# 干涉合成孔径声纳海试样机研制与试验

张 森，唐劲松，陈 鸣，白生祥
(海军工程大学电子工程学院，武汉 40033)

**摘要**：介绍了干涉合成孔径声纳海试样机的研制情况，重点阐述了其中的主要关键技术：实时干涉信号处理技术、高稳定性拖曳体设计以及高幅相一致性基阵设计，并给出了干涉合成孔径声纳的湖试和海试成像结果。结果表明：干涉合成孔径声纳海试样机系统稳定可靠，成功获取了海底的高精度数字高程图，距离分辨率达到 2.5cm，方位分辨率达到 5cm，高程测量精度约为 0.15m。

**关键词**：干涉合成孔径声纳；实时干涉信号处理；数字高程图
**中图分类号**： **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2012)-02-0167-07
**DOI 编码**：10.3969/j.issn1000-3630.2012.02.010

# Development and sea trial of interferometric synthetic aperture sonar

ZHANG Sen, TANG Jing-song, CHEN Ming, BAI Sheng-xiang
(*Electronic College of Engineering Naval University of Engineering*, *Wuhan* 430033, *China*)

**Abstract:** A prototype of Interferometric Synthetic Aperture Sonar (InSAS) for sea trial has been developed. The key techniques are described in detail, which include real-time interferometric signal processing, design of high-stable tow-fish and design of the hydrophone array with high amplitude-phase uniformity. The testing results in lake trial and sea trial show that the InSAS testing system is stable and robust for acquiring the precise Digital Elevation Model (DEM) of seabed with a resolution of 2.5 cm in across direction and 5 cm in along direction, respectively. And the measuring precision of DEM is about 15 cm.

**Key words:** Interferometric Synthetic Aperture Sonar (InSAS); real-time interferometric signal processing; Digital Elevation Model (DEM)

## 0 引 言

干涉合成孔径声纳(Interferometric Synthetic Aperture Sonar, InSAS)是一种新型的水下成像技术。它是在合成孔径声纳的基础上通过增加一副接收阵，得到两幅合成孔径声纳图像，通过比相测高的方法得到场景的高度信息，从而得到场景的三维图像。InSAS 兼备了合成孔径声纳分辨率和成像距离与工作频率无关的优点，并具有测深精度高的优点，对数字海洋开发具有重要意义。

从上世纪 90 年代开始，SAS/InSAS 技术取得了突飞猛进的发展，许多军用、商用系统纷纷推出。早期的包括 DAPPA(美国)[1]和 SAMI(欧洲)系统[2]。2003 年，美国海军系统作战中心装备了 NSWC-PC 系统，这是一种分辨率为 2.5cm 级的“慢速 SAS”系统[3]。新西兰研发的 Kiwi-SAS 系统有 4 型[4]，从 Kiwi-SAS I 到 Kiwi-SAS IV。比较成功的商业系统包括 AST/DTI 公司交付给美国海军研究局装在 MacArtney 公司的动态控制拖曳航行体上的 175 kHz 的 InSAS 系统、安装在 Remus600 上的 220kHz 的 SAS 系统以及交付给美国海军研究局安装在 Seahorse AUV 的 175kHz 的 InSAS 系统[5]。最成功的系统为挪威国防研究局(FFI)研制的 HiSAS 1030 系统，该系统安装在 HUGIN 1000 AUV 上，分辨率可达 2.5cm×2.5cm[6]。

国内在合成孔径声纳方面的研究起步较晚，干涉合成孔径声纳技术的研究单位更少，海军工程大学一直进行 InSAS 系统的研制工作，其在系统指标及图像质量上与国际基本同步。在国家 863 计划(2002AA639240 和 2004AA631120)的资助下，海军工程大学研制了干涉合成孔径声纳原理样机[7]和湖试样机[8]。在国家 863 计划 2007AA091101 的支持下，2007 年起开始研制干涉合成孔径声纳海试样机，于 2010 年顺利完成湖试和海试，获得了国内

**收稿日期**：2010-05-13；**修回日期**：2010-08-07
**基金项目**：国家“863”计划(2007AA091101)；国家自然科学基金资助项目(61072092 和 61101205)
**作者简介**：张森(1982－)，男，湖南岳阳人，博士，研究方向为干涉合成孔径声纳系统及信号处理。
**通讯作者**：张森，E-mail: johnson_xh@sina.com

首批干涉合成孔径声纳海试图像，并在国际上率先实现了全系统的实时处理。本文主要介绍干涉合成孔径声纳的系统设计与试验情况，并介绍干涉合成孔径声纳系统的若干关键技术。

## 1 水下拖曳式 InSAS 系统

InSAS 系统的基本原理在文献[7,8]中已有详细阐述。下面重点介绍我们研制的水下拖曳式 InSAS 系统的结构和基本参数。水下拖曳式 InSAS 系统包含三个子系统：拖曳子系统、信号处理子系统和显控子系统，系统结构如图 1 所示。拖曳子系统包括绞车、沉鱼和拖体，其中拖体为弱正浮力，无动力，长约 4.4 m，沉鱼用来定深，通过控制缆长、航速来控制拖曳深度。拖缆为光电复合铠装缆，声纳数据通过光缆构建千兆位以太网，将采集数据发送到信号处理子系统。信号处理子系统以刀片服务器为基础，共 10 个刀片 80 个核，刀片间通过 Infinitband 进行数据传输，采用磁盘阵列进行数据存储。显控子系统负责二维/三维图像显示、拖体运动状态显示以及拖体指令控制等功能。

拖体内包括声纳子系统、导航子系统和数据采集与传输子系统。声纳子系统包括收发基阵、水下控制中心、接收机、发射机。基阵位于拖曳体一侧，与垂线成 30º 夹角，另一侧采用配重平衡。两条接收阵阵长均为 2 m，每条接收阵包含 48 个阵元。发射阵位于两条接收阵中间。由数据采集与传输子系统采集接收机输出的信号，通过光缆发送数据至水面。导航子系统包括高精度光纤陀螺、声学多普勒计程仪(ADL)和深度计，分别测量拖曳体姿态、速度以及深度等信息。

为了降低数据量，并兼顾分辨率和测绘距离，本系统采用两种模式：低分辨模式和高分辨模式。低分辨模式测绘距离大，而高分辨模式测绘距离小。发射阵为两个阵元，低分辨模式时，两个阵元并联同时发射，高分辨模式时，只有其中一个阵元发射。系统参数如表 1 所示。

## 2 干涉合成孔径声纳的关键技术

### 2.1 实时干涉信号处理技术

实时信号处理是干涉合成孔径声纳走向实用

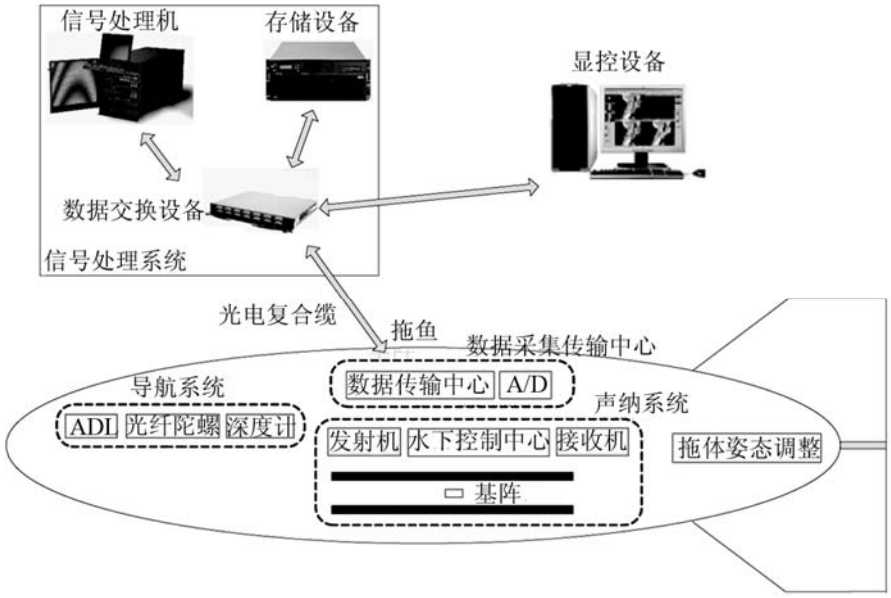



图 1 干涉合成孔径声纳系统结构图
Fig.1 Structure of InSAS system

表 1 干涉合成孔径声纳系统参数
**Table 1 Parameters of the InSAS system**

| 中心频率 | 基线长度 | 拖体运动速度 | 带宽 | | 成像距离 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 高分辨 | 低分辨 | 高分辨 | 低分辨 |
| 150kHz | 0.12m | 6 节 | 40kHz | 20kHz | 200m | 100m |

| 接收阵阵元个数 | 接收阵阵元尺寸 | 发射阵阵元尺寸(长×宽) | | 理论分辨率(距离向×方位向) | | 实际分辨率(距离向×方位向) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 高分辨 | 低分辨 | 高分辨 | 低分辨 | 高分辨 | 低分辨 |
| 48 | 0.04m×0.04m | 0.08m×0.04m | 0.16m×0.04m | 0.01875m×0.04m | 0.0375m×0.08m | 0.025m×0.05m | 0.05m×0.1m |

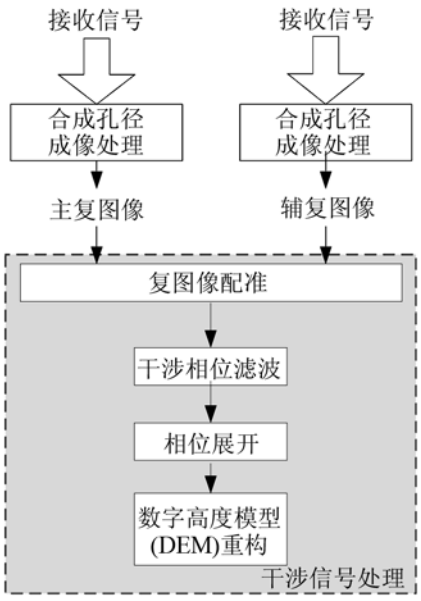



图 2　干涉合成孔径声纳信号处理流程
Fig.2　Flow chart of InSAS signal processing

化的关键技术。图 2 为干涉合成孔径声纳的信号处理流程。

如图 2 所示，干涉合成孔径声纳信号处理包括合成孔径成像、复图像配准、干涉相位滤波、相位展开和 DEM 重构等多个步骤，信号处理比较复杂，其中多子阵合成孔径声纳成像处理和快速稳健的相位展开处理是实时干涉信号处理的关键步骤。精确的成像处理是获得较好的三维图像的前提，合成孔径声纳的相对带宽、测绘带宽都比较大，而且为多接收阵系统，成像算法比单接收阵系统复杂得多。杨海亮等提出进行宽带耦合相位的补偿处理、宽测绘带的相位补偿处理和非均匀采样的重构处理，提高了干涉合成孔径声纳的成像质量[9]。张森等人提出一种基于 COMET-EXIP 的干涉相位估计方法，能够实现在存在配准误差情况下精确地估计干涉相位，且运算速度比同类方法提高了一个数量级[10]。而相位解卷是干涉信号处理中的另一个难题，学者们提出了很多不同的处理方法，例如枝切法、质量引导法、最小范数法、网络流法等等，但这些算法都存在性能与运算效率的矛盾。枝切法计算速度快，但性能不稳定，其他的性能较稳定但运算量随着图像的增大呈指数增大，这是实时干涉信号处理的瓶颈。钟和平等提出一种优先队列和质量

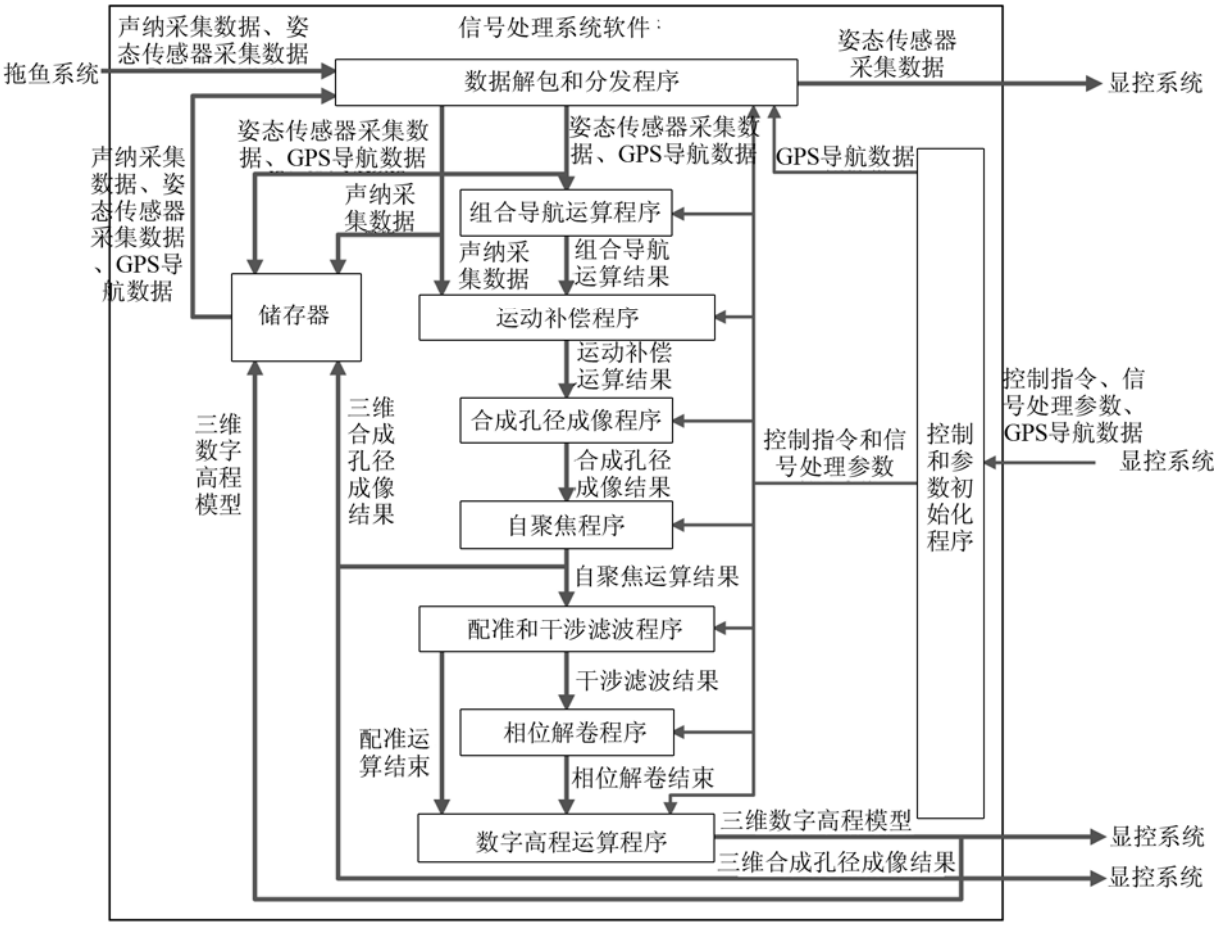



图 3　信号处理系统软件流程
Fig.3　Flow chart of InSAS software

图引导的解卷算法[11]，大大提高了质量引导法的运算效率，使其达到了枝切法的运算效率而同时保留了质量引导法的算法稳健程度，使干涉合成孔径声纳实时处理成为可能。

本系统中信号处理采用刀片服务器为平台，通过 MPI+OpenMP 的并行处理技术实现干涉合成孔径声纳的并行信号处理。MPI 实现进程与进程之间(即刀片与刀片之间)的并行处理，OpenMP 实现线程与线程之间(即刀片内核与核之间)的并行处理。信号处理的软件流程和与其他分系统连接图如图 3 所示。

## 2.2 稳定拖曳体设计

干涉合成孔径声纳要求进行匀速直线运动，因此，高稳定性拖曳体设计是干涉合成孔径声纳的另一关键技术。海洋常用的拖曳方式有重力拖曳、零浮力拖曳(含轻重缆、零浮力缆加定深器)方式。重力拖曳稳定性差，零浮力拖曳优点是稳定性好，但缆径大，绞车体积过于庞大，不利于装船。故选用分段式拖曳，这种拖曳系统的简图如图 4 所示。该系统的主要组成部分是：引导拖缆段、定深器、短尾拖缆段和拖体。

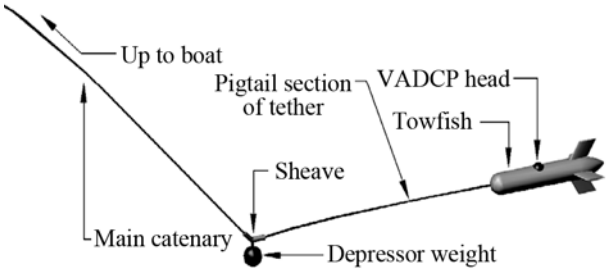
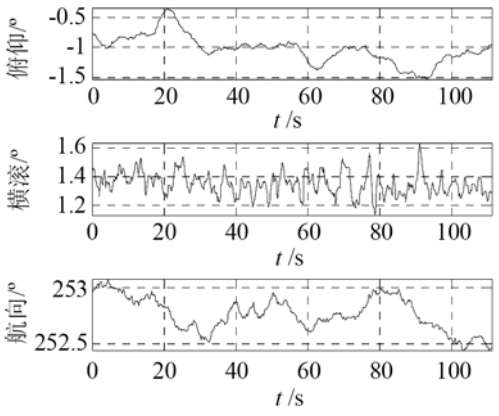


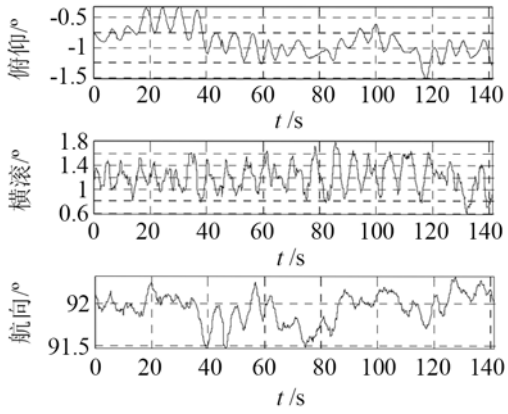

图 4 干涉合成孔径声纳拖曳示意图
Fig.4 Tow system of InSAS

深装置的作用是将水面船的水面运动与拖体隔离开来，从而减小了拖体的不稳定性。同时，定拖体本身接近零浮力状态，而系统的拖曳因素和定深因素都由前面的定深器来承担，拖体本身只受纵向阻力和短尾拖缆纵向拖力的作用，所有会引起拖体姿态变化的因素基本上都消除掉了，因此能够实现拖体的稳定和较高精度的拖曳。同时，由于拖体在定深器上方，因此可避免拖体本体与海底相碰的危险，保证了拖体的安全。

此外，为保证拖体的稳定性，在拖体上安装大面积的侧翼和尾翼，同时将基阵等载荷置于两侧，使重心降低。湖上试验和海上试验时，利用拖体中的高精度光纤陀螺 OCTANS 在拖曳时对拖体姿态进行了测量，测量结果如图 5 所示，结果表明：无论从湖试还是海试，拖曳系统都非常稳定，湖试中




(a) 湖试




(b) 海试

图 5 OCTANS 输出姿态数据
Fig.5 Output of OCTANS

俯仰摆动小于±0.6º，航向和横滚摆动约为±0.25º，海试中俯仰摆动±1º，航向和横滚摆动小于±0.5º。

## 2.3 高幅相一致性声纳阵设计

合成孔径声纳需要采用多接收子阵技术来解决由于声速慢导致的测绘宽度与测绘速度的矛盾，本系统每条接收阵包含 48 个阵元，长达 2 m，这种长条形的基阵如何确保水密性和幅相一致性是关键。水密性通过采取分段水密的方式进行保证。为了提高声纳阵的幅相一致性，接收阵单基元采用 1-3 压电复合材料，同时为了保证基阵壳体安装的平整度，设计上采用加强筋来确保加工后不变形，加工时采取多次退火处理保证加工精度要求。晶片采用磨床精加工，厚度误差控制在 0.02 mm 以内，模块基座厚度误差控制在 0.02 mm 以内，金属外壳平面度误差控制在 0.1 mm 以内。图 6 是发射阵的发射灵敏度曲线。图 7(a)和 7(b)分别是两条接收各阵元的接收灵敏度曲线，可以看出发射阵的发射灵敏度幅度一致性小于 1.5 dB，接收阵幅度一致性小于 2 dB。对于阵元的相位一致性，这里仅给出理论计算结果，各阵元的相位一致性约为 6.5°。

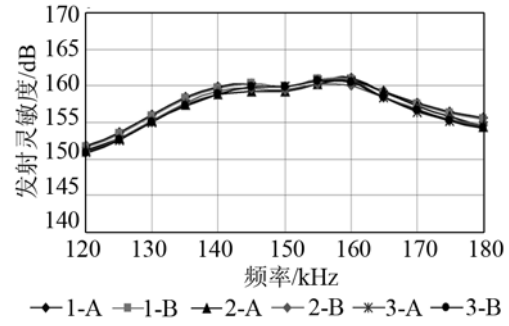
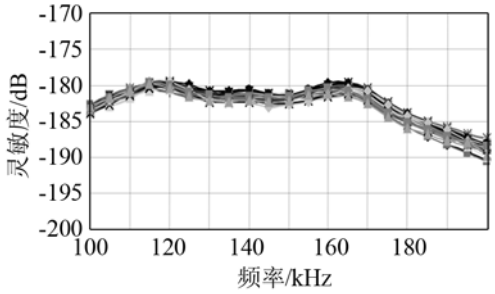
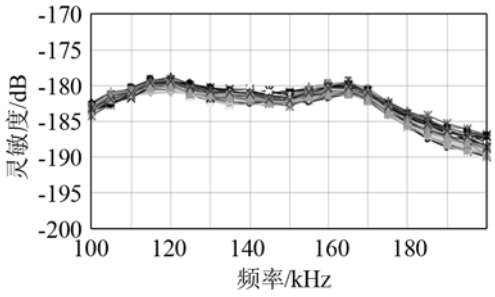



图 6　发射阵发射灵敏度曲线

Fig.6　Transmitting sensitivity of transmitting transducer




(a) 上排 48 路基元




(b) 下排 48 路基元

图 7　接收阵阵元灵敏度曲线

Fig.7　Receiving sensitivities of receiving transducer cells

# 3　水下拖曳试验及试验结果

## 3.1　试验方法

将绞车固定在试验船上，使试验船保持一定的航速航向做直线运动，从而使水下的拖曳体保持近似的匀速直线运动。通过传感器测量拖曳体的姿态、速度等信息，并利用这些信息对数据进行补偿，使成像运动轨迹为精确的匀速直线运动，从而获得高质量的二维和三维图像。干涉合成孔径声纳于 2010 年 7 月和 8 月分别在某湖和某海峡进行了湖试和海试。

## 3.2　试验结果

(a) 目标成像结果

试验目标为一个梯形水泥墩，上面 10 m 处悬挂两个浮球，尺寸示意图如图 8 所示。

图 9 为在某湖湖试的成像结果(低分辨模式)。从图 9 可见，湖底轮廓清晰，作用距离达到 210 m。图 10 为目标区域的放大图，可以看出，目标的形状、特征非常清晰，可以明显地看出目标的梯形结构，且两个浮球能够完全分开。

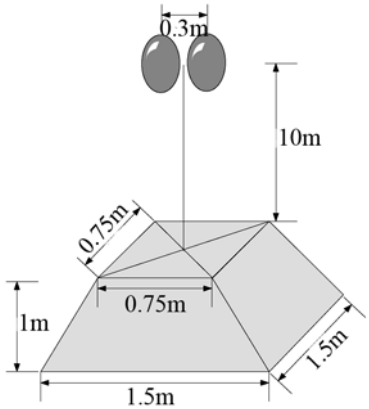



图 8　目标尺寸示意图

Fig.8　Sketch of target size

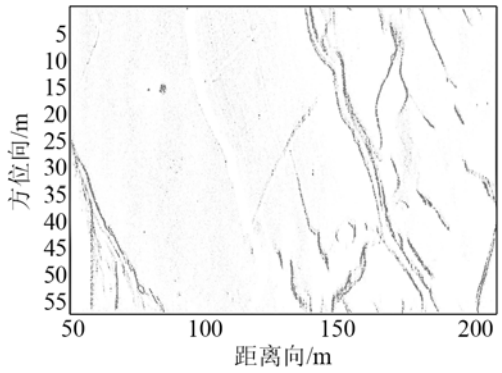



图 9　目标区域的二维图像

Fig.9　Two-dimension image of InSAS in target area

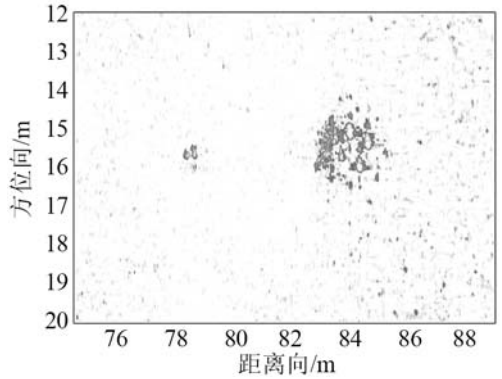



图 10　目标区域的局部放大图

Fig.10　Part enlargement of target area

图 11 为图 9 的三维 DEM 图，从三维图上测量得出浮球与目标的高度差为 10.1213 m。图 12 为梯形目标三维 DEM 图的局部放大图，可以看出，目标形状清晰可见，三维图较好地保持了梯形目标的形状。

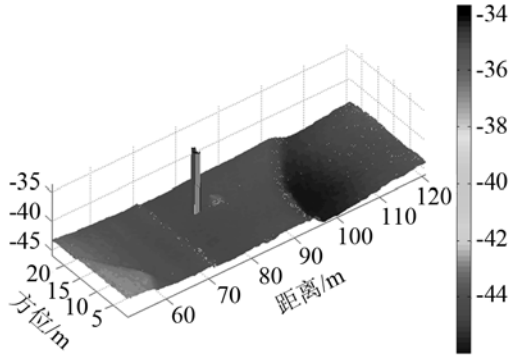



图 11 目标区域的三维 DEM 图
Fig.11 DEM of target area

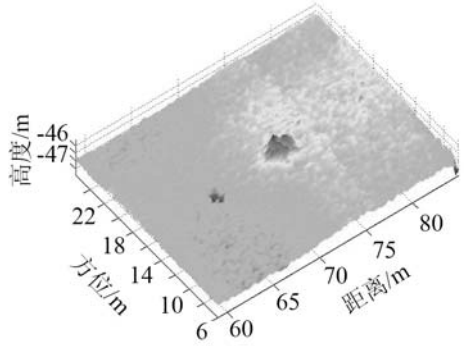



图 12 目标区域三维 DEM 图的局部放大图
Fig.12 Part enlarged DEM in target

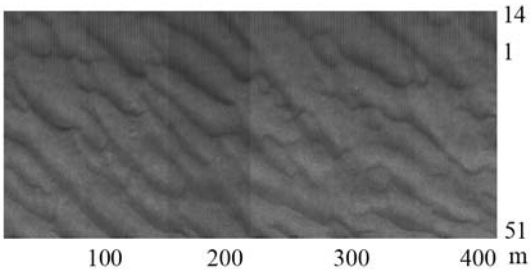



图 13 海试二维成像结果
Fig.13 Two-dimension seabed image from sea trial

图 14 海试三维成像结果
Fig.14 Three-dimension seabed image from sea trial

(b) 海底测绘成像结果

2010 年 8 月，研制的干涉合成孔径声纳系统在某海峡 22º32′00″N，118º35′00″E 进行了海上试验。图 13 和图 14 分别为海试的高分辨二维和三维成像结果。

(c) 图像分辨率分析

分别从高分辨图像和低分辨图像中选取一个点目标。低分辨点目标图像及剖面图如图 15 所示。从图 15 可以看出，低分辨图像距离向分辨力未 0.0378m，低分辨图像方位向分辨力为 0.0947m。

高分辨点目标图像及剖面图如图 16 所示。从图中可见，高分辨图像距离向分辨力为 0.0207m，

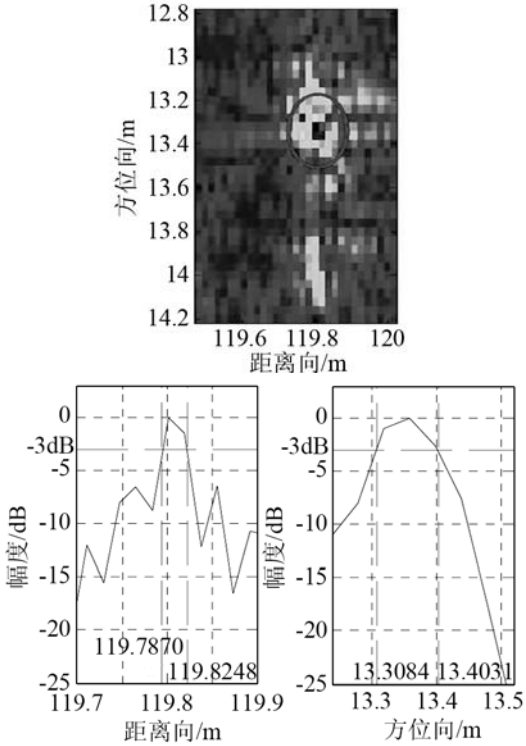



图 15 低分辨点目标图像及剖面图
Fig.15 A point in low resolution image and its cross-sectional view

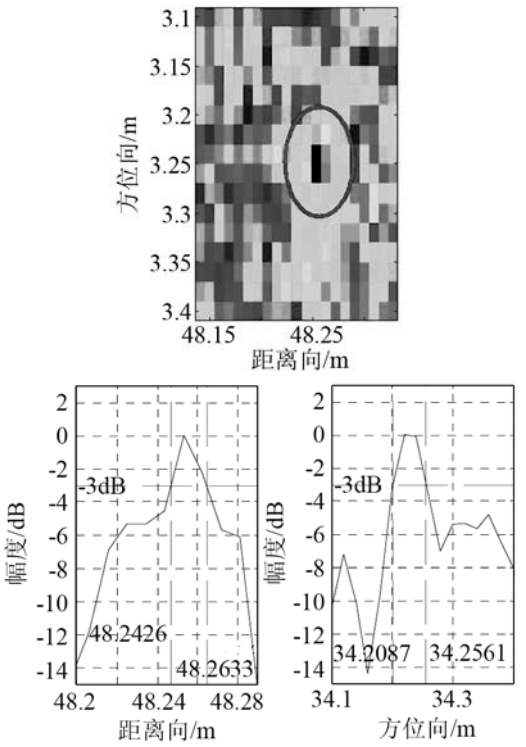



图 16 高分辨点目标图像及剖面图
Fig.16 A point in high resolution image and its cross-sectional view

高分辨图像方位向分辨力为 0.0474 m。

## 4 结 论

本文简要介绍了干涉合成孔径声纳海试样机的组成及主要关键技术，并给出了湖试和海试结果，进行了分辨率指标的分析，试验结果表明，系统达到设计指标，距离分辨率达到 2.5 cm，方位分辨率达到 5 cm，测深精度达到约 0.15 m。

### 参 考 文 献


[1] Neudorfer M, Kosalos J, Bonneau R. Results of synthetic aperture sonar experiments[C]// Proceedings of MES/IEEE OCEANS conference. 2000, **1**: 323-330.

[2] Chatillon J, Adams A E, Lawlor M A. SAMI: A low-frequency prototype for mapping and imaging of the seabed by means of synthetic aperture[J]. IEEE J. Ocean Eng., 1998, **24**(1): 4-15.

[3] Brown D, Cook D, Fernandez J. Results from a small synthetic aperture sonar[C]// Preceedings of MTS/IEEE OCEANS 2006.

[4] Hayes M P. A real-time beam steering system for KiwiSAS-IV[C]// Preceedings of Electronic New Zealand Conference, ENZCON2003, Hamilton, New Zealand, 2003: 27-32.

[5] Hayes M P, Gough P T. Synthetic aperture sonar: A review of current status[J]. IEEE J. Oceanic Eng., 2009, **34**(3): 207-224.

[6] SebΦT O, Callow H J, Hansen R E. Bathymetric capabilities of the HISAS interferometric synthetic aperture sonar[C]// Preceedings of MTS/IEEE OCEANS 2007.

[7] 邹志农，岳军，唐劲松. 干涉仪合成孔径声纳原理样机的研制与试验[J]. 高技术通讯, 2006, **16**(4): 414-419.
ZOU Zhinong, YUE Jun, TANG Jinsong. Development and trials of interferometric synthetic aperture sonar prototype[J]. High Technology Letters, 2006, **16**(4): 414-419.

[8] 岳军，田纪伟. 多子阵干涉合成孔径声纳[J]. 声学学报，2008, **33**(1): 51-55.
YUE Jun, TIAN Jiwei. Study on multi-subarray interferometric synthetic aperture sonar[J]. Acta Acustica, 2008, **33**(1): 51-55.

[9] 杨海亮，唐劲松. 基于方位非均匀采样的多接收阵合成孔径声纳 CS 成像算法[J]. 高技术通讯, 2009, **19**(9): 939-945
YANG Hailiang, TANG Jinsong. A chirp scaling imaging algorithm with non-uniform sampling in azimuth and without approximation of stop-and-hop for multiple-receiver synthetic aperture sonars[J]. Chinese High Technology Letters, 2009, **19**(9): 939-945.

[10] ZHANG Sen, TANG Jingsong. Image autocoregistration and interferogram estimation using extended COMET-EXIP Method[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remot Sensing, 2010, **48**(12): 4204-4218.

[11] ZHONG Heping, TANG Jinsong, ZHANG Sen, CHEN Ming. An Improved Quality-Guided Phase-Unwrapping Algorithm Based on Priority Queue[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, **8**(5):364-368.