

第二讲 合成孔径声纳成像及其研究进展*

张春华 刘纪元[†]

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

摘要 文章在介绍了图像声纳的特点、合成孔径声纳(synthetic aperture sonar, SAS)产生背景和发展过程的基础上,对合成孔径声纳的原理、技术难点、成像算法等问题进行了讨论.着重分析了合成孔径声纳成像过程中高分辨率的获取方法、水声信道对成像的影响、多子阵技术及其成像算法、稳定的声纳运动平台和运动监测问题、运动补偿与自聚焦方法等.文章还给出了国内外合成孔径声纳研究的最新进展情况,进而展望了合成孔径声纳的应用前景.

关键词 合成孔径声纳, 图像重建, 成像算法, 运动补偿与自聚焦

Synthetic aperture sonar imaging and its developments

ZHANG Chun-Hua LIU Ji-yuan

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The features of imaging sonar, and the background and early development of synthetic aperture sonar (SAS) are reviewed. The principle, difficulties and imaging algorithms of SAS are discussed, with special emphasis on ways to achieve high resolution, the influence of underwater acoustic channels on imaging, multi sub-array techniques and corresponding imaging algorithms, stable motion platforms and motion sensors, and motion compensation and autofocusing. The latest developments and future prospects of SAS are also presented.

Keywords synthetic aperture sonar, image reconstruction, imaging algorithms, motion compensation and autofocus

1 引言

声波是目前唯一可利用的能够在水中远距离传播的能量形式,因此声波作为在水中探测和通讯的主要手段,在海洋监测、海洋工程、海上军事作战、海洋科学研究等方面发挥着不可替代的作用.

图像和声音是人获取信息的主要来源,图像传递的信息更丰富、更生动、更直观,因此有“耳听为虚,眼见为实”的说法.借助于各种成像设备,可以把现实世界中的景象记录和再现出来.在太空中和陆地上,通常采用光学或电磁波成像,物体内部的探测多采用X射线成像和超声波成像等;在水下,由于电磁波或光波受到强烈的衰减而无法用于较远距

离的探测,所以水下较远距离的成像均采用水声成像技术.

水下地形地貌和水中物体观测的需求促进了水声成像技术的发展.在民用方面,海底矿物资源开发需要进行工程勘测和水下监视;在海洋权益划界谈判中,需要海底地形地貌资料的支持;航道疏浚工程也需要地形地貌测量和工程量评估;重要水上活动区域、基地、水下设施和船只等需要防范小型潜器(如微型潜艇)和蛙人的恐怖袭击;水声成像技术还可用于船舶避碰、水下工程(护岸工程、水下管线

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA631110, 2005AA604200)资助项目

2005-11-15 收到初稿, 2006-02-24 修回

[†] 通讯联系人, Email: Jiyuan_liu@tom.com

等)探查、沉物打捞、水下作业监视、水下考古等。在军事方面,水声成像技术可以用于水雷等水下爆炸物的探测与识别、基地和舰艇的安全防范、地形匹配导航等。

水声成像设备也称为图像声纳。图像清晰、作用距离远是对图像声纳的基本和主要要求。要获得清晰的图像,要求图像声纳具有足够高的空间分辨力。比如在水下观察一个井架,低分辨力声纳只能看到一个点,分辨能力高一点就能看出一个框架,分辨能力再高就能看到结构细节。图像声纳的分辨力分为距离向分辨力和方位向分辨力。距离向分辨力是指声波传播方向的距离分辨能力,方位向分辨力一般是指与声波传播方向垂直的方向的角度分辨能力。距离向分辨力决定于信号的脉冲宽度或频带宽度,脉冲宽度愈窄分辨力愈高,采用脉冲压缩技术时信号带宽越大分辨力越高。对于除合成孔径声纳以外的其他成像声纳来说,方位向分辨力一般用辐射波束的三分贝主瓣宽度来表示,它与声纳基阵的大小(也称为孔径)和工作频率有关。要提高方位向分辨力,可以采取提高工作频率或者加大声纳基阵尺寸的办法。但是提高工作频率,声纳的探测作用距离就会受到限制,而加大声纳基阵尺寸又受到基阵载体、费用和工程实现等方面的限制,这在许多情况下也会给制造和使用带来不便。另外,角度分辨力映射到实际成像中的空间线度分辨力与距离有关,距离近,分辨力高,距离远,分辨力低,也就是说,这种空间分辨力是不均匀的。

用虚拟的孔径代替真实的孔径,既能解决孔径尺寸的问题,又能解决远距离方位向分辨力的问题,这就出现了合成孔径技术,相应的声纳就是合成孔径声纳^[1-3]。与普通成像声纳相比,合成孔径声纳的主要优点就是它可以得到很高的方位向空间分辨能力,因此合成孔径声纳研究受到了充分重视。

2 合成孔径声纳研究的历史

声纳和雷达就像一对孪生兄弟,从原理到应用相似之处颇多。合成孔径声纳经历了与合成孔径雷达(SAR)相似的发展过程。在空中对陆地进行电磁成像是从侧视雷达开始的,合成孔径雷达在20世纪50至60年代处于起步阶段,80年代以后处于大发展阶段,并逐步取代传统侧视雷达,成为对地观测的主要手段。在巨大军事和民用需求的拉动下,合成孔径雷达目前仍是活跃的研究领域,并且机理研究不

断深入,技术指标不断提高,应用领域不断扩大。

合成孔径声纳(以下简称SAS)的原理研究从20世纪60年代开始。美国Raytheon公司于1967年提出关于SAS可行性的报告,Walsh于1969年申请了第一个SAS专利。但是20世纪60至70年代SAS发展缓慢,这里有技术实现上的困难,也有对SAS技术上是否可行的认识问题。在SAS研究领域,有两个主要问题被认为影响了SAS技术发展。第一个是水声信道问题,水声环境一般比较恶劣(如随时变化的信道),不同回波信号的相干性是个问题。特别是浅海水声环境条件不理想,同空气中电磁波工作环境相比,是更为“敌意”的媒质。当时的主流观点认为,水声信道太不稳定,不适合合成孔径处理。另一个问题是声波传播速度比电磁波慢得多,由于方位模糊问题,使得信号空间采样率较低,大大限制了SAS载体的运动速度,进而限制了测绘速率的提高。

在SAS研究处于低潮时期,仍有一些学者坚持不懈地探索。Williams于1976年,Christoff等人于1982年,Gough和Hayes等人于1989年,进行了一系列水声传播实验,结果表明,水声信道的影响并不像预想的那么严重。尽管水声信道是随时间变化的,水声回波信号在较短时间内仍具有较好的相干性,水声信号的相干性能够满足合成孔径成像的要求。声传播速度慢导致的信号空间采样率低和限制SAS载体运动速度等问题,也可以通过多子阵的办法来弥补。

巧合的是,走出主流观点的阴影进而在20世纪80年代末出现SAS研究的大发展过程,与相同时间段上人工神经网络研究的发展历程有十分相似之处。

合成孔径成像在雷达领域取得的成功,推动了合成孔径声纳技术的发展。由于合成孔径成像的相似性,SAS可借鉴SAR中的技术成果,SAR中的成像算法可用于SAS中。受SAR成功的鼓舞,一些国家自80年代以来进行了较多的水声传播和合成孔径声纳成像试验。进入20世纪90年代,SAS研究开始活跃起来,并出现了实验样机系统。一些SAS系统的作用距离从几十米到几百米,甚至到十几公里远,分辨力也从米、分米到厘米量级。新西兰CANTERBURY大学Perter Gough领导的课题组于1993年推出的KIWI SAS,是第一个合成孔径声纳海试样机系统。欧州SAMI SAS于1995—1996年进行了海上试验,获得了较远距离上的大面积范围海底测绘

图. 法国的新型合成孔径声纳 IMBAT 3000 是商用型的, 主要用于水下地形地貌勘测和石油开采. 美国在该领域投资很大, 研究成果也处于领先地位. 美国雷声公司和 DTI 公司从 1994 年起合作研制了两型合成孔径声纳系统 DARPA 和 CEROS, 分别用于探测水雷和近水域埋藏的爆炸物. 美国 DTI 公司最新推出分辨力 10cm 的 PROSAS 系统, 是一个商用产品, 可以安装在 AUV 或 ROV 上.

在国家高技术研究发展计划的支持下, 我国从 1997 年启动合成孔径声纳研究. 经过 8 年的发展, 我国在 SAS 理论及关键技术方面取得了很大进展, 先后研制出湖试和海试合成孔径声纳成像系统, 完成了一系列试验, 达到了与国际同步的发展水平.

3 合成孔径声纳的原理和特点

合成孔径声纳的基本原理是利用小尺寸基阵沿空间匀速直线运动来虚拟大孔径基阵, 在运动轨迹的顺序位置发射并接收回波信号, 根据空间位置和相位关系对不同位置的回波信号进行相干叠加处理, 从而形成等效的大孔径, 获得沿运动方向(方位向) 的高分辨力. 图 1 是合成孔径声纳原理示意图.



图 1 合成孔径声纳原理示意图

设基阵的实际孔径为 D , 工作频率为 f , 波长为 λ , 声纳载体以匀速 v 沿直线运动. 声纳不断向水中定向发射声脉冲, 脉冲重复频率为 PRF. 设基阵孔径远大于信号波长, 则基阵的正侧视指向性是:

$$B_D(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin\theta\right)}{\frac{\pi D}{\lambda} \sin\theta} \right|, \quad (1)$$

其三分贝主瓣宽度为 $\Delta\theta_D = \frac{k\lambda}{D}$ (k 取值 0.88). 相邻两次脉冲间隔时间基阵移动的距离是 $\delta = \frac{v}{\text{PRF}}$, 对于远场距离基阵 R 处来说, 合成孔径的长度为 $L \approx \frac{k\lambda R}{D} = N\delta$, 其中 N 是声纳移动 L 距离所发射脉冲的次數. 在基阵移动了 L 距离后, 通过对接收信号的相关

处理, 就获得了一个等效的 N 元等间距直线阵, 其指向性为

$$B_L(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\frac{2\pi N\delta}{\lambda} \sin\theta\right)}{N \sin\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda} \sin\theta\right)} \right|. \quad (2)$$

上式考虑了发射和接收的双程相移, 其三分贝主瓣宽度为 $\Delta\theta_L = \frac{k\lambda}{2N\delta} = \frac{D}{2R}$, 而 $2N\delta = 2L \gg D$, 所以 $\Delta\theta_L \gg \Delta\theta_D$, 故合成孔径处理后波束锐化, 分辨力提高了. 这样距离 R 处的方位向空间分辨力为

$$\rho = R \times \frac{k\lambda}{2N\delta} = R \times \frac{k\lambda}{2 \times \frac{k\lambda R}{D}} = \frac{D}{2}. \quad (3)$$

根据 (3) 式, 从原理上来说, 合成孔径声纳的方位向空间分辨能力与声纳的工作频率和作用距离都没有关系, 而仅与基阵的实际声学孔径有关. 由于分辨力与距离无关, 因而可对远距离目标实现高分辨率成像, 而且远距离与近距离空间分辨率一样, 因而可以获得比较均匀的空间分辨力, 换句话说, 就是成像的保真度比较高. 由于分辨力与工作频率无关, 因而可以采用较低工作频率, 特别适合掩埋物和底质探测. 由于合成孔径声纳对目标的探测是采用多次照射和相干积累处理实现的, 所以点目标信噪比改善较大, 适合于漫散射背景下孤立目标的检测(如混响背景下水雷的探测).

4 合成孔径声纳研究的基本问题

合成孔径雷达原理推广到声学探测领域, 就出现了合成孔径声纳. 但合成孔径声纳作为一种水下成像设备, 受使用环境条件的影响, 有其不同于合成孔径雷达的特点. 首先是声传播信道的非理想性比合成孔径雷达中电磁波传播的情形严重; 其次是声纳拖体的运动稳定性比合成孔径雷达的情况要差得多; 再次是因为声速大大低于电磁波在空间传播的速度, 从而大大限制了声纳载体运动的速度, 也就是限制了测绘速率; 最后由于声纳中常采用宽带信号, 从而使得合成孔径雷达中的一些窄带信号处理方法在合成孔径声纳中不再适用, 需要对已有的成像算法进行改进或者研究新的成像算法.

4.1 水声信道及物体散射问题

水声信道的稳定性、时间相关性、空间相关性以及物体声散射特性等是合成孔径声纳的物理基础.

合成孔径声纳对目标回波信号进行相位补偿,通过相关处理获得高分辨力.这就要求在发射、传播和接收的过程中信号能够保持相关性,不发生相位畸变.也就是说,除了要保证发射系统和接收系统具有良好的相位特性外,还要求信号传播的信道具有良好的稳定性和时空相关性.对于水声信道的时间和空间相关性问题,国内外科学家都进行过海上试验,但是这些试验大多是针对低频声信号(频率低于2000Hz)传播而做的.针对合成孔径声纳所采用频段进行的海上试验很少,但是得到的结论是一致的.对于频率在100kHz以下的信号来说,在良好水文条件下,在一分钟的时间段上,水声信道的相位稳定性优于 10° /度.对于相应频段的信号,声场具有足够长的空间相关距离.但是在许多情况下,存在内波和水团扰动,从而可能破坏声场的相位一致性.

物体对声波的散射特性对声纳是十分重要的.大量的研究表明,海底的(反向)散射特性与底质的理化性质有关.有限大小物体的散射除了与物体材料有关外,还与其形状密切相关.散射特性研究对图像的解释和目标识别是非常必要的.

4.2 基阵平台稳定性及其高精度测量技术

合成孔径声纳一般采用水下拖曳体或水下自主航行体作为基阵平台,基阵平台的运动平稳性对合成孔径声纳成像非常关键.若基阵平台运动过程中在声传播方向发生十六分之一波长的偏离(对于20kHz工作频率来说,这对应着分别约5mm的偏离),则带来的相位误差是 22.5° ,这会使合成孔径成像模糊.

基阵平台由于水流的作用和拖曳母船运行的不平稳,或者由于设计和制作的不理想等原因,很难按照理想的匀速直线状态运动,因而必然出现运动偏差,从而引起信号的相位误差,影响孔径合成,导致成像质量下降,甚至根本得不到清晰的图像.因此,必须对基阵平台进行良好的流体动力设计,拖曳式平台还必须采取合理的拖曳方式和减隔振措施,以减小拖曳母船运行不平稳的影响.

即使采取了良好的流体动力设计和隔振措施,但由于水下环境(主要是水团的运动)往往非常复杂,呈现非平稳性,所以基阵平台仍然会出现较大的运动误差,因此还必须采用运动和姿态传感器进行监测,监测的参数主要有偏航角、纵倾角、横滚角、深度起伏、速度变化(瞬时速度)和侧向移动等.目前通常采用惯性导航设备加声学多普勒计程仪来进行

运动测量,但是由于仪器测量精度和参数之间存在相互耦合,在几十秒量级的时间段上很难达到测量精度要求.另一方面,高精度惯性导航设备也非常昂贵,其费用可能在总费用中占有很高的比例.因此对于合成孔径声纳来说,水下高精度位移测量是一个非常困难的问题.

4.3 测绘速率与多子阵技术

测绘速率(ACR)定义为单位时间SAS扫过的面积,它等于测绘带宽 W 与SAS平台运动速度 v 的乘积^[4].即测绘速率 $ACR = Wv$.

设合成孔径声纳在某工作状态下的最远端探测距离为 R_{\max} ,最近端探测距离为 R_{\min} ,水中声速是 C .考虑最简单的情形,为了避免距离模糊,要求脉冲重复周期 $T \geq \frac{2R_{\max}}{C}$,或者重复频率

$$PRF \leq \frac{C}{2R_{\max}}. \quad (4)$$

另一方面,为了获得横向空间分辨率 $D/2$,沿着声纳运动方向的空间采样间隔必须小于或者等于 $D/2$,也就是说,

$$PRF \geq \frac{2V}{D}. \quad (5)$$

对于高分辨力合成孔径声纳来说,(4)式和(5)式往往是矛盾的.一般地,根据最远探测距离定出PRF的上限,这样根据(5)式,就要求声纳平台的运动速度必须很慢(往往只能达到0.5m/s以下的速度).这样就带来了两个问题:其一是在如此慢的速度下,一般的平台难于保持速度恒定平稳,从而引起运动误差;其二是测绘速率太低,这样就大大地限制了合成孔径声纳的应用.

解决这个问题的一种方法是采用多个宽带正交信号等时间间隔依次发射,每个信号发射的重复频率满足(4)式,相邻正交信号发射时间间隔的倒数满足(5)式,但这种方法对接收机电路要求很高.目前更常用的方法是采用多重接收基阵的方法.发射基阵的孔径为 D ,接收阵由多个孔径为 D 的接收子阵组成,相邻接收子阵沿平台运动方向相互错开一个空间采样距离(即 $D/2$).这需要接收基阵由多个基元构成,相邻接收子阵具有公用基元.这种接收阵的设计步骤是:首先根据最大探测距离用(4)式取等号求出最高脉冲重复频率PRF,而后计算出采用单个接收基阵时能够达到的声纳运动速度为 $D \times PRF/2$.如果采用多个接收子阵,当所希望的声

纳运动速度是 v 时,那么所需接收子阵的个数为

$$M = \left\lceil \frac{v}{D \times \text{PRF}/2} \right\rceil = \left\lceil \frac{2v}{D \times \text{PRF}} \right\rceil, \quad (6)$$

[Λ]表示取大于或者等于 Λ 的最小整数,这样接收阵的总长度等于

$$D_M = D + \frac{M-1}{2}D = \frac{M+1}{2}D. \quad (7)$$

这样一来,两次发射之间基阵平台移动的距离就变成了 $MD/2$,而基阵平台的运动速度就可以达到 $\text{PRF} \times MD/2$,随之也提高了测绘速率。

4.4 合成孔径声纳成像算法

声纳图像是三维空间物体形状(由反射系数描述)向二维图像空间的映射.成像声纳根据回波信号解算出声纳图像(反射系数矩阵)的过程是图像重建过程,相应的计算方法称为成像算法或图像重建算法.合成孔径声纳成像算法可以用空间波束形成的概念来描述,如图2所示.点目标的反射系数可表述为

$$\sigma(r_0, y_0) = \sum_j s_j(t - \tau_j, y_j) \cdot W_j, \quad (8)$$

其中 r_0 是目标到基阵平台匀速直线运动轨迹的距离, y_0 是目标在基阵平台运动方向的位置, (r_0, y_0) 是目标在像平面上的坐标, $s_j(t, y_j)$ 是基阵在位置 y_j 处收到的目标回波信号, τ_j 是目标的时间延迟, W_j 是加权系数。

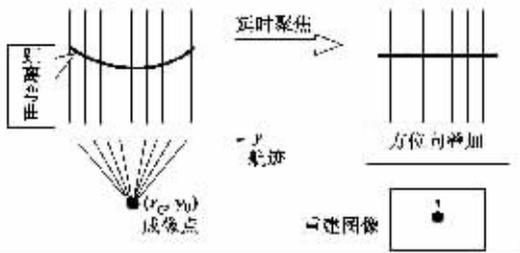


图2 SAS 方位聚焦波束形成示意图

在合成孔径雷达方面,已经研究出了多种成像算法,许多算法可以移植到合成孔径声纳中来.但是由于合成孔径声纳常采用宽带信号,使得合成孔径雷达中的一些窄带信号处理方法在合成孔径声纳中不再适用^[5-7],需要对已有的成像算法进行改进或者研究新的成像算法。

4.4.1 单接收阵 SAS 成像算法

SAS 图像重建过程可以借鉴 SAR 的成像方法,对于单接收阵 SAS 系统,可以直接采用 SAR 中的方法成像. SAR 成像最基本的方法是时域“二维移变

滤波器匹配”方法,可简化为时域“延时相加法”.这是一种“逐点”运算方法,在早期的 SAR 成像中使用.因为其运算效率很低,现代 SAR 中很少采用.现代 SAR 主要采用“逐线”成像算法,主要包括 Range Dopplai(RD)算法、Chirp Scaling(CS)算法和 $\omega - k$ 算法等。

SAS 一般为宽带系统,因此图像重建通常采用 $\omega - k$ 算法和“延时相加”算法。

4.4.2 多接收子阵 SAS 成像算法

以波束形成为基础的逐点成像算法,是适合多接收子阵的成像方法.延时相加算法尽管运算效率低,但它具有物理意义清晰、数学模型简单、对斜视宽容性好等特点,是理论上“最精确”的方法.同时在算法实现方面,它还具有坐标系选取灵活、运动补偿直接方便(不仅在波束中心线附近,其他位置也可补偿)、并行实时处理时任务分配方便等优点.因此目前多子阵合成孔径声纳成像算法大多采用逐点成像算法。

探索多子阵快速成像算法,对降低系统复杂性和成本十分重要,因而是 SAS 研究中非常关注的问题.这方面研究已经取得了一定进展,其中一种方法是借鉴 CT 成像中的后向投影算法(back projection, BP)及其快速分解算法(fast factorized back projection FFBP).但是当运算效率提高较大时,这种方法的图像分辨力下降较多。

4.4.3 运动补偿与自聚焦算法和技术

合成孔径声纳图像的重建是基于匀速直线运动这一理想的模型,但在实际应用中很难满足这一理想要求,基阵平台往往会偏离匀速直线运动,产生运动误差,从而造成图像散焦.运动误差使得回波信号的相位发生偏离,为了获得聚焦良好的合成孔径成像,需要用姿态和位移测量装置测量出运动误差,再把误差带入到信号通道进行相位补偿,这一过程称为运动补偿。

运动补偿要求姿态和位移测量装置的测量误差在十六分之一波长以下,但这常常是难以满足的.一方面当声纳工作频率较高时,现有测量装置达不到测量精度要求;另一方面是高精度测量装置非常昂贵,因此就出现了消除运动误差影响的其他方法,它一般不依赖于运动传感器,而仅利用声纳回波数据进行运动补偿,统称为自动聚焦算法.同时某些自动聚焦算法可以补偿信道特性的不理想,这是运动传感器所无法做到的.目前合成孔径声纳中常用的自聚焦算法主要是偏移相位中心(displaced phase cen-

ter ,DPC)算法和相位梯度自聚焦(phase gradient autofocus ,PGA)算法等^[8]。

5 合成孔径声纳研究的新进展

近些年来 ,合成孔径声纳研究依然主要围绕一些基本问题展开 ,这些问题包括高效高质量成像算法、运动误差的补偿和自聚焦算法、时间相干和空间相干性问题等 ,对有关问题的认识越来越深化 ,理论和技术的越来越成熟。同时相关科学和技术的发展也在不断促进 SAS 技术的进步 ,工程实现和实用化问题也受到了高度重视 ,已经出现了商用化产品 ,基本具备了应用的条件。

图 3 是一架沉入华盛顿湖湖底的 PB4Y - 2 海军巡逻飞机的 SAS 成像结果 ,采用了自动聚焦算法 ,用到的相干合成孔径长度为几千个波长。



图 3 沉于华盛顿湖底飞机的 SAS 成像

英国 GeoAcoustics 公司在其 GeoSAS 产品手册中给出了两种型号的合成孔径声纳 GeoSAS 500 和 GeoSAS 600 ,GeoSAS 600 在 GeoSAS 500 基础上增加了测深功能。图 4 是沉船的合成孔径成像结果。

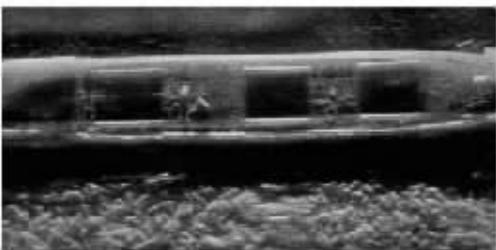


图 4 沉船的 SAS 成像结果

图 5 和图 6 是中国科学院声学研究所和中船重工集团公司 715 所合作进行的千岛湖 SAS 试验结果。图 5 是目标成像 ,图 6 是地貌成像。

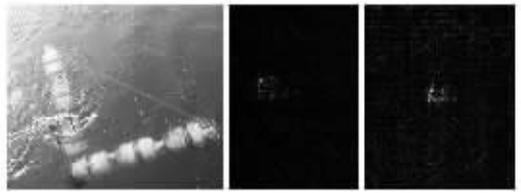


图 5 千岛湖试验 SAS 成像结果 L 形目标沉到水底 ,每臂长约 2m



图 6 千岛湖试验 SAS 成像结果 村庄和农田地貌成像

6 合成孔径声纳技术的未来展望

合成孔径声纳研究已经取得了很大进展 ,相关技术日趋成熟 ,许多试验说明 ,合成孔径声纳可以获得高质量的成像效果 ,有些结果甚至比一般想象的还要好 ,因此人们也在探讨合成孔径声纳的多种应用方式。

与实孔径声纳相比 ,合成孔径声纳的突出优点是具有高而且均匀的空间分辨率 ,问题是如何更稳定地、经济地获得这种好的性能。与竞争性技术相比 ,SAS 的实用性(性能稳定性、使用复杂性)和性价比是潜在的用户非常关心的问题。解决这些问题的关键是进一步突破快速高质量多子阵成像算法和运动补偿与自聚焦算法。

随着研究的进一步深入和相关科学技术的进步 ,系统复杂性将会降低 ,性能会更有保证 ,因此合成孔径声纳将会在水下物体探测和地形地貌测量中发挥重要作用。

参 考 文 献

- [1] Walsh G M. J. Acoust. Soc. Am. ,1969 ,47(5) :205
- [2] Gilmour G A. J. Acoust. Soc. Am. ,1978 ,65(2) :557
- [3] de Heering P. IEEE Jour. Ocean. Engin. ,1984 ,QE-9(4) :277
- [4] Nelander J C ,Kenton A C ,Wright J A. A vertical beamforming design approach for increased area coverage rate for synthetic aperture sonar. In :IEEE Southeastcon '89. Proceedings of Energy and Information Technologies in the Southeast ,1989 ,Vol. 1. 42—47
- [5] Chatillon J ,Bouhier M E ,Zakharia M E. IEEE Jour. Ocean. Engin. ,1992 ,17(1) :95
- [6] Edelson G S ,Tufts D W. IEEE Jour. Ocean. Engin. ,1992 ,17(1) :48
- [7] Nuttall A H. IEEE Jour. Ocean. Engin. ,1992 ,17(1) :26
- [8] Hansen R E ,Chapman S. Signal Processing for AUV based Interferometric Synthetic Aperture Sonar ,Oceans 2003 MTS/IEEE ,San diego