第 35 卷 第 1 期
2016 年 1 月

应用声学
Journal of Applied Acoustics

Vol. 35, No.1
January, 2016

◇ 研究报告 ◇

松花江冰下声学试验技术研究*

殷敬伟[1,2†] 杜鹏宇[1,2] 朱广平[1,2] 张明辉[1,2] 韩 笑[1,2]
张 晓[1,2] 孙 辉[1,2] 生雪莉[1,2]

(1 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室 哈尔滨 150001)

(2 哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

摘要 北极区域极具战略意义与商业价值，随着各国的广泛关注，针对北极地区开展的科考科研活动逐渐增多。其中北极海域的相关研究尤为重要，特别是北极水声学，是保障北极军事存在以及正常科考科研活动的重要支撑。课题组于 2015 年 1 月在哈尔滨松花江进行了冰下声学试验，主要内容包括冰下信道测试、冰层散射系数测量以及冰下水声通信试验，实现了冰下半波导现象的初步观测、冰层前向散射系数的测量、基于能量检测器的低信噪比扩频通信、基于时反镜判决反馈均衡技术的高速水声通信以及冰下 12 用户多址水声通信等内容。本文对本次冰下声学试验情况进行介绍，并给出了相应的试验结果及经验总结。

关键词 北极水声学，冰下声学试验，冰层散射系数，冰下水声通信

中图分类号: O427 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2016)01-0058-11

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2016.01.009

The research of the under-ice acoustic experiment technology

YIN Jingwei[1,2] DU Pengyu[1,2] ZHU Guangping[1,2] ZHANG Minghui[1,2] HAN Xiao[1,2]
ZHANG Xiao[1,2] SUN Hui[1,2] SHENG Xueli[1,2]

(1 *Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin* 150001, *China*)

(2 *College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin* 150001, *China*)

Abstract Scientific investigations and research activities have been carried out in the arctic regions of many countries. They have extremely important strategic significance and commercial value. The related research about the Arctic Ocean is particularly important, especially arctic hydroacoustics that is the significant support to guarantee military presence and normal scientific research activities. The first domestic under-ice acoustic-experiment research was conducted in the Songhua river of Harbin in January 2015. The under ice channel test, measurement of ice scattering coefficient, and under ice acoustic communication experiment are mainly included in the experiment. The preliminary observation of the half waveguide phenomenon, the ice forward scattering coefficient measurement, the spread spectrum communication under low signal-to-noise ratio condition based on energy detector, high speed underwater acoustic communication based on time reversal mirror combined with decision feedback equalization, 12 users under ice multiple access underwater acoustic communication have been all realized. Technologies about the under-ice acoustic-experiment are introduced in this paper, and the corresponding experimental results are presented.

Key words Arctic hydroacoustics, Under-ice acoustic experiment, Ice-scattering coefficient, Under-ice acoustic communication

2015-05-21 收稿; 2015-11-03 定稿

*国家自然科学基金项目 (51179034, 61471137, 11204051), 船舶预研支撑技术基金项目 (13J3.1.5), 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (heucfd1506, heucfx1505), 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放课题基金资助项目 (LP1501)

作者简介: 殷敬伟 (1980-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 研究方向: 水声通信及信号处理。

† 通讯作者 E-mail: yinjingwei@hrbeu.edu.cn

1 引言

受全球气候变暖影响，北极海冰融化加速，为开辟新航道提供了可能，对我国来说，增加了一条更为便捷的从我国到达欧美的航线；这一地区蕴含丰富的石油、天然气等矿产资源，冰层变薄也有利于勘探与开发[1]。同时，由于北极水域常年被冰层覆盖，为战略核潜艇提供了天然的隐蔽场所，极地军事的存在将大大加强全球打击的覆盖区域以及战略威慑能力。基于这些因素，美国、加拿大、俄罗斯和北欧多国围绕北极角力日渐升温，2009年俄罗斯潜水艇潜入北极点附近海底并插上钛制国旗；2011年美国的两艘核潜艇在北极进行了联合军事演习，2014年美国主管海军基础研究的海军研究室在公布研究计划时明确了三大学科，即：浅海声学、深海声学以及极地声学[2]。我国自上世纪90年代以来先后对北极进行了6次考察，2004年建立了第一个科考站——北极黄河考察站，2013年中国正式成为北极理事会“永久观察员国”。此后，我国在北极的权利与义务不断增加，表现在北极事务中发言权的增加。2014年，我国石油企业(中海油、中石油)在北极地区取得资源开发资格。

随着北极的战略地位的提高，在北极水域的活动必将增加，人们对北极将产生强烈的认知需求。在北极及其毗邻海域，由于冰盖与水下冰脊的存在，给潜艇、UUV等水下航行器直接利用卫星系统进行通信和导航带来了极大的困难，使得水声方式成为潜艇、UUV等水下航行器在冰下航行唯一可靠的信息传输及探测导航手段。

西方发达国家及前苏联对于冰层内及冰层对水下声传播的影响做了大量的研究工作。西方发达国家对极地声学的研究开展相对较早，并在冰下声传播方面取得了一些成果。其中，Burke J. E. (1966年)研究了无限长半椭圆截面圆柱随机分布在刚性或者绝对软平面上含有冰脊的冰下声学散射模型[3]；Mayer W.G.(1975年)计算了冰水界面时的声反射损失[4]；美籍华裔学者Yang T.C.测量了低于1 kHz频率的北极冰层的声反射[5]；Diana F. M.把冰层作为弹性分层介质，计算了平面波入射时的声反射系数[6]；Bush G.测量了南极海冰的声压反射系数[7]。前苏联早在上世纪50年代就已关注了冰层中的声传播问题，90年代在《Akusticheskij Zhurnal》期刊上发表了较多的关于冰层反射的研究论文，通常是把冰层界面作为平面界面考虑；近年来也在持续研究冰层中的有关声传播问题，Zaslavskii Y. M.和Zaslavskii V. Y.在河冰上进行了冰层中弯曲波传播的实验研究[8]，Maksimov A.O.研究了冰层中含有气泡时的声传播特性[9]。

对于冰水界面的大小尺度的粗糙性对水下声散射、反射特性的影响，美国ONR等研究机构开展了大量的相关研究。如Burke J. E.和Twersky V.主要研究了无限长半椭圆截面圆柱随机分布在刚性或者绝对软平面上含有冰脊的冰下声学散射模型[10]；Diachok O. I.基于Burke-Twersky模型，详细研究了不同频率下的声反射损失与冰脊深度、宽度、个数分布密度及观测角之间的关系[11]；Bishop G. C.分别对冰脊以及平坦冰层进行了特征分析[12]；Meredith R. W.进行了冰下宽带频率声相干性测量，采用爆炸声源测量了冰下直达声和冰粗糙界面反射声的相干情况[13]；Wolf J. W.采用了扩展Burke-Twersky模型对冰下反射损失进行了建模研究[14]。

冰下水声信息传输及指令遥控方面，Freitag L.在Oceans会议上发表了冰下水声通信研究报告，在通信距离为70 km范围内实现了通信速率为510 bps的相干水声通信试验[15]；美国伍兹霍尔海洋研究所与Benthos公司合作，为在极地水域进行探测时主要依托的水下滑翔机及自主式水下机器人等观测载体提供水下声学导航与水声通信的设备支持[16−18]。

自上世纪90年代以来，我国对探索北极表现了极大兴趣，并先后进行了六次北极考察，积累了大量有价值的极地海洋观测数据，中国极地研究中心、中国科学院、国家海洋局和中国海洋大学等单位近些年先后发表了一些有关北极考察的研究成果，但大都集中在海冰观测、海冰厚度测量及大气变化等研究上[19−24]。令人鼓舞的是，2014年7月开始的第六次北极考察，首次设置了水声学方面的内容，尤其是，2014年12月中国科学院李启虎院士等撰写的《北极水声学：一门引人关注的新型学科》[25]一文，为水声学的研究指明了一个新的充满机遇与挑战的方向。

哈尔滨工程大学水声工程学院殷敬伟教授课题组于2015年1月在哈尔滨松花江进行了国内首次冰下声学试验。东北冬季拥有较长的湖、河冰封期，为试验提供了天然的条件。课题组分别进行

了冰下水声通信试验(包括扩频、单载波、OFDM、Pattern时延差编码等)、冰层声散射系数测量试验及冰下声信道测试试验。相关内容于2015年5月在第169届美国声学会议(169th ASA Meeting)上进行了主题发言，题目为《Experimental demonstration of under ice acoustic communication》，该报告被大会选为具有潜在报道价值的研究(Identified as being potentially newsworthy)，因此受邀撰写该文的通俗版本以供美国公用无线电台(National Public Radio)、新科学家杂志(New Scientist)、国家地理杂志(National Geographic)、美国科学杂志(Science)等机构报道，可见我国冰下声学试验受到了美国同行的重视。本文将首先对本次冰下声学试验的准备过程到试验阶段进行详细介绍，随后给出相应的试验结果。

2 冰下声学试验

极地环境的特殊性对水声设备及其应用带来诸多影响。(1) 极地长期低温工作环境对水声装备总体性能产生影响，湿端及硬件系统既需要适应低温又需要适应温差骤变(空气中 −40°C 左右，水中温度 2 °C 左右)的条件要求。(2) 极地复杂、特殊的声场特性对水声设备性能的影响，包括其独特的由正梯度声速剖面所形成的半波导声道以及声道轴、汇聚区、阴影区现象，冰下粗糙界面所具有的大尺度的不连续性、小尺度的非均匀性及各向异性现象产生的复杂混响特性，以及背景场受冰盖破裂、碎冰碰撞及冰盖应力变化影响的特殊噪声场。(3) 未知的极地冰下冰貌对冰下潜器航行及水声设备布放的影响，大量存在的冰脊、冰沟及浮冰等进一步增加了工程实现难度。

为开展冰下声学试验，与传统的水下声学试验相比，需要考虑：(1) 寒冷条件下如何快速构建试验临时基地；(2) 变换不同接收点测试时，临时试验基地的机动性问题；(3) 长期低温工作条件下测试仪表、水声设备的防护问题以及确保工作性能；(4) 冰上作业时人员安全问题。为此，冰下声学试验要严格按照以下原则进行：(1) 避免所有仪器设备包括连接线路暴露在寒冷户外；(2) 所有仪器和试验人员避免长时间接触冰面；(3) 保证冰水之间的设备连线不与冰接触，仪器出水立刻擦拭；(4) 依据水文局数据选择冰上安全试验区，确保仪器设备和工作人员的安全。

2.1 冰下声学试验概况

本次冰下声学试验是在哈尔滨松花江进行的。松花江是中国七大河之一，是黑龙江在中国境内的最大支流。松花江1月份室外平均温度在 −20°C 左右，江面上冰厚度为0.3~0.5 m，深度为6~10 m。图1(a)给出了松花江局部卫星图，图1(a)中标注了本次冰下声学试验发射点和接收点。试验中，发端点不动，选定为水文码头，如图1(b)所示；接收端选在距离发射点200 m至1000 m范围内，在每个接收端接收信号时均需要搭建临时试验基地。

试验主要内容为：冰层声散射系数测量试验、不同通信体制不同编码方式的冰下水声通信试验以及冰下声信道测试。试验的一个主要目的是积累外场冰下声学试验技术(包括低温仪器设备使用、冰区试验基地搭建、相关作业施工等)，探究冰下声信道特性，验证性开展相关水声技术冰下适用性研究，为后续冰下声学研究及外场试验奠定基础。

(a) 松花江局部

(b) 水文码头

图1 冰下声学试验简介

Fig. 1 Under-ice acoustic experiment configuration

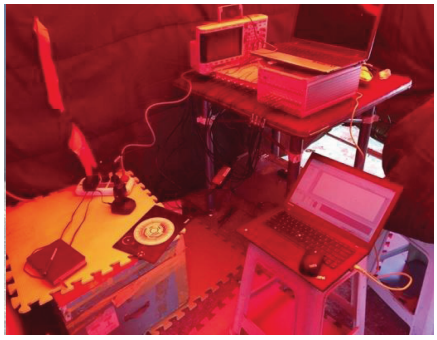
2.2 临时基地搭建

冰下试验临时基地分为发射端临时基地和接收端临时基地：发射端临时基地选定在码头固定不动，接收端临时基地为搭建在江面上的帐篷，可根据

试验需要随时移动。试验中发射端码头基地电力由码头岸电提供，基地内配有电暖气，保证室内温度在 15 °C 左右；接收端帐篷临时基地电力由汽油发电机提供，基地内部通过燃烧蜂窝煤保证帐篷内的工作温度在 5 °C 左右。

图 2 为接收端的临时帐篷基地，其中图 2(a) 中的帐篷搭建简单易实现。经过长期训练，四个人在 5 分钟内即可快速完成搭建工作，以提高接收端临时帐篷基地的机动性和减少试验人员及试验仪器的受冻时间。图 2(b) 为接收端临时帐篷基地内部，在冰面上均铺上了隔热毯和泡沫地板，保证试验工作人员和仪器设备不与冰面发生接触。接收端临时帐篷基地由汽油发电机供电，汽油发电机发电时将产生大量废气，同时发电机工作产生的噪声对试验工作人员将产生较大干扰，因此不可放置在临时基地内。当汽油发电机工作时，由于其自身产热，可以保证其在 −20 °C 环境下正常工作；当汽油发电机停止工作时，不可将其长时间暴露在外，否则会因低温导致发电机短时间内无法再次启动。

(a) 接收端临时基地



(b) 临时基地内部

图 2　接收端临时基地搭建

Fig. 2 Building terminal receiving base

2.3　冰下试验仪器设备

本次冰下声学试验发射端采用的发射换能器如图 3 所示。试验中，需不断改变吊放换能器以发射不同频带信号，在更换发射换能器时要注意换能器要边出水、边擦拭，同时及时将发射换能器放置室内。在吊放中，换能器连线不能与冰面接触，图 4 给出了冰下声学试验中发射换能器实际布放情况。由于 20∼40 kHz 发射换能器要完成冰层声散射系数测量的任务，需要确定发射姿态，因此 20∼40 kHz 换能器采用刚性连接布放，如图 4(a) 所示。其他发射换能器主要完成冰下声学通信和冰下声通信信道测试任务，故而采用柔性连接直接吊放的方式，如图 4(b) 所示。从图 4(a) 可以看到，我们制作了一个带有 “U” 型槽的方形钢板，配合 “U” 型卡使用可使得 20∼40 kHz 换能器根据需要任意改变布放深度，

(a) 2∼8 kHz

(b) 8∼20 kHz

(c) 20∼40 kHz

(d) 40∼80 kHz

图 3　不同频带的发射换能器

Fig. 3 Transmitting transducer with different frequency bands

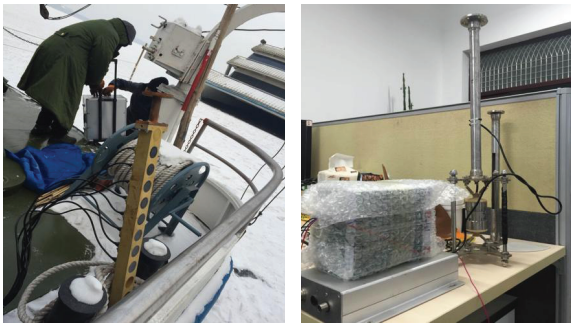
(a) 刚性连接布放

(b) 柔性连接布放

图 4　发射换能器布放

Fig. 4 Laying transmitting transducer

同时保持与冰面垂直的姿态。图4(b)则是严格遵守冰下试验原则，通过一个废弃轮胎保证发射换能器连线不与冰面接触。接收端采用垂直阵接收，如图5(a)所示，此外还采用了矢量水听器接收，如图5(b)所示。



(a) 垂直阵　　(b) 矢量水听器

图5　接收换能器

Fig. 5 Receiving transducer

3　松花江冰层声散射系数测量试验

3.1　冰层高频声散射系数测量试验概况

冰层覆盖下的水声环境具有复杂性和特殊性，体现在：一是北极冰层具有复杂的结构，其具有分层和各向异性的特性，因此冰层对水下声传播的影响明显不同于常见的水-空气边界的影响；二是水-冰界面具有大、小尺度的非均匀性和不连续性，对不同频率的声波具有不同的散射、反射特性，这将对冰下声道中水声通信产生严重的影响。因此，若要充分发挥声纳设备在极地环境的作用，就有必要深入了解冰层对声波的反射、散射特性。课题组目前所做工作旨在尝试性、验证性实验，主要目的是积累冰层的实验测量技术、经验及相关数据，为后续深入研究打下基础。

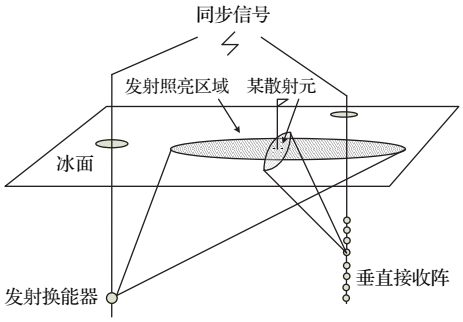


图6　冰层声散射系数测量试验布局示意图

Fig. 6 Schematic layout of ice scattering coefficient measurement experiment

冰层散射系数测量试验布置如图6所示，发射点距接收点水平距离6.7 m，冰层厚度0.3 m，水深6 m。发射换能器水下3.1 m，向上仰视角度60°，接收阵中心位于水下0.54 m，接收阵为8元垂直阵，阵元间距0.07 m，收发方向相对，即接收前向散射。接收阵可上下移动，实验中移动8次，间隔0.2 m一次，共9个站位。发射信号为CW脉冲，中心频率分别为27 kHz、32 kHz、37 kHz、42 kHz、47 kHz，填充10个完整波形。每个频点10次采样，45组数据，共450个样本。

3.2　高频声信号时空结构

依据声程时间和接收阵指向性，以数据AD7cw32k(频率为32 kHz的CW脉冲信号接收数据)为例分析声信号时间、空间结构。图7为各通道采集数据，通道1、3由于寒冷导致换能器损坏，未接收到信号。图8为32 kHz高频声信号到达的时空结构，图8中当俯仰视角为0°时为平视。

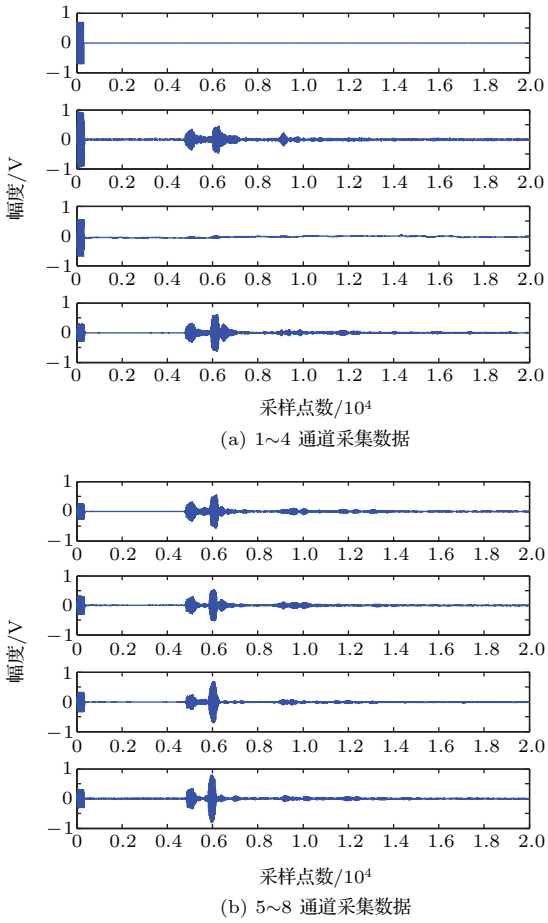


图7　各通道采集数据

Fig. 7 Data acquisition of eight channels

由图 8 可知，直达声出现位置为 4.8 ms，冰面反射出现的时间为 5.9 ms、角度为 40°，经过一次反射后在界面处散射的信号出现在 9 ms。由于阵元间距大于半波长，所以存在栅瓣，理论计算其距主瓣 45°，主瓣 3 dB 束宽为 7°，如图 9 所示，因此，在图 8 中俯仰角为 0° (平视) 且声程时间 5.9 ms 时，冰面反射进入到栅瓣，被接收阵接收。同理出现在俯仰角为 24°、声程时间 4.8 ms 处的波为接收阵栅瓣接收到的直达声。

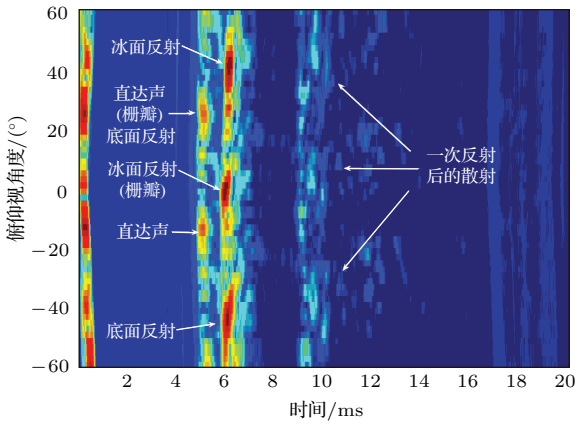


图 8　数据 AD7cw32k 的声信号时空结构

Fig. 8 Acoustic signal temporal structure of acoustic signal temporal structure

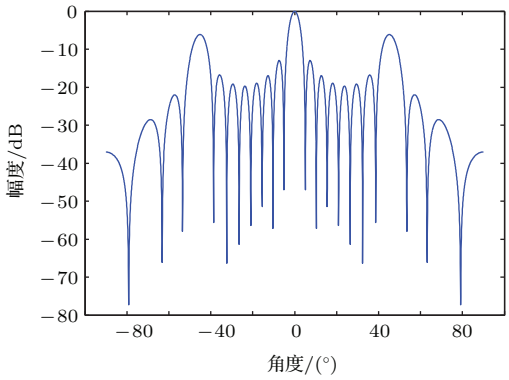


图 9　理论计算接收阵的自然指向性图

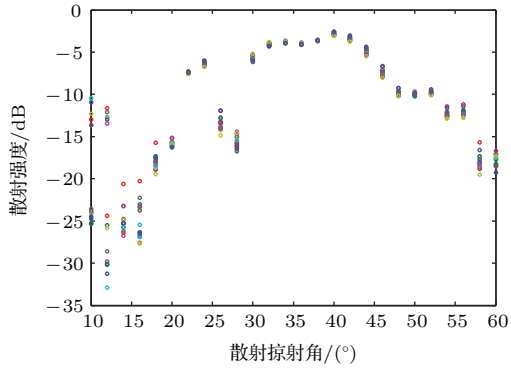
Fig. 9 Theoretical natural directivity diagram of receiving array

3.3　前向声散射强度测量结果

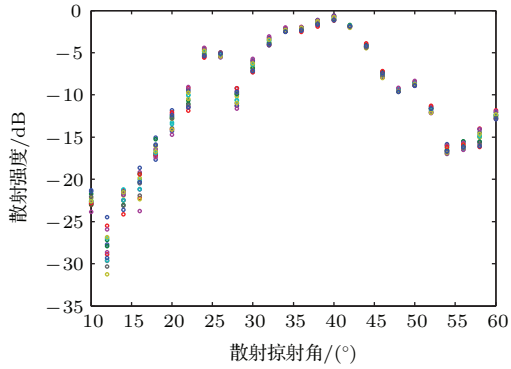
采用 AD7cw 数据组，每组样本 15 个，估算前向散射强度。由于发射距冰面较近，得到的前向散射强度应理解为球面波入射下的前向散射强度，处理结果如图 10 所示，分别为 27 kHz、32 kHz 和 37 kHz 的前向散射强度。

由图 10 可知，在 40° 左右有较强的散射，这是由于在该角度下的散射强度含有反射波的缘故，且由于接收波束有一定的宽度，因此在 40° 附近范围内均能接收到反射波。在较小的掠射角下，由于信噪比较低，所以处理得到的散射强度离散度较大，而在反射点附近，由于信噪比较高，散射强度离散度很小。

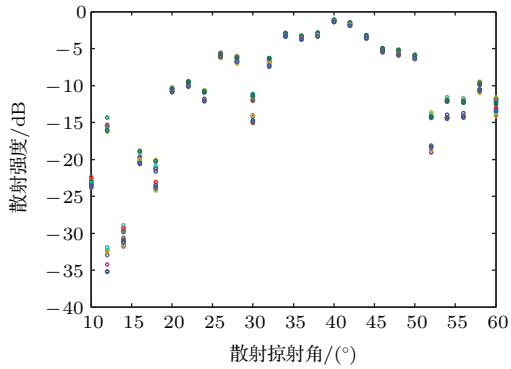
由于缺少冰下表面的粗糙程度、冰层的物理参数，且存在信号信噪比低和设备损坏等原因，实验结果暂无法与理论结果相比较，但从初步的实验结果



(a) 27 kHz



(b) 32 kHz



(c) 37 kHz

图 10　前向声散射强度测量结果

Fig. 10 Measurement results of forward scattering intensity

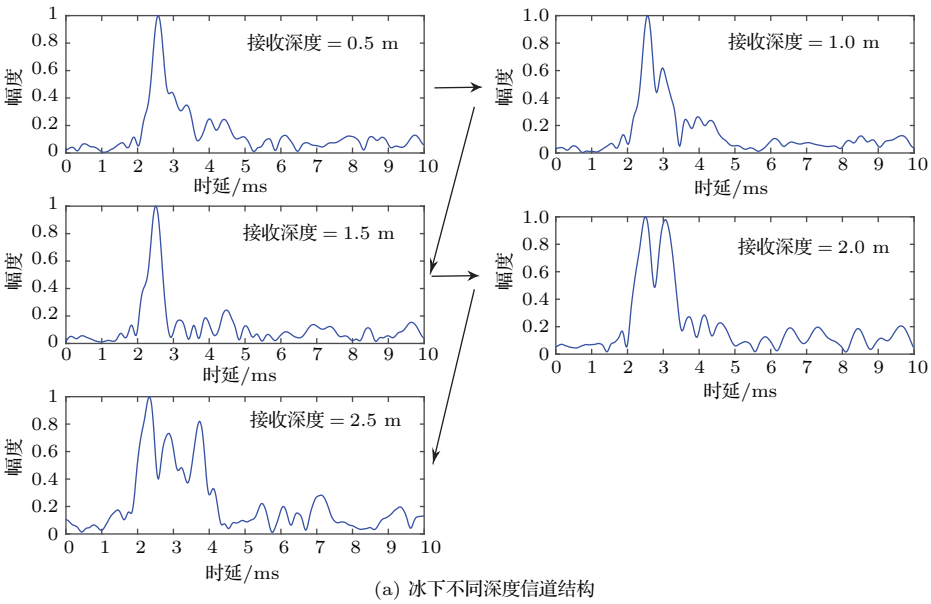
来看，前向散射系数随散射掠射角的变化趋势是符合一般界面散射特性规律的。然而，对冰层特性研究，课题组还要基于目前采集的数据进一步深入分析，并相应开展更为精细的实验对其本质进行深入研究，积累更多的相关理论和实验技术，这也是课题组后续努力的一个方向。

4 松花江冰下水声通信试验

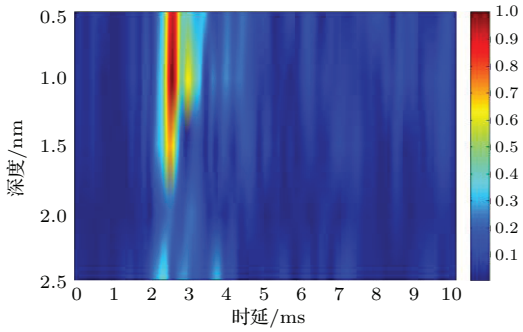
本次冰下试验进行了多种不同体制、不同编码方式的水声通信试验，本文所重点关注内容为以下三点：(1) 低信噪比冰下水声通信；(2) 近程冰下高速水声通信；(3) 冰下多址水声通信。因此，本节仅针对以上三点给出相应的试验处理结果，其他通信实验结果将在后续研究成果中给出。另外，在本次冰下通信试验中，通信系统所选频带为常规水声通信系统所用频带，通过 2~8 kHz 的发射换能器发送。

4.1 松花江冰下水声通信信道特性分析

图 11 给出了通信距离为 1 km，不同冰下深度对应的冰下信道实际测量结果，测试信号的频带为 2~8 kHz。图 11(a) 为不同冰下深度测得的信道结构图，为了便于说明，分别对不同冰下深度的信道进行了幅度归一化处理。可以看到，在距离冰层表面的信道结构简单，随着深度增加，信道结构开始变得复杂；图 11(b) 为不同冰下深度测得的信道能量归一化输出结果。可以看到，冰下信道的能量集中在距离冰层下表面处，随着深度的增加，接收能量越来越小。实验中声速剖面仪冻坏无法进行声速梯度测量，但松花江水深较浅且水温近似等温，因此可分析得到松花江声速应呈微小正梯度分布。由于水深较浅，试验中声线会触及底部发生反射，但是通过测试



(a) 冰下不同深度信道结构



(b) 冰下不同深度接收能量

图 11 冰下不同深度水声信道实测结果

Fig. 11 Measured results of under ice acoustic channel at different receiver depth

结果仍然可以看到冰下声传播能量集中在冰下表面附近处，这为后续在深水域验证半波导现象提供了试验依据。

图 12 给出了 1 km 处冰下水声信道观测结果，由于被冰层覆盖，上边界十分稳定而非像无冰层覆盖的其他海域的上边界起伏不定，因此冰下水声信道十分稳定。同时，冰层提供的稳定上边界条件使得冰下相干水声通信将不会受到载波相位跳变影响，有助于提高相干水声通信系统的性能。

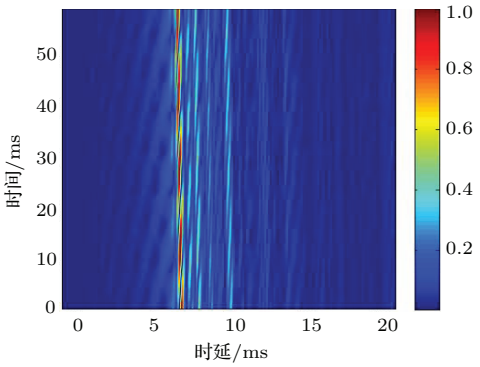


图 12　冰下实测水声信道特性

Fig. 12 Under ice acoustic channel characteristics

4.2　松花江冰下低信噪比水声通信

由于松花江水域有限以及试验条件的限制，仅能在 1 km 范围内进行冰下试验。因此，对采集的冰下数据人为叠加噪声以实现低信噪比水声通信，进而模拟冰下远程水声通信。在低信噪比条件下，即使是直扩系统也将面临巨大的困难来完成解码。课题组在接收端采用能量检测器技术，使得直扩系统在低信噪比条件下正常解码变得简单易行。检测器原理图如图 13 所示，接收信号经过解调后以每两个扩频符号为单位分别与本地参考扩频序列进行相关运算，经过峰值选择后，通过比较相关器输出相关峰能量大小来进行解码。

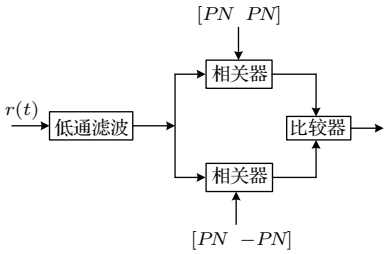
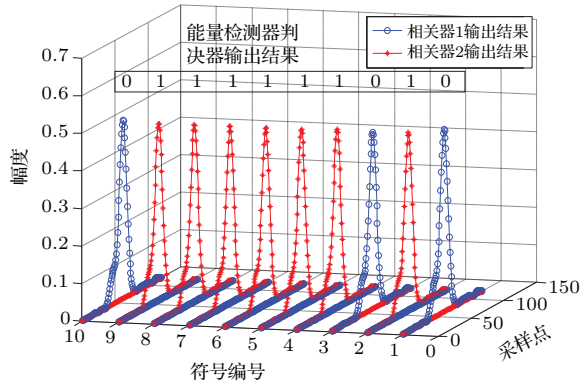


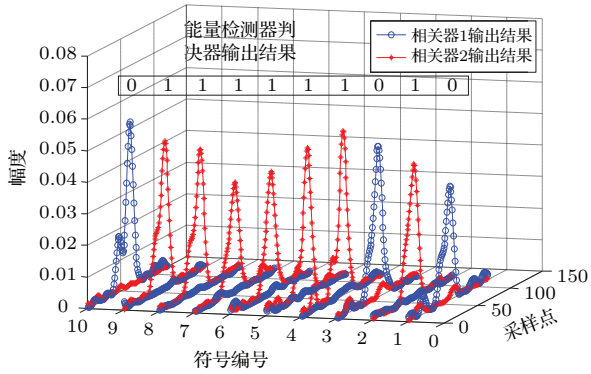
图 13　能量检测器原理图

Fig. 13 Energy Detector

冰下低信噪比通信试验中，直扩系统采用周期为 511 的 m 序列作为扩频序列，系统带宽为 4～8 kHz，通信速率为 7.6 bit/s。每帧数据包含 180 bit 信息，总共传输 45 帧共 8100 bit 信息。在 −15 dB 信噪比条件下均实现了零误码解码。图 14 给出了在同一帧信号、不同信噪比条件下前 10 bit 信息的能量检测器输出结果。可以看到，即使在信噪比为 −15 dB 条件下，能量检测器相关器输出的能量差值仍然十分明显，从而保证了直扩系统的正确解码。能量检测器简单易实现且拥有较高的处理增益，具有较强的抗载波相位跳变、抗信道多途干扰的能力，关于能量检测器的原理分析以及改进算法，将在后续研究成果中给出。



(a) SNR = 10 dB



(b) SNR = −15dB

图 14　能量检测器输出结果

Fig. 14 Outputs of energy detector

4.3　松花江冰下高速水声通信

冰下高速水声通信主要采用了单载波水声通信技术，系统工作带宽为 4～8 kHz，接收端通过采用时反镜判决反馈均衡技术保证了系统的稳定性 [26]。时反镜判决反馈技术原理如图 15 所示，在接收端

首先对接收信号进行时反处理，得到主瓣尖锐、旁瓣较低的Q函数，然后通过判决反馈均衡器对Q函数旁瓣带来的码间干扰进行均衡处理。通过时反处理得到较为稳定的Q函数，极大简化了判决反馈均衡器的处理难度，在通信距离为1 km、接收信噪比15 dB条件下成功实现了通信速率为4.5 kbps和9 kbps的零误码水声通信。图16分别给出了采用QPSK和8PSK调制的解码星座图。

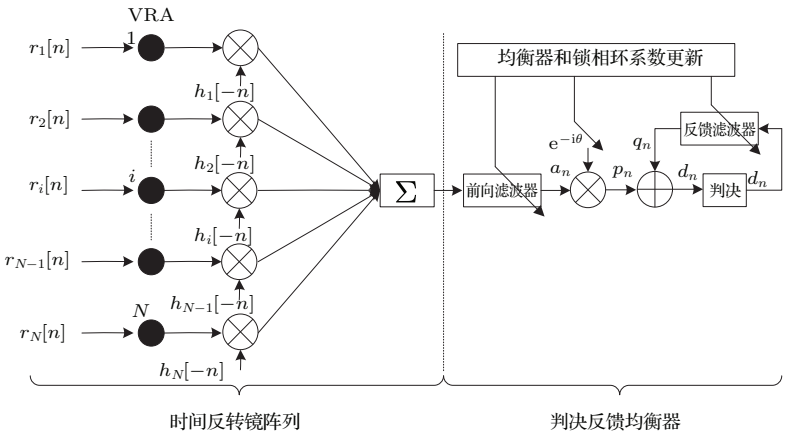
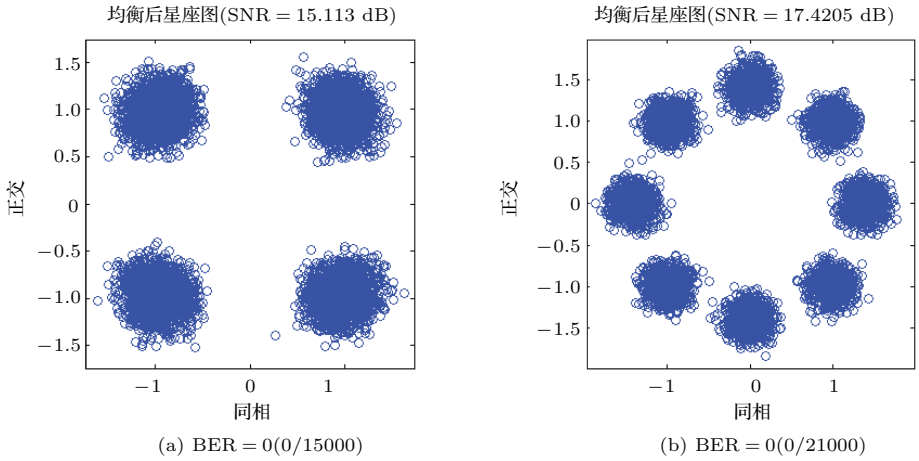


图15 时反镜判决反馈均衡器

Fig. 15 Time reversal DEF



(a) BER = 0(0/15000) (b) BER = 0(0/21000)

图16 单载波解码星座图

Fig. 16 Decoding constellation of single carrier

4.4 松花江冰下多址水声通信

冰下多址水声通信采用空分多址和码分多址技术。系统采用周期为511的m序列作为地址码，带宽为4~8 kHz，每个用户的通信速率为7.6 bit/s。空分多址方案如图17所示，由有源平均声强器[27]和时间反转镜构成。有源平均声强器可以同时估计出同频带多用户方位信息，从而利用矢量组合来实现定向通信；时间反转镜技术具有时间压缩性能，可自适应匹配期望用户信道，重组多途信号而抑制码间干扰，同时具有空间聚焦性能，利用不同用户与主节点间的水声信道冲激响应函数的弱相关性聚焦期望用户，屏蔽其他多用户干扰[28]。空分多址技术可以有效降低码分多址系统中的多址干扰，提高码分多址系统的系统容量。

由于试验环境和试验条件的限制，冰下多址通信试验是通过单独采集不同距离、不同深度的各个用户的数据，后续处理时叠加在一起来模拟多址通信的。本次冰下试验成功实现了12个用户的多址通信系统，在发送码元数量有限的条件下，各个用户均实现了零误码通信。图18给出了各个用户的前

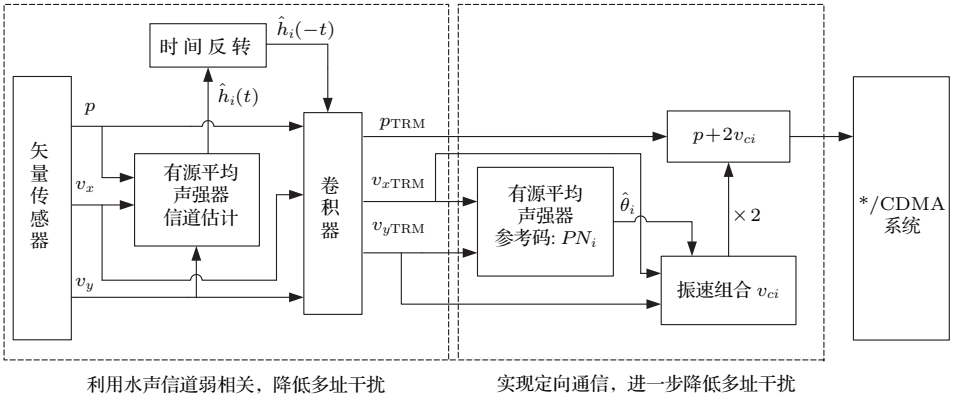


图 17　空分多址通信方案

Fig. 17 Space division multiple access communication scheme

10 bit 信息的能量检测器处理结果。可以看到，每个用户的能量检测器相关器输出能量差明显，保证了各个用户的正确解码。需要说明的是，在叠加过程中进行了功率控制，即保证各个用户的功率相同后进行叠加。若不进行功率控制，大功率用户将严重影响小功率用户，致使小功率用户无法正确解码。在实际冰下多址通信中，功率控制技术必不可少，这也是课题组后续研究的一个方向。

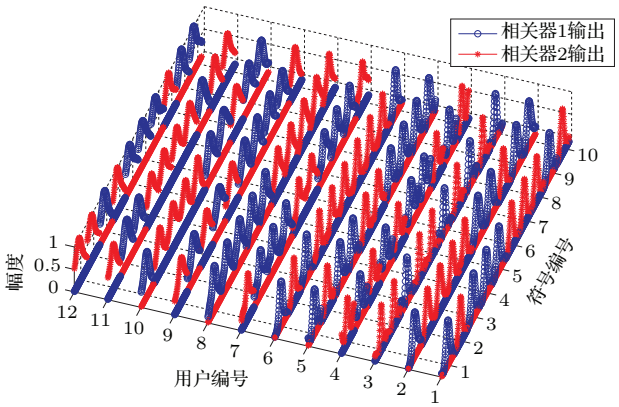


图 18　多址水声通信数据处理结果

Fig. 18 Multiple underwater acoustic communication data processing results

5　结论

本文基于 2015 年 1 月在哈尔滨松花江进行的国内首次冰下声学试验，为后续的冰下声学研究工作打下了基础，同时也积累了宝贵的外场试验的经验。本次冰下声学试验进行了冰层散射系数测量试验，积累冰层的实验测量技术、经验及相关数据，测量结果可为后续冰下声传播建模、冰下水声信道建模提供依据。冰下半波导声道由于试验水域较浅观察的不够明显，通过信道仿真软件进行了半波导现象的补充说明，这将是下次试验重点研究的内容。冰下低信噪比条件下的水声通信试验 (模拟超远程水声通信)、近程高速水声通信试验和冰下多用户水声通信试验均获成功，主要是因为固定的冰界面使得载波相位相对稳定，试验水域有限，通信条件较为简单。由于声学试验仪器较为昂贵且工作温度通常在 0 °C 以上，这为冰下声学试验带来了挑战。本次试验中就曾因为操作失误导致接收仪器工作温度过低，出现了接收信号全部失真的现象，同时接收阵中两个水听器被冻坏。因此，仪器设备转移过程中注意保暖以控制在可接受的温度范围内以及冰下外场试验临时基地搭建显得尤为重要；同时，研制耐低温水听器、水声仪器设备也迫在眉睫。

当前我国针对极地水声技术研究尚属刚刚起步阶段，既缺乏对极地环境下的声场特性研究，又尚未有极地专用的声纳设备，同时欠缺极地环境实验条件，这些不利因素严重限制了极地声学领域的研究。下一步将在一些理论研究基础上，研制相关耐低温、可长期冰下作业的水声通用设备，冬季在高纬度区域的松花江、松花湖开展冰下水声试验，进一步推进相关技术进步，为进军北极开展声学试验奠定基础。

参　考　文　献

[1] BIRD K J, CHARPENTIER R R, GAUTIER D L, et al. Circum-Arctic resource appraisal: Estimates of undiscovered oil and gas north of the ArcticCircle[R]. Geological Survey (US), 2008.

[2] Official of Naval Research website. [EB/OL]. [2014-9-10]. http://www.onr.navy.mil/science-technology/code-31.

[3] BURKE J E, TWERSKY V. Scattering and reflection by elliptically striated surfaces[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1966, 40(4): 883–895.

[4] MAYER W G, BEHRAVESH M, PLONA T J. Determination of sonic velocities from reflectivity losses at sea ice/water boundaries[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1975, 57(1): 39–46.

[5] YANG T C, VOTAW C W. Under ice reflectivities at frequencies below 1 kHz[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1981, 70(3): 841–851.

[6] MCCAMMON D F, MCDANIEL S T. The influence of the physical properties of ice on reflectivity[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1985, 77(2): 499–507.

[7] BUSH G, DUNCAN A, PENROSE J, et al. Acoustic reflectivity of Antarctic sea ice[C]//OCEANS'95. MTS/IEEE. Challenges of Our Changing Global Environment. Conference Proceedings. IEEE, 1995, 2: 962.

[8] ZASLAVSKII Y M, ZASLAVSKII V Y. Experimental analysis of flexural waves in river ice[J]. Acoustical Physics, 2010, 56(4): 486–492.

[9] MAKSIMOV A O. Acoustic manifestation of bubbles frozen in an ice sheet[J]. Acoustical Physics, 2011, 57(3): 391–400.

[10] BURKE J E, TWERSKY V. Scattering and reflection by elliptically striated surfaces[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1966, 40(4): 883–895.

[11] DIACHOK O I. Effects of sea-ice ridges on sound propagation in the Arctic Ocean[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1976, 59(5): 1110–1120.

[12] BISHOP G C, MELLBERG L E, ALBANESE C J, et al. A simulation model for high-frequency under-ice acoustic back scattering[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1985, 77(S1): S56–S56.

[13] MEREDITH R W. Measurements of under-ice broadband coherence[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 88(2): 1003–1010.

[14] WOLF J W, DIACHOK O I, YANG T C, et al. Very-low-frequency underice reflectivity[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 93(3): 1329–1334.

[15] FREITAG L, KOSKI P, MOROZOV A, et al. Acoustic communications and navigation under Arctic ice[C]//Oceans, 2012. IEEE, 2012: 1–8.

[16] PLUEDDEMANN A J, KUKULYA A L, STOKE R, et al. Autonomous underwater vehicle operations beneath coastal sea ice[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(1): 54–64.

[17] MOROZOV A K, ALTSHULER T W, JONES T C P, et al. Underwater acoustic technologies for long-range navigation and communications in the Arctic[C]//Int. Conf. Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results, Kos, Greece, JS Papadakis and L. Bjorno. 2011.

[18] MOROZOV A K. Modeling and testing of carbon-fiber doubly-resonant underwater acoustic transducer[C]//Proceedings of the 2013 COMSOL Conference, 2013: 1–5.

[19] 陈明剑, 侍茂崇, 高郭平. 近普里兹湾大陆架外水域水文物理特征 [J]. 青岛海洋大学学报, 1995, 25(s1): 235–249.
CHEN Mingjian, SHI Maochong, GAO Guoping, et al. Hydrologic characteristics of the water outside the continental shelf near Prydz Bay[J]. Journal of Ocean Universtity of Qingdao, 1995, 25(s1): 235–249.

[20] 康建成, 颜其德, 孙波, 等. 北冰洋海冰/气候系统及其对全球气候的影响 [J]. 极地研究, 1999, 11(4): 301–310.
KANG Jiancheng, YAN Qide, SUN Bo, et al. The Arctic sea ice, climate and its relation with global climate system[J]. Chinese Journal of Polar Research, 1999, 11(4): 301–310.

[21] 魏立新, 张占海. 北极海冰变化特征分析 [J]. 海洋预报, 2008, 24(4): 42–48.
WEI Lixin, ZHANG Zhanhai. Analysis of Arctic sea ice variability[J]. Marine Forecasts, 2008, 24(4): 42–48.

[22] 矫玉田, 赵进平, 史久新, 等. 极区海洋锚碇观测系统的设计和布放 [J]. 极地研究, 2008, 19(4): 305–313.
JIAO Yutian, ZHAO Jinping, SHI Jiuxin, et al. The design and deployment of mooring system in polar region[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2008, 19(4): 305–313.

[23] 雷瑞波, 李志军, 秦建敏, 等. 定点冰厚观测新技术研究 [J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 287–292.
LEI Ruibo, LI Zhijun, QIN Jianmin, et al. Investigation of new technologies for in-situ ice thickness observation[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 287–292.

[24] 苏洁, 徐栋, 赵进平, 等. 北极加速变暖条件下西北航道的海冰分布变化特征 [J]. 极地研究, 2010, 22(2): 104–124.
SU Jie, XU Dong, ZHAO Jinping, et al. Features of northwest passage sea ice's distribution and variation under Arctic rapidly warming condition[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2010, 22(2): 104–124.

[25] 李启虎, 王宁, 赵进平, 等. 北极水声学: 一门引人关注的新型学科 [J]. 应用声学, 2014, 33(6): 471–483.
LI Qihu, WANG Ning, ZHAO Jinping, et al. Arctic underwater acoustics: an attractive new topic in ocean acoustics[J]. Journal of Applied Acoustics, 2014, 33(6): 471–483.

[26] HAN X, YIN J, YU G, et al. Experimental demonstration of single carrier underwater acoustic communication using a vector sensor[J]. Applied Acoustics, 2015, 98: 1–5.

[27] 殷敬伟, 杨森, 杜鹏宇, 等. 基于单矢量有源平均声强器的码分多址水声通信 [J], 物理学报, 2012, 61(6): 329–335.
YIN Jingwei, YANG Sen, DU Pengyu, et al. Code divided multiple access underwater acoustic communication based on active acoustic intensity average[J]. Acta Phys. Sin., 2012, 61(6): 329–335.

[28] 殷敬伟, 张晓, 赵安邦, 等. 时间反转镜在水声通信网上行通信中的应用 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(1): 1–5.
YIN Jingwei, ZHANG Xiao, ZHAO Anbang, et al. The application of a virtual time reversal mirror to upstream communication of underwater acoustic networks[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(1): 1–5.