

# 北极高速水声通信实验初步研究

文洪涛<sup>1</sup>, 杨燕明<sup>1</sup>, 黄清华<sup>2</sup>, 周小平<sup>2</sup>, 周鸿涛<sup>1</sup>

(1. 自然资源部第三海洋研究所, 福建厦门 361005; 2. 厦门声戎科技有限公司, 福建厦门 361005)

**摘要:** 因海冰覆盖和独特的声速剖面特征, 北极水声信道有其特殊性, 为研究、开发和利用北极, 需要开展北极水声通信研究。2017 年夏季在北冰洋中心区开展了一次距离 1.26 km、通信速率为 1.2 kbps 的冰下水声通信实验。实验结果表明通信系统的载波频率偏高、声接收端背景噪声级较高以及水声信道上界面的海冰分布较为复杂是导致实验结果误码率偏高的主要原因, 提出了相应的改进措施和建议。实验过程中, 水声通信设备系统工作良好无故障。此次实验为极地水声通信装备的研制、极地水声通信的研究与应用积累了宝贵经验。

**关键词:** 北极; 水声通信; 水声信道; 海冰

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-04-0365-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.04.001

## A preliminary study of high speed underwater acoustic communication in the Arctic

WEN Hong-tao<sup>1</sup>, YANG Yan-ming<sup>1</sup>, HUANG Qing-hua<sup>2</sup>, ZHOU Xiao-ping<sup>2</sup>, ZHOU Hong-tao<sup>1</sup>

(1. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, Fujian, China;

2. Xiamen Soundfounder Technology Co., Ltd., Xiamen 361005, Fujian, China)

**Abstract:** The Arctic underwater acoustic channel has its particularity due to sea ice cover and the distinctive sound velocity profile of sea water, so it is needed to research the Arctic underwater acoustic communication for the Arctic development and utilization. In the summer of 2017, an underwater acoustic communication experiment under ice was carried out in the central region of the Arctic Ocean, the communication distance is 1.26 km and the communication rate is 1.2 kbps. The experiment shows that for the communication system with a higher carrier frequency, the background noise level at the receiving terminal is high, and the complex ice distribution on the surface of underwater acoustic channel is the main cause for the high bit error rate of the experimental results. The corresponding improvement measures and suggestions are put forward. The underwater acoustic communication equipment works well and has no fault in the experiment. This experiment accumulates valuable experience for the development of polar underwater acoustic communication equipment and for the research and application of polar underwater acoustic communication.

**Key words:** Arctic; underwater acoustic communication; underwater acoustic channel; sea ice

## 0 引言

因全球变暖, 海冰融化, 北极地区在航运、渔业和石油天然气开发等方面所呈现出的巨大商业和战略价值使其成为国际社会焦点<sup>[1]</sup>, 加强北极的科学考察研究具有重要意义。其中极地声学研究可追溯到第二次世界大战后, 1947 年美国就成立“北极潜艇实验室”, 并在 1958 年 8 月 13 日, 其核潜艇鸚鵡螺号到达北极点<sup>[2]</sup>。因海冰覆盖, 在北极直

接利用卫星系统进行水下通信和导航十分困难, 使得水声通信成为潜艇等水下航行器在冰下进行信息传输的主要方式<sup>[3]</sup>。近年来, 国外十分重视北极的冰下水声通信, 美国 2011 年在北极进行了潜艇通信的“深海传呼机”试验<sup>[2,4]</sup>。该试验利用冰基浮标、自主式水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)和水下滑翔机等在北极开展了冰下水声通信和导航的试验研究<sup>[5-7]</sup>, 其特点是采用低频载波实现远距离通信, 通信距离可从几十公里到几百公里, 但因带宽有限, 通信速率仅为几比特到十几比特。

近年来, 我国科学家也日益关注极地声学的研究<sup>[2-3,8-12]</sup>。在北极水声通信方面, 相关学者开展了冰下水声信道的仿真研究<sup>[13-14]</sup>。为降低多途效应和实现低信噪比下的水声通信, 采用参量阵技术<sup>[15-16]</sup>和直序扩频系统<sup>[16]</sup>进行研究, 并在松花江进行了冰下

收稿日期: 2018-08-13; 修回日期: 2018-09-10

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1405900)资助; 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目(海三科 2018026)

作者简介: 文洪涛(1983—), 男, 湖南衡阳人, 副研究员, 研究方向为海洋声学。

通讯作者: 杨燕明, E-mail: yangyanming@tio.org.cn

实验验证。此外,还开展了多输入输出<sup>[17]</sup>和多用户检测<sup>[18]</sup>的冰下水声通信研究,并在渤海进行了冰下水声通信实验验证。

目前国内还未见到北极冰下水声通信实验研究成果的公开文献报道,本文针对中国第八次北极科学考察开展的一次北极冰下高速水声通信实验,对实验情况进行介绍,对实验结果进行研究分析,以期为我国以后的北极水声通信实验研究提供有益的参考和宝贵经验。

## 1 实验背景及系统介绍

北京时间 2017 年 8 月 4 日,在北冰洋中心区开展了一次冰下水声通信实验,实验站位置如图 1 所示,图中  $S$  为声信号发射位置, $R$  为声信号接收位置,二者相距约 1 260 m,站位处水深约为 2 047 m。图 2 给出了实验原理示意图。实验时,以浮冰观测站为平台,在浮冰上钻孔,将发射换能器布放至水深 55 m 处;以考察船为平台,将接收水听器同样布放至水深 55 m 处。实验过程中,调查船处于漂泊状态,但出于安全考虑,主辅机没有关闭,所以接收端背景噪声较高。实验期间的平均风速为  $10.13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。实验海区的实测声速剖面如图 3 所示,为北冰洋典型的声速正梯度剖面,并形成

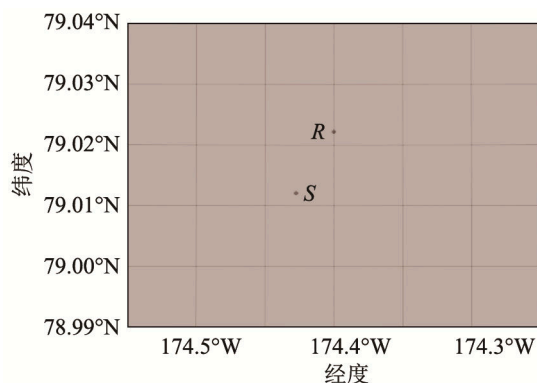


图 1 冰下水声通信实验站位图

Fig.1 Station bitmap of the underwater acoustic communication experiment under ice

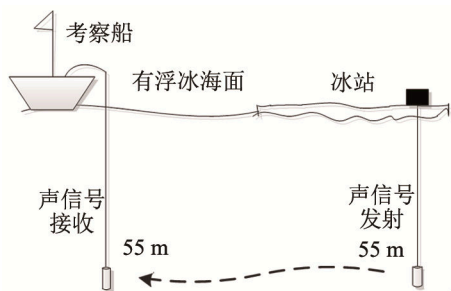


图 2 冰下水声通信实验布设图

Fig.2 Layout of the underwater acoustic communication experiment under ice

“半声道”现象。根据现场观测结果,声发射冰站和考察船之间的声通信路径上海冰覆盖率不高,约为 40%~50%,这是因为考察船位于无冰水道上。从考察船拍摄的冰站照片如图 4 所示,图中声发射冰站和考察船之间的海冰分布情况为:冰站浮冰-无冰水道-浮冰-无冰水道,这种冰、水交替的海面反而增加了水声信道上界面的复杂性,不利于声信号的传播。

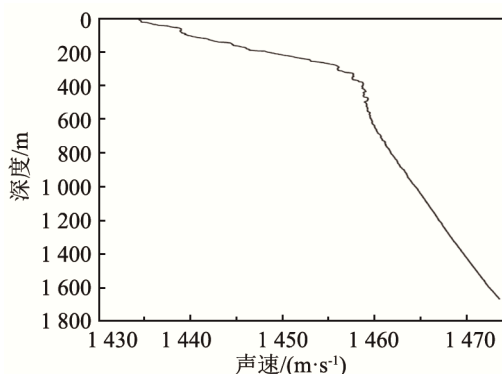


图 3 声速剖面图

Fig.3 Sound velocity profile



图 4 从考察船眺望声信号发射冰站

Fig.4 Overlooking the ice-station of transmitting sound signal from the investigation ship

实验所用设备为厦门声戎科技有限公司的水声通信机,发射端为 UDD-630N 发射单元,由发射显控系统、电池供电系统、功率放大器和发射换能器等部分组成;接收端为 UAM-630 接收单元,由接收水听器、电池供电系统和采集存储控制系统等组成。该设备采用的是多载波多频移键控 (Multi-Carrier-Multiple Frequency Shift Keying, MC-MFSK) 通信系统,该通信系统的基本框架结构如图 5 所示。图 5 中,信源由发射机的现场可编程阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 芯片完成前向纠错编码 (Forward Error Correction, FEC),基带数据映射和快速傅里叶逆变换 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)。再插入由唤醒序列、地址码、信号和伪随机序列 (Pseudo-Noise, PN) 码同步头等一系列编码,经数字模拟转换器 (Digital to Analog Converter, DAC) 数模转换成模拟信号后,通过功率

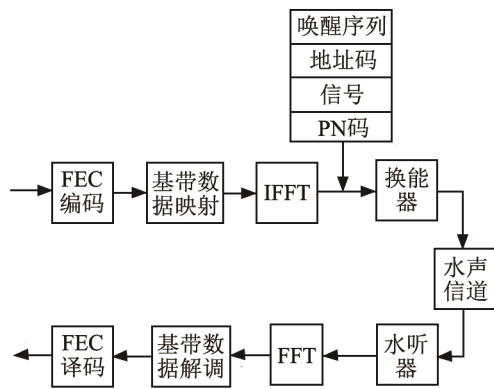


图 5 MC-MFSK 通信系统的基本框架结构  
Fig.5 Block diagram of the MC-MFSK communication system

放大器驱动水声换能器在水中发射出去。声信号经过水声信道传播后由接收端的水听器接收，经放大滤波后由模数转换模拟数字转换器(Analog to Digital Converter, ADC)电路转换成数字信号，再送入 FPGA 芯片进行解码。解码时先对接收到的数字信号进行快速傅立叶变换，再经过基带数据解调，最后通过 FEC 译码，得到信源信息。通信系统的带宽为 5 120 Hz；载波中心频率为 30 kHz；声传输速率最大为 1.2 kbps。采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)调制方式，共分成 128 个子载波，其中 120 个子载波用于传输信息，每个 OFDM 传输 30 bit。声信号发射端的冰站实验现场照片如图 6 所示。

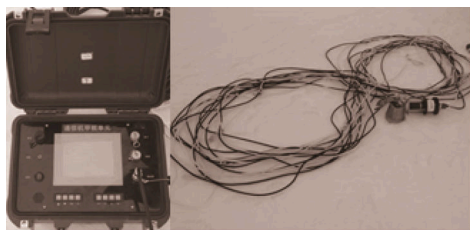


图 6 声信号发射端的冰站实验现场照片  
Fig.6 The photo of the experimental scene at the ice-station of transmitting sound signal

## 2 实验结果与讨论

本次实验发送数据的帧信号结构如图 7 所示，由唤醒部分、获取部分和数据部分组成。图 8、9 分别给出了发射信号和接收信号的时域和频域结构，可以看出，接收端存在多个干扰脉冲，且背景噪声级显著升高。接收端采用相关接收机，接收信号与多个信号计算相关值，然后进行比较，找出具有最大相关峰值的信号，再把这个信号解映射到对应的比特值，图 10 为接收端同步信号的相关处理结果。

实验过程中声信号发射单元共依次发射了 7 个数据包，其中第 2、3、5、6、7 包有应答，第 1 和第 4 包无应答。第 1 包数据是由于 DM365 芯片中 log 文件的保存出现问题，没有显示出该数据包的信息，通过残留信息可以将第一包数据用现场可编程门阵列(FPGA)解码出来，并上报。第 4 包数据的同步信号 Chirp 可以检测到，但是导频码的误码率高，在 FPGA 的层面上就选择丢包。在接收端解码后数据包将与发送原始数据包进行每比特对比，并统计误码个数。误码率等于误码比特数/数据包比特数。有应答的接收数据的误码率统计如表 1 所示。

从表 1 统计结果来看，本次实验的误码率偏高，综合分析可能有以下几个原因：

(1) 实验的载波频率偏高。已知北极冰下声传

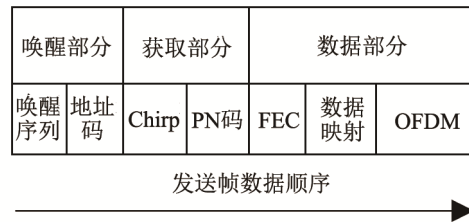
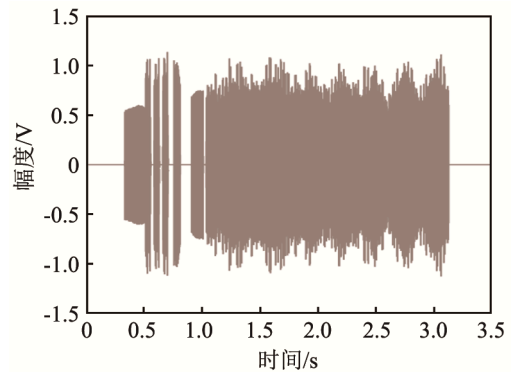
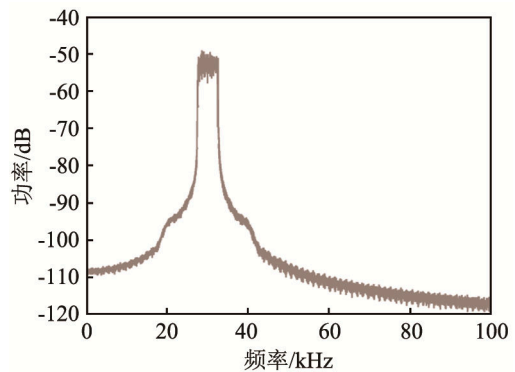


图 7 帧信号的结构  
Fig.7 Frame signal structure



(a) 时域波形



(b) 频域波形

图 8 发射声信号时域和频域图  
Fig.8 Time and frequency domain diagrams of the transmitted sound signal

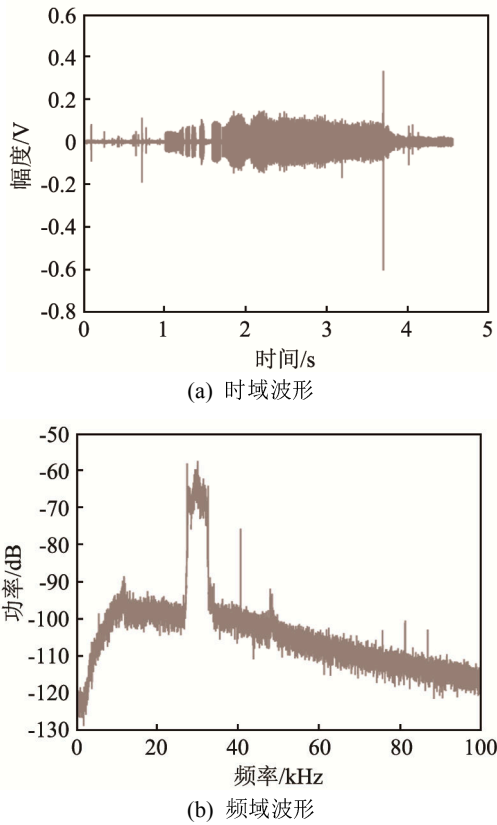


图9 接收声信号时域和频域图

Fig.9 Time and frequency domain diagrams of the received sound signal

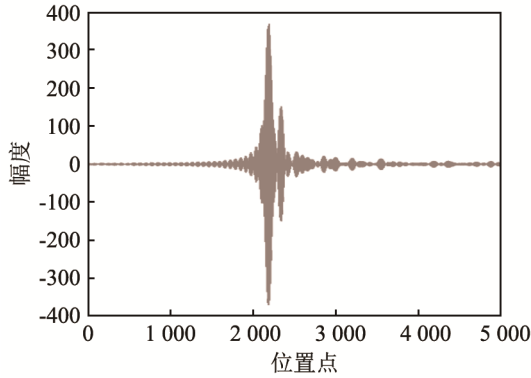


图10 接收端同步信号的相关结果

Fig.10 Correlation of synchronous signals at receiving terminal

表1 接收数据的误码率统计  
Table 1 Bit error rate statistics of received data

数据包序号	误码比特数/数据包比特数	误码率/%
2	454/7 936	5.72
3	275/7 936	3.47
5	83/7 936	1.05
6	115/7 936	1.45
7	171/5 296	3.23

播有较强的选频衰减特性，频率为 15~30 Hz 的声波传播最佳，在 30 Hz 以上，随着频率的升高，衰减急剧增加<sup>[2]</sup>。考虑到通信速率和通信带宽的需求，本水声通信实验系统的载波频率为 30 kHz，在今后

的实验中为了提高通信距离和降低误码率可适当降低载波频率。

(2) 考察船出于安全和供暖的需要，未关闭主辅机，因此，接收端的背景噪声级较高，影响接收声信号的信噪比，从而导致接收系统的解码能力下降，误码率增大。在今后的实验中应避开考察船辐射噪声的干扰，选择在长期冰站考察期间，将水声通信实验系统的声发、收设备均置于冰上开展实验。此外，对于考察船辐射噪声导致的脉冲干扰，也可以采用限幅法和基于空载波脉冲检测法来解决，这也是本实验系统针对特殊的使用环境，后续可改进的地方。

(3) 本次实验水声信道的上界面复杂。已知水声通信路径上的海面为：冰站浮冰-无冰水道-浮冰-无冰水道的冰、水交替海面。相比完整冰盖海面 and 开阔无冰海面，冰、水交替海面反而更复杂，特别在冰水交界处，海冰下界面突出的冰体与平整无冰水面将导致水声信道上界面起伏更大，而实验海域为典型的“半声道”波导，上界面的声散射是造成声传播损失的主要因素。将该水声通信实验系统在 15m 水深浅海进行实验，虽然受到海底海面的共同作用，且多途效应显著，但在误码率 <math>10^{-5}</math> 的条件下，水声通信距离可达 3.2 km，远好于本次实验结果。

(4) 测量实验所用水声换能器在 30 kHz 的指向性，水平方向为全向，最大起伏为 0.3 dB，垂直指向性的 -3 dB 开角为 53.9°。虽然已在换能器的底部加挂铅锤，但受北冰洋表层和次表层海流的影响，其在水中不可能完全垂直，当以一定倾角发射或接收信号时，必然导致额外的能量衰减，影响通信信号的传输和检测。

从上述分析可以看出，无论哪种因素均影响了接收声信号的信噪比，从而影响系统的解码性能。为了提高系统的解码性能，以更好地适用于北极的冰下水声环境，考虑从以下两个方面对系统的算法进行改进：

(1) 信道估计方法由原来的块状估计，改用基于稀疏矩阵法的梳状法对水声信道进行实时估计。

(2) 信道解码方法由原来的硬判决改用软判决。通过改进后，系统解码保证误码率低于  $10^{-3}$ ，最低信噪比由原来的 15 dB 将降低到 7 dB。

此外，本次实验的水声通信系统的硬件部分根据极地的特殊使用环境，也采取了一些保障措施，包括：(1) 使用低温电池，保证实验系统的稳定工作；(2) 采用能够抵抗极地低温的高质量军工芯片；(3) 对实验系统外形进行特别的增厚设计，以保持

内部温度变化的连续性, 避免温度骤降对硬件系统的损害。因此, 在整个实验过程中设备系统的故障率为 0, 经受住了极地低气温和高湿度环境的考验, 满足了极地使用的要求。

### 3 结语

在北冰洋中心区成功开展了一次冰下水声通信实验, 通信距离为 1.26 km, 通信速率为 1.2 kbps。在实验过程中设备系统工作正常, 硬件无故障发生, 表明该水声通信系统可适应极地恶劣环境的使用要求, 为极地水声通信装备的研制和使用积累了有益的经验。

实验接收数据的误码率偏高, 可能与系统的载波频率偏高、声接收端背景噪声级较高、水声信道上界面的海冰分布较为复杂以及水声换能器在水中的工作姿态有关。北极冰下水声信道有显著的选频衰减特性, 为了提高北极的冰下水声通信距离, 同时兼顾通信速率和通信带宽, 水声通信系统需要选择合适的载波频率。此外, 也可通过改进系统算法提高系统的解码能力, 以适应北极的冰下水声环境。

北极因海冰覆盖和独特的声速剖面特征, 其水声信道特性与其他海域相比大不相同, 开展水声通信实验和应用需要充分考虑其水声信道特征, 合理地选择通信系统参数和实验方案。本次实验为我国今后的极地水声通信研究与应用积累了宝贵经验。

**致谢** 感谢中国第八次北极科学考察队的大力支持和帮助, 感谢厦门声戎科技有限公司无偿提供的设备支持。

### 参 考 文 献

- [1] 韩立新, 王大鹏. 中国在北极的国际海洋法律下的权利分析[J]. 中国海商法研究, 2012, 23(3): 96-102.  
HAN Lixin, WANG Dapeng. The China's rights analysis in the Arctic region under international ocean law[J]. Chinese Journal of Maritime Law, 2012, 23(3): 96-102.
- [2] 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.
- [3] 殷敬伟, 杜鹏宇, 朱广平, 等. 松花江冰下水声试验技术研究[J]. 应用声学, 2016, 35(1): 58-68.  
YIN Jingwei, DU Pengyu, ZHU Guangping, et al. The research of the under-ice acoustic experiment technology[J]. Journal of Applied Acoustics, 2016, 35(1): 58-68.
- [4] Raytheon deepsiren closes submarine comms gap at arctic exercise[EB/OL]. [2018-03-15]. <https://www.defencetalk.com/raytheon-deepsiren-closes-submarine-comms-gap-at-arctic-exercise-33514>.
- [5] LEE C, GOBAT J. Acoustic navigation and communications for high latitude ocean research (ANCHOR)[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2008, 123(5): 2990.
- [6] FREITAG L, KOSKI P, MOROZOV A, et al. Acoustic communications and navigation under Arctic ice[C]//Oceans 2012, Hampton Roads, VA, 2012: 1-8.
- [7] FREITAG L, BALL K, PARTAN J, et al. Long range acoustic communications and navigation in the Arctic[C]//Oceans 2015-MTS/IEEE Washington, Washington, DC, 2015: 1-5.
- [8] 高飞, 潘长明, 冯盼盼, 等. 夏季白令海声速剖面分布特征[J]. 海洋通报, 2014, 33(2): 180-187.  
GAO Fei, PAN Changming, FENG Panpan, et al. Characteristics of Sound speed profile in Bering Sea in Summer[J]. MARINE SCIENCE BULLETIN, 2014, 33(2): 180-187.
- [9] 高飞, 张新睿, 孙磊, 等. 白令海西部小区域声传播特征研究[J]. 声学技术, 2015, 34(4): 306-311.  
GAO Fei, ZHANG Xinrui, SUN Lei, et al. The analysis of acoustic propagation characteristics in the small area west of Bering Sea[J]. Technical Acoustics, 2015, 34(4): 306-311.
- [10] 刘崇磊, 李涛, 尹力, 等. 北极冰下双轴声道传播特性研究[J]. 应用声学, 2016, 35(4): 309-315.  
LIU Chonglei, LI Tao, YIN Li, et al. Acoustic propagation properties of two-axes channel under sea ice in the Arctic[J]. Journal of Applied Acoustics, 2016, 35(4): 309-315.
- [11] 陈文剑, 殷敬伟, 周焕玲, 等. 平面冰层覆盖下水中声传播损失特性分析[J]. 极地研究, 2017, 29(2): 194-203.  
CHEN Wenjian, YIN Jingwei, ZHOU Huanling, et al. Characteristic analysis of acoustic transmission loss in water under plane ice cover[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2017, 29(2): 194-203.
- [12] 刘胜兴, 李整林. 海面冰层对声波的反射和散射特性[J]. 物理学报, 2017, 66(23): 234301-1-8.  
LIU Shengxing, LI Zhenglin. Reflecting and scattering of acoustic wave from sea ices[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(23): 234301-1-8.
- [13] LIU S X, SONG A J, SHEN C C. Acoustic communication channel model in the under-ice environment[C]//Oceans 2016-Shanghai, Shanghai, 2016: 1-5.
- [14] 朱广平, 殷敬伟, 陈文剑, 等. 北极典型冰下水声信道建模及特性[J]. 声学学报, 2017, 42(2): 152-158.  
ZHU Guangping, YIN Jingwei, CHEN Wenjian, et al. Modeling and characterizing the typical under-ice acoustic channel for the Arctic[J]. Acta Acustica, 2017, 42(2): 152-158.
- [15] 殷敬伟, 张晓, 朱广平, 等. 参量阵差分 Pattern 时延差编码冰下水声通信方法[J]. 声学学报, 2017, 42(1): 48-52.  
YIN Jingwei, ZHANG Xiao, ZHU Guangping, et al. Parametric array differential Pattern time delay shift coding underwater acoustic communication in the under-ice environment[J]. Acta Acustica, 2017, 42(1): 48-52.
- [16] TANG S Y, ZHU G P, ZHANG X, et al. Under-ice underwater acoustic communication based on direct sequence spread spectrum system with parametric emission[C]//2016 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), Hong Kong, 2016: 1-4.
- [17] HAN X, YIN J W, GE Y. Multiple-input multiple-output under-ice acoustic communication in shallow water[C]//Proceedings of the 11th ACM International Conference on Underwater Networks & Systems (WUWNet'16). ACM, New York, NY, USA, 2016.
- [18] YIN J W, YANG G, HUANG D F, et al. Blind adaptive multi-user detection for under-ice acoustic communications with mobile interfering users[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2017, 141(1): 70-75.