带宽 $W = 100\text{m}$, 声速 $c = 1.52\text{km/s}$, $R_{T_0} = 120\text{m}$, $R_{R_0} = 100\text{m}$, $H_R = 30\text{m}$, $H_T = 40\text{m}$ 。

仿真结果如图 9 所示。

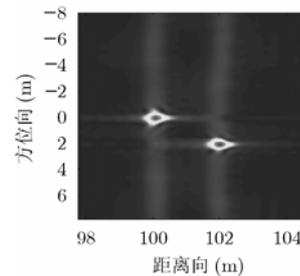


图 9 BiSAS 成像仿真

6 结束语

与常规 SAS 相比, BiSAS 具有灵活性强、获取信息丰富等优点, 作为一项新概念的水中观测和侦察手段, 无论在民用还是军事应用领域都有着广阔的发展空间。本文对发射站固定下 BiSAS 的分辨特性、脉冲重复频率和测绘速率等问题进行了研究和探讨。由于收、发系统的分置, 回波信号的

多普勒频率由收、发载体运动共同贡献, 从而使得发射站固定的 BiSAS 系统的 ρ_a , ρ_g , PRF 和 r_{ac} 的限制条件都与收发平台几何配置有关。要改善测绘速率, 可通过增加有限的硬件复杂度换取空间采样率的提高。

应该说, 由于双站收发分置的特点, BiSAS 的系统设计及分析和成像算法等都比常规 SAS 复杂, 有待以后需要进一步的深入研究。

参 考 文 献

- [1] Hayes M P and Gough P T. Broad-band synthetic aperture sonar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1992, 17(1): 80–94.
 - [2] McHugh R, Shaw S, and Taylor N. Efficient digital signal processing algorithm for sonar imaging. *IEE Proc.-Radar, Sonar Navigation*, 1996, 143(3): 149–156.
 - [3] Edwards J R and Schmidt H, *et al.* Bistatic synthetic aperture target detection and imaging with an AUV. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 690–691.
 - [4] LePage K D and Schmidt H. Bistatic synthetic aperture imaging of proud and buried targets from an AUV. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, 27(3): 471–476.
 - [5] 赵俊渭, 丁玮, 阎宜生等. 收发分置水下目标声散射特性的实验研究. *声学学报*, 1997, 22(2): 124–131.
 - [6] 张小凤, 赵俊渭, 王荣庆等. 双基地声呐散射声场的建模与仿真. *系统仿真学报*, 2002, 14(5): 562–565.
 - [7] 汤子跃, 张守融. 双站合成孔径雷达系统原理. 北京: 科学出版社, 2003: 27–28.
 - [8] 吕彤光, 陆仲良, 粟毅等. 冲激信号SAR成像的方位分辨率分析. *电子学报*, 2000, 28(6): 40–43.
- 林卫明: 男, 1968年生, 博士生, 从事雷达信号处理、水声合成孔径声呐等领域的研究工作。
- 朱振波: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向为双站合成孔径雷达系统及成像技术。
- 蒋兴舟: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为军用目标特性与水中制导。