

编者按 声波是人类迄今为止已知可以在海水中远程传播的能量形式. 声纳(sonar)一词是第二次世界大战期间产生的,它是由声音(sound)、导航(navigation)和测距(ranging)3个英文单词的字头构成的. 声纳设备利用水下声波判断海洋中物体的存在、位置及类型,同时也用于水下信息的传输.

现代声纳的发明早于雷达. 1916年,法国著名物理学家 P. 朗之万发明了回声定位声纳,用他的设备可以在水下探测到 200m 之外的一块装甲板的回波. 雷达的发明则是 1935 年的事,当时英国科学家 W. 瓦特领导的研究小组利用电磁波反射原理探测到距离测试点约 12km 的飞机的回波.

声纳技术在国防和国民经济发展中具有十分重要的作用. 为了向读者介绍声纳技术的基本物理原理和应用情况,本刊从本期开始,以“声纳技术及其应用”作为专题,陆续发表系列文章(共 8 篇),从不同角度向读者介绍声纳技术领域的最新进展、研究成果和物理问题,希望能引起读者对该领域的关心和兴趣.

(中国科学院声学研究所 李启虎)

第一讲 进入 21 世纪的声纳技术*

李 启 虎[†]

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

摘 要 海洋开发和反潜战的需求是推动声纳技术开发的巨大动力. 水声物理、水声信号处理及相关学科的发展又促使声纳设计日趋完善. 文章介绍了声纳技术在进入 21 世纪时所面临的机遇和挑战,水声信号处理领域近期研究的热点问题以及声纳系统设计中的技术创新课题.

关键词 21 世纪,声纳技术,声纳信号处理

Sonar Technology of 21st Century

LI Qi-Hu

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

Abstract The requirements of ocean development and anti-submarine warfare is the main motivation of sonar technology study. The theoretical development and achievements in the area of underwater acoustic physics and underwater acoustic engineering make sonar system more and more complete. The opportunities and the challenges facing sonar technology in 21st century is described in this article. The hot topics of underwater acoustic signal processing and the innovation problems in sonar system design are also discussed.

Keywords 21st century , sonar technology , sonar signal processing

1 声纳技术面临的机遇和挑战

早期的声纳设计建立在较为理想的模型基础上. 无论是声纳设计者还是声纳使用人员,早就注意到声纳的性能与海洋环境密切相关. 但是,由于两个方面的原因,使声纳技术发展的初期采用了比较简单的模型. 第一个原因是人们对海洋中水声传播规

律的研究和认识有一个由浅入深、由表及里的过程. 虽然声纳的发明早于雷达 19 年,但是由于海洋环境的复杂特点,使声纳的发展在某些方面滞后于雷达^[1],这是丝毫不奇怪的. 第二个原因是由于硬件条件方面的限制. 20 世纪 50—60 年代,信息论已经为微弱

* 国家自然科学基金(批准号 60532040)资助项目

2005-08-10 收到初稿,2005-10-19 修回

[†] Email lqh@ocean.ioa.ac.cn

信号的检测提供了相当充实的理论基础和实用技术,但是这些理论的应用需要非常复杂的计算,而在那时硬件设备还无力提供这种支持。

自20世纪70年代以来,情况已经发生了很大的变化。微电子技术的发展使计算机硬件的面貌发生了巨大的改观,从而推动了数字信号处理领域的变革。

英特尔公司的创始人之一摩尔在1973年提出了支配半导体工业发展的一个规律,就是我们现在所说的摩尔定律。这个定律说,微处理芯片每隔18个月性能提高一倍,价格降低到原来的二分之一。据摩尔自己说,早在1964年他还在仙童公司工作时,就已注意到这一事实了。1996年,他又在IEEE Proc.上重新公布手稿,对自己的这一定律深信不疑(见图1)^[2]。

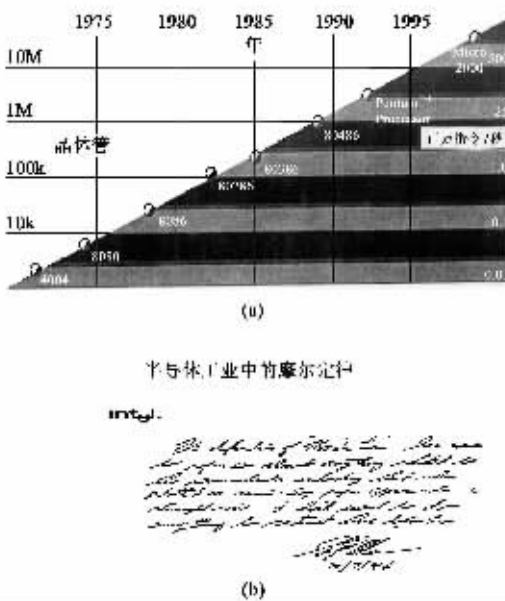


图1 (a)英特尔公司微处理器进展情况 (b)摩尔博士1996年重新发表著名的“摩尔定律”的手记[原文为“摩尔律”的定义已作为几乎所有和半导体工业有关的领域的基本准则。当我们在半对数坐标上作图时(器件性能和时间关系)就是一条直线,我无需作任何事情来限制这一定义]

微电子工业的这种迅猛发展势头,使得数字式声纳应运而生,并且使声纳设计者面临巨大的机遇和挑战。因为,作为数字式声纳硬件支撑的DSP芯片,似乎“无所不能”,过去很多受计算机能力限制的技术,现在都可以实现了。但是,很不幸,声纳的性能不仅仅依赖于硬件的能力,更大程度上依赖于主导声纳性能的建模技术、微弱信号检测算法、参数估计理论、人工智能等。

英国科学家福莱斯特在总结了微电子技术的这种惊人发展之后,在他所著的《高技术社会》中发出了感叹,他说^[3]:“如果汽车或飞机行业也像计算机行业这样发展,那么今天一辆罗尔斯·罗伊斯汽车的成本将只有2.75美元,跑300万英里仅用1加仑汽油,在20分钟内便可环绕地球一周。”1996年美国普林斯顿大学电子工程系主任刘必治教授来华演讲时作了类似的对比,他说:“如果汽车行业也像计算机行业那样,今天一辆可以坐4000人的‘小汽车’的价格应当是0.26美元。”

数字声纳设计者就是面临这样一种局面:硬件的发展向声纳设计者预示,只要你提出理论,我就能实现它,如果今天有一种目标识别的算法需要一个小时才能得出结果,那么10年之后,用不了1分钟就可完成。微电子技术的这种发展潮流也已部分地改变了信号处理理论的发展方向。20世纪60年代中期,当Cooley, Turkey提出FFT算法时,有关改进的算法非常多,哪怕提高计算速度10%或节省存储量10%的理论工作都还得到认可,但是10年之后,就没有人去做了类似的工作了,因为硬件的发展使得那种小小的改进黯然失色。

现在需要的是理论的创新,是那种能带来跨越式发展的新概念、新理论和新工艺。

2 需求牵引:声纳技术发展的推动力

声纳技术发展的最大用户是海军,即未来水下战的需求。Marburger在美国《防务新闻》(Defense News)周刊上提供了美国海军的一个有关安静型潜艇的辐射噪声的图^[1],表明美国在20世纪90年代的海狼级核潜艇噪声和俄罗斯改进的Akula级噪声相当。在近30—40年内,潜艇的辐射噪声大约每年下降0.5—1dB,从而使被检测的距离每年缩小0.5—2km,而声纳技术的改进弥补不了这一下降趋势带来的损失(见图2)。

潜艇降噪用的是综合的技术,即同时考虑消声瓦和本艇辐射噪声的控制^[5,6],称为CSMC(collaborative signature monitoring and control),防噪声辐射的核心技术是主动噪声和振动控制,即AMVC(active noise and vibration control)。为探测安静型潜艇,需要发展大功率、低频、宽带换能器,需要发展主/被动的拖曳式线列阵声纳,需要发展潜用的细长缆拖线阵声纳,需要研究更有效的水声通信方法及水下

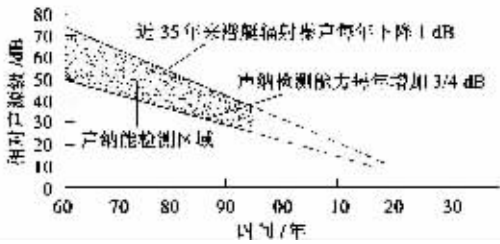


图2 潜艇辐射噪声和声纳检测能力

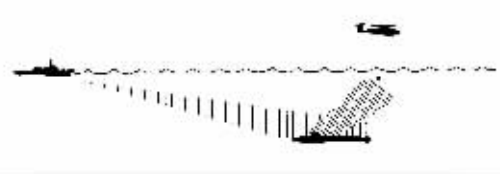


图3 水面舰艇和直升机联合反潜(双基地声纳)

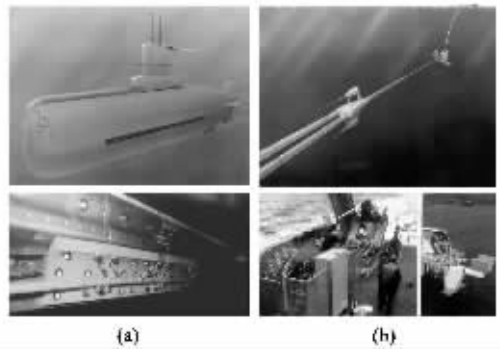


图4 (a)德国 ATLAS 公司舷侧线列阵声纳 FAS3-1 [基元数为 2×96 , 基阵长 48m, 频段 $\sim 2.5\text{kHz}$, 工作扇面为 $45^\circ\text{—}135^\circ$ (全功能), $10^\circ\text{—}170^\circ$ (降功能)]; (b)德国 ATLAS 公司研制的主动拖线阵声纳绞车和拖曳系统

定位技术等(见图3A)。

在寻找新型水声换能材料方面,有的研究者认为,镍合金和压电陶瓷材料的设计极限早在25年之前就达到了^[7]。所以人们开始研究稀土系列元素的磁致伸缩特性,这类材料能产生较大的声功率,并且可以在低频、宽带下稳定工作。

美国海洋实验室发现了一种镍和铁的合金,称之为 Terfenol-D 的磁致伸缩材料,据说已获得应用^[8]。这种 T-D 换能器具有良好性能,在合理使用时几乎不变形,样品经过 10^8 次发射仍完好无损,有可能成为下一代声纳发射换能器的首选材料。

在众多水听器中,近年来发展较快的是一种聚偏二氟乙烯(Polyvinylidene fluoride, PVDF)薄膜,这是一种柔顺压电材料,加工较方便,压电常数非常

高。目前已研制出厚度为 1—2mm,面积为 $30 \times 80\text{cm}^2$ 的薄膜面元水听器,它可以用于舷侧线列阵声纳中,其缺点是它的电压灵敏度对温度比较敏感。

由于声纳性能与海洋环境的密切关系,需要声纳设计者寻求一种新的体系结构,它能把海洋环境融入声纳的整体设计中,以便使声纳系统的性能对模型失配更宽容一些。这就是基于模型的声纳系统^[9—11]。

它是立足于宽容性检测的原理。任何声纳系统的设计都是基于某种模型的假设,然后在这种假设下寻求一种最佳的处理方法。当实际环境符合最佳处理的假设条件时,系统的增益很大,但是一旦模型失配,最佳检测器的性能迅速下降。而宽容性检测就不同,它虽然在理想条件下的增益不如最佳检测器,但是对模型失配却显得很“宽容”,具有相对来说变化不大的系统增益。研究模型失配的概念非常重要,可惜到现在为止,我们还无法在理论上回答模型匹配以及失配应如何从数值上进行刻划。

匹配场过滤的方法是较早被研究的宽容性检测方法之一^[12—14]。

宽容性信号处理的概念可以归结如下:假设 H 是一个可能的设计空间, Q 是可以选择的模型的集合,给出一个用于刻划系统失配的度量函数 $M(h, g)$, $h \in H, g \in Q$ 。传统的设计是对于特定的 $g_0 \in Q$, 求出 $h_0 \in H$, 使得

$$M(h_0, g_0) = \min_{h \in H} m(h, g_0).$$

这种系统实际上是适应环境 g_0 的匹配过滤器。如果 g_0 可以在某个 Q 的子空间内变化,即 $g \in P \in Q$, 那么我们自然关心

$$\max_{g \in P} m(h, g).$$

在这种情况下,采用极小极大策略是一种自然的选择,即

$$\min_{h \in H} \max_{g \in P} m(h, g).$$

所谓宽容性处理 h_R 就是:

$$\min_{h \in H} \max_{g \in P} m(h, g) = \max_{g \in P} M(h_R, g).$$

对声纳技术的需求还来自海洋开发。水声遥测始终是获得海洋环境参数的最重要手段之一。大洋测温、近海油气田的数字地震勘探、声层析、大洋海底金属矿的开采以及水气化合物的勘探开发都离不开声纳技术。

冷战结束之后,西方海洋大国对海洋的研究投入很大力量,同时把原来军用的一些海洋监测设施对外开放或转为民用。例如,美国就将东、西海岸的部分岸用站用于全球测温(ATOC)计划。

声纳技术在军、民两种需求的强力推动下,发展迅速,一些新的技术取得突破,有望在下一代的声纳系统中得到应用。

3 学科发展 声纳信号处理的热点问题

作为声纳技术的理论支撑的水声信号处理是一门综合性的边缘学科。它在发展进程中,既有自己的特色,又吸收了雷达、医学成像、通信、语音信号处理等其他领域的成果。1998年,IEEE信号处理分会为纪念协会成立50周年,编发了一篇专稿,即《水声信号处理的过去、现在与将来》^[15]。文章回顾了水声信号处理的发展历史,提出了一些有潜在应用价值的热点技术,如合成孔径技术、声层析、水声通信等。水声信号处理理论的发展面临着众多问题,相关和临近学科又不断产生一些新的概念,所以水声信号处理专家以积极而审慎的态度来对待它们^[16],一方面担心错过了应用新理论的机会,一方面又怀疑它们是否真的能在声纳系统中获得应用。这些课题是不胜枚举的,例如人工神经网络、混沌理论、小波变换、分维变换与时间反转算法等。我们在本节中就水声信号处理本身介绍若干热点问题。

3.1 被动测距

被动测距声纳是从20世纪70年代初开始研制的。从理论上讲,只要声纳基阵的孔径足够大,用三点阵测距是没有问题的。关键是三个基阵的声中心的相对延时精确测量出来(见图5)。



图5 美国 Lockheed Martin 公司研制的被动测距声纳 PUFFS

可以证明,被动测距的相对误差等于测延时的

相对误差,即

$$\frac{\Delta R}{R} = \Delta \tau / \tau.$$

根据这一公式我们就会明白被动测距声纳所面临的问题。举例来说,孔径为40m的基阵要测量相距为20km的目标,延时量大约为13μs。如果要求相对误差为10%,则延时估计误差不能大于1.3μs。在海洋环境中要做到这一点非常困难。Urick^[17],张仁等^[18]曾报道,海水中声传播起伏值就在10μs这样的量级,这就使得被动测距问题变得十分困难,因为要在接收到的大量数据中,剔除由不稳定性引起的“野值”(wild value),然后再进行平均。对延时测量精度的过高要求,还使得基阵的准确安装变得困难起来。目前还没有找到突破传统几何原理进行被动目标测距的有效方法。

3.2 合成孔径技术

合成孔径声纳的研制近十年来受到很大的重视。已经报道有相当高性能的样机问世^[19-21]。合成孔径作为一种技术在雷达上成功应用已近40年了,但在声纳上迟迟未获得实质性的进展。主要是由于声传播的海洋介质比无线电传播的大气介质复杂得多,另外声纳平台运动速度与声传播速度之比约为1:750,而雷达平台运动速度和无线电波传播速度之比是1:10⁶,所以合成孔径声纳的运动补偿、成像远比合成孔径雷达复杂。

合成孔径声纳(SAS)的初步研究结果是令人振奋的,它大约可以在400m的距离上达到10cm的分辨率。这在以前的旁测声纳中是无法达到的。

美国DTIC(Dynamic Technology Inc.)研制的样机在华盛顿(Washington)湖作试验时,甚至得到了一架早先沉没湖底的飞机残骸的“声像”(见图6)。

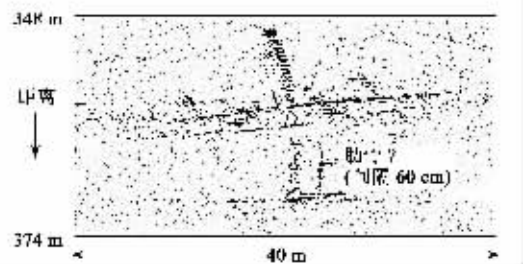


图6 PB4Y-2的SAS图像(1997年4月,华盛顿湖,50kHz的SAS穿透湖水看到了飞机内部)

合成孔径技术还用于高分辨率的波束成形,这在安静型潜艇辐射噪声的测量中可以获得应用,利

用这种技术可以把潜艇作为一个体积元,确定对辐射噪声最有贡献的分量的部位。

3.3 水声通信与水下 GPS

水声通信一直是声纳研究中的一个重要领域。美国和北约的其他国家有一系列研究课题是与水声通信有关的^[21-24]。水声通信系统的性能一直受到传输率和作用距离的约束。Kilfoyle 等根据美国几十次海试结果,给出了一条曲线,认为在现阶段传输率(R ,以 kbit/s 为单位)和作用距离(R ,以 km 为单位)的乘积不超过 $40^{[25]}$ (见图 7)。但在 20 世纪 70 年代初,这个值只有 5 左右。因为为了提高传输速率必须提高信号频率,而一旦频率增高了,传播损失增大,作用距离就下降了。所以

$$R \cdot R \leq 40 \text{ km} \cdot \text{kbit/s},$$

这在客观上反映了当前水声通信所达到的水平。如果要突破这个约束,就要增加发射功率,采用新的编码/解码体制和信道均衡技术。

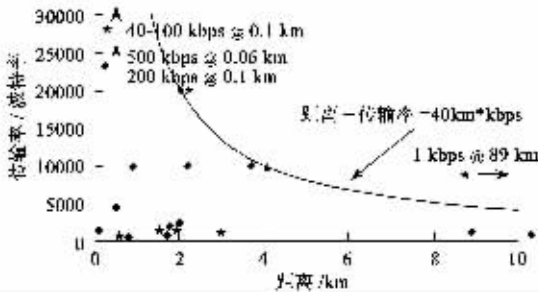


图 7 水声通信传输率与作用距离的关系曲线

水声通信的一个重要应用领域就是水下全球定位系统(GPS),虽然目前还只是一些设想,但一旦建立起完善的水下 GPS 体制,反潜战的一些战略、战术原则都必须随之改变。

3.4 数据融合

由于声纳系统的集成度越来越高,数据量越来越大,单靠声纳员处理多平台、多传感器的信息就显得很不够。所以数据融合的技术自然而然地受到重视。目前,虽然还不能完全做到全自动判别,但至少为辅助决策提供了强有力的工具^[26 27]。

数据融合从所处理的信息层次来分,可以分为三级,即基元级、特征级和决策级。研究课题的级别越到底层就越复杂。现在大多数的研究工作还是围绕决策级展开的。

数据融合中的一个基本定理,保证了声纳系统

进行数据融合的必要性,这个定理是说,无论是独立观测资料还是相关观测资料,最佳的线性数据融合所带来的误差不会大于任何个别观测资料所带来的误差^[28 29]。

基于这一事实,解决声纳系统的数据融合问题就有了理论依据。举一个具体的例子,假定潜艇上有圆阵和舷侧阵同时进行目标定位。我们知道,圆阵的定向误差基本上与信号入射方向无关,而线阵则不同,在侧射方向误差较小,在端射方向误差较大,把圆阵和线阵的数据进行融合,我们得到了很好的测向方法,它的误差不仅小于各自的定向误差,并且在 360° 范围内基本均匀。

3.5 目标识别与水下快速运动目标轨迹提取

数字式声纳的基本功能是测向和测距,目标识别的功能通常由声纳员通过鉴别目标辐射噪声来完成。随着声纳技术的发展,国外的一些声纳已具备目标识别功能,甚至专门配置鱼雷报警声纳。

目标识别和鱼雷报警是两个相关的课题,虽然后者可以抽象为水下快速运动目标的轨迹提取问题,但最后的判决仍离不开识别这一环节。

目标识别的关键当然是特征提取。只有对大量目标样本进行设计分析,才有可能确定合适的特征量。于是数据库的建立就是必不可少的,可惜这是缘于高度机密的信息,因而在一定程度上阻碍了识别研究工作的进度。能够在目标识别方面发挥作用的方法很多,如专家系统(最小邻近准则),人工神经网络、聚类分析等,但是目前还没有一种办法被公认为是解决目标识别问题的有效方法。其原因是实验室系统模拟的结果与实际海上的条件差异很大,要寻找出不受传播影响的信号特征非常困难。声纳工作平台的任何机动(这在实验室里不会出现)都会干扰目标识别系统的工作。

3.6 水下蛙人探测声纳(DDS)系统

2000 年 10 月,美国导弹驱逐舰 Cole 号在也门港口受到恐怖袭击,艇身受到重创。港口警戒问题引起重视。“911”事件之后,恐怖袭击遍及海陆空各个领域,港口警戒成为国土安全的重要课题。海军基地、大型集装箱码头、港口和 VIP(贵宾)浴场的保卫问题已成为水声技术研究的迫切任务。当然,我们需要的是海陆空的立体防护。但是在水下如何发现并阻止蛙人(包括有呼吸和无呼吸系统的潜水者),水下有人或无人载器的攻击显得尤为重要(见图 8 9)。



图8 C-TECH公司的DDS系统工作示意图



图9 Raytheon公司的DDS系统工作示意图

虽然从原理上讲,DDS也是传统意义上的主动或被动声纳,但是在声纳技术的应用上仍面临一些新的挑战。比如,DDS通常用于浅海,作用距离较短(例如1 km),这就使声纳工作于混响背景限制的状态,所以能抑制混响和抗多途效应的波形设计显得很重要;又比如,蛙人的目标强度较小(例如 $TS = -10$ dB),检测难度较大,等等。

4 声纳领域的技术创新

声纳技术是一门发展迅速、需求迫切、应用前景异常广阔的学科。它不是一门纯理论的学科,它的发展和完善依赖于大量的有准备的海上实验。由于基础研究的特殊性,需要较大的人力、财力投入。深入的基础研究是声纳技术创新的源泉。回顾声纳发展的历史就可以证明这一点。

如果没有对不同声速剖面下水声信号传播规律

的研究,就不会有变深声纳;如果没有对水声场的时空相关特性的研究,就不会有被动测距声纳;同样,对水声信道的研究为匹配滤波器、水声通信系统提供了正确设计的依据;内波、声层析、匹配场过滤又为远程被动定位技术提供理论支持。

只有技术创新才能实现跨越式发展,拖曳式线列阵的出现就是一个很好的例子。声纳设计者在21世纪初处于这样一种充满机遇和挑战的年代中,一定能取得新的突破、新的成功。

参 考 文 献

- [1] Kock W E. Radar, sonar and holography : an introduction. New York : Academic Press , 1973
- [2] Bondyopadhyay P K. Proc. IEEE , 1998 , 86(1) : 78
- [3] Forester T. High - tech Society, the story of the information technology revolution. UK Blackwell Ltd , 1987 (中译本 : 姚炳虞, 郑九振译. 高技术社会. 北京 : 新华出版社, 1991)
- [4] Marburger H. Stealthy Russian submarines will rival U. S. fleet. Defense News , USA , Sept. 11 , 1994
- [5] Hazell P A. Sea Technology , 1998 , 39(11) : 59
- [6] Hamblen N. Sea Technology , 1998 , 39(11) : 59
- [7] McTaggart B. Thirty years of progress in sonar transducer technology. Proc. UDT 'Paris 1991 . 1—11
- [8] Bright C. Sea Technology , 2000 , 41(6) : 17
- [9] Douglas J W. Sea Technology , 1996 , 37(1) : 11
- [10] Camdy J V. IEEE Oceanic Engr. Society News Letter , 2000 , 25(3) : 199
- [11] Porter M B. IEEE J. Oceanic Engr. , 1993 , 18 : 425
- [12] Kassam S A. Poor H V. Proc. IEEE , 1985 , 73 : 21
- [13] Gingras D F. IEEE J. Oceanic Engr. , 1993 , 18(3) : 253
- [14] Sullivan E J , Middleton D. IEEE J. Oceanic Engr. , 1993 , 18(3) : 156
- [15] Ed. Chen C T. IEEE Signal Processing , 1998 , 5(4) : 21
- [16] Ed. Stergiopoulos S. Advanced signal processing handbook. USA , CRC press , 2001
- [17] Urick R J. Multipath propagation and its effects on sonar design and performance in the real ocean. Proc. NATO ASI on Underwater Acoustics , 1976
- [18] Zhang R H *et al.* Acta Acoustica , 1981(1) : 9
- [19] Deviss B. New Scientists , 22 June , UK , 1996
- [20] Chatham R *et al.* The synthetic aperture sonar revolution. In : Proc. AUSI Conference , USA KONA , 2000
- [21] Stergiopoulos S. JASA , 1990 , 87 : 2128
- [22] Curtin T B. Sea Technology , 1999 , 40(5) : 17
- [23] Stojanovic M. IEEE J. Oceanic Engr. , 1996 , 21(2) : 125
- [24] Kilfoyle D B. Baggeroer B. IEEE J. Oceanic Engr. , 2001 , 25(1) : 4
- [25] Stotts S A *et al.* IEEE J. Oceanic Engr. , 1997 , 22(3) : 576
- [26] Sharma R *et al.* Proc. IEEE , 1998 , 86(5) : 853
- [27] Hall D L. Llinas J. Proc. IEEE , 1997 , 85(1) : 6
- [28] 李启虎. 声学学报 , 2000 , 25(5) : 385 [Li Q H. Acta Acustica , 2000 , 25(5) : 385]
- [29] 李启虎. 声学学报,待发表 [Li Q H. Acta Acusti(acin press)]
- [30] Middleton D , Esposito R. IEEE Trans. , 1968 , IT-14(3) : 434