

# 蛙人水下语音通信技术研究现状和展望

刘 宁, 梁奇兵, 高晓兰

(昆明五威科工贸有限公司, 云南昆明 650106)

**摘要:** 蛙人水下语音通信机是蛙人进行水下行动和作业必不可少的装备, 在军事和民用等领域受到越来越多的关注。首先介绍了国内外蛙人水下语音通信机产品和技术的研究现状和成果, 然后对蛙人水下语音通信机领域发展面临的关键问题进行了详细讨论。指出了越来越多的基于数字信号处理技术的调制解调技术被运用到蛙人水下语音通信领域中, 可有效降低水下蛙人语音使用中多途效应和海洋环境噪声等干扰因素, 提高通话质量, 并已成为主要的研究方向; 在结构方面, 蛙人水下语音通信机由分体式、大体积向模块化、小型化、低功耗和一体式转变, 这也成为未来发展的趋势。

**关键词:** 蛙人; 水声信号处理; 水下语音通信机

中图分类号: TB565

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-02-0170-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.02.010

## Research status and prospect of frogman underwater voice communication technology

LIU Ning, LIANG Qi-bing, GAO Xiao-lan

(Kunming Wuwei Technology, Engineering & Trade Co., Ltd, Kunming 650106, Yunnan, China)

**Abstract:** The frogman underwater voice communicator is an essential equipment for underwater operation of frogman, which has attracted more and more attention in the military and civil fields. In this paper, the research status and achievements of product and technology about frogman underwater voice communication system at home and abroad are firstly introduced, then the key problem in the development of frogman underwater voice communication are discussed in detail, and it is pointed out that the modulation and demodulation technology based on digital signal processing has been widely applied in frogman underwater acoustic voice communication system. This technology can effectively reduce the interference factors such as the multi-path effect and ocean ambient noise in frogman underwater acoustic voice communication, to improve the quality of the communication. This technology has become the main research direction. In terms of the structure, the future development trend of the frogman underwater acoustic voice communicator is to transform it from split-type and large volume to modularization, miniaturization, low power consuming and integration.

**Key words:** frogman; underwater acoustic signal processing; underwater voice communicator

## 0 引言

随着国家建设海洋强国战略的深入推进和海洋资源的不断开发, 现代化海洋装备迎来了空前的发展。为蛙人<sup>[1-2]</sup>水下作业和作战提供主要信息保障, 诸如水下通信、引导定位、导航和探测服务的蛙人水下信息系统在现今的军事建设、海上资源勘探、近海打捞等方面发挥着不可替代的重要作用<sup>[3]</sup>。其中, 蛙人水下语音通信系统因其具有良好的应变能

力, 成为水下蛙人单兵作战和蛙人群水下作业的重要装备, 蛙人水下语音通信系统实现了水下蛙人与蛙人之间、蛙人与船体或岸基之间必要的信息交互<sup>[4]</sup>, 通信方式示意图如图 1 所示。

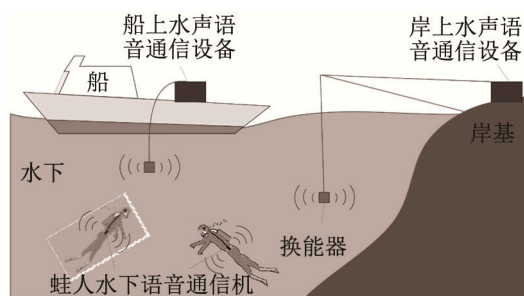


图 1 蛙人水下语音通信机通信方式示意图  
Fig.1 The communication mode of frogman underwater voice communicator

收稿日期: 2018-01-04; 修回日期: 2018-03-05

作者简介: 刘宁(1980—), 男, 四川宜宾人, 硕士研究生, 研究方向为海洋工程装备的研制。

通讯作者: 梁奇兵, E-mail: qbliang@sina.cn

## 1 国内外技术现状

国外对水下语音通信研究起步较早，主要以 OTS 公司的系列产品为代表<sup>[5]</sup>，OTS 公司的系列水声语音通信机采用模拟单边带调制方式(Signal Side Band, SSB)进行水声通信，受水文环境影响较大，为此该通信机设置有远程模式(不带门限)和近程模式(带门限)两种通信模式。其中较早的军用版 70 W 水下语音通信机 Magnacom SW-1000-SC2-CH，具有两个信道，信道 A(28.500 kHz，下边带(Lower Side Band, LSB))在平静海面通信距离达到 6 000 m，6 级海况下为 1 000 m，信道 B(32.768 kHz，上边带(Upper Side Band, USB))在平静海面通信距离达到 1 000 m，6 级海况下为 100 m。该型水声语音通信系统得到了美国军方的认可<sup>[6]</sup>。在诸如美国海军海豹突击队等部队，以及潜艇、水面舰艇和岸站等都安装了该系统。民用版 10 W 水下语音通信机 Aquacom SSB-1001B8-CH 支持 1~8 个通信信道，通信距离为 200~3000 m<sup>[3]</sup>。图 2 所示的 OTS Aquacom SSB-2010 为新一代商业化应用较广泛的水下语音通信机<sup>[7]</sup>，传输频带为 31~33 kHz，4 个信道，通信距离为 200~1 000 m。图 3 所示的是 Subsea Import Corporation 公司的 Diver Unit 1080VOX 水下语音通信机<sup>[8]</sup>，采用上边带调制方式，可实现长达 3 000 m 的远距离通信，配备键控(Push To Talk, PTT)和声控(Voice Operated Exchange, VOX)两种可选语音发送开关。图 4 所示的是 Diverlink Underwater Communications 公司的水下语音通信机 Model COM-UC-8-10/20-SE-VOX<sup>[9]</sup>，8 个信道，10 W 通信距离为 3 000 m，20 W 通信距离为 5 000 m。

另外，国外相关单位对数字水下语音通信系统



图 2 OTS Aquacom SSB-2010 型水下语音通信机<sup>[7]</sup>  
Fig.2 Model OTS Aquacom SSB-2010 frogman underwater voice communicator<sup>[7]</sup>



图 3 Diver Unit 1080VOX 型水下语音通信机<sup>[8]</sup>  
Fig.3 Model Diver Unit 1080VOX frogman underwater voice communicator<sup>[8]</sup>



图 4 Model COM-UC-8-10/20-SE-VOX 型水下语音通信机<sup>[9]</sup>  
Fig.4 Model COM-UC-8-10/20-SE-VOX frogman underwater voice communicator<sup>[9]</sup>

也进行了深入的研究探索，早在 1997 年，国外学者就将数字技术引入到水声语音通信系统中<sup>[10]</sup>，提出采用数字信号处理器(Digital Signal Processing, DSP)来实现数字水下语音信号处理和传输的方法，并成功地测试了通信系统。SARI H 等<sup>[11]</sup>提出了一种新的数字水声语音通信技术，利用线性预测编码对语音信号进行压缩，并通过数字脉冲位置调制，实现合适的语音参数的传输。ÖKTEM 等<sup>[12]</sup>提出了一种采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)<sup>[13-14]</sup>作为扩频技术的水下语音通信系统，主要研究了应用层、数据链路层和物理层，分析可实现的数据速率和性能。该系统采用的自适应通信参数将提供最多 16 个用户间的语音在同一时间使用整个频段的通信。REN H P 等<sup>[15]</sup>提出了一种新的低信噪比混沌扩频蛙人用水

声语音通信方法。由混合动力系统产生的混沌信号被用作发射机端的扩频序列,在接收端,采用相应的混沌匹配滤波器来抵消多径传播和噪声的影响。该方法不需要常规水声通信所需的复杂均衡和调制解调技术。仿真结果表明,与传统方法相比,该方法具有良好的抗干扰能力和较低的误码率。

近年来,国外对蛙人水下语音通信机结构也进行了进一步的研究,IMRAN M<sup>[16]</sup>提出了一种新的蛙人水下语音通信的系统、装置和方法。该系统具有包括用于检测并发送蛙人语音的麦克风送话器和便于潜水员能够听到声音的、通过蛙人的牙齿和头骨传导到耳蜗的声音传导器。麦克风送话器和声音传导器易于附着在水肺或其他水下呼吸器上。文献[17-18]在结构设计上同样有创新性探索。

国内对水声语音通信的研究起步较晚,从事水声语音通信研究的高校和科研单位主要有中国科学院声学研究所、厦门大学、西北工业大学、哈尔滨工程大学、华南理工大学、昆明五威科工贸有限公司、中国船舶重工集团第709研究所和苏州桑泰科技有限公司等,并取得了丰硕的科研成果。其中中国科学院声学研究所率先采用单边带调制技术实现了水声通信系统,该系统包括了4种通信体制(包括文字、图像、语音和视频)以适应载人潜水器在海上航行以及深海探索的需要,该水声通信系统成功装备到了我国自主研发的深海载人潜水器蛟龙号上<sup>[19]</sup>,在世界上首次实现了深度潜水器与母船之间多种通信体制的水声通信传输<sup>[20]</sup>。哈尔滨工程大学针对水声语音通信中的数字调制解调技术,提出了时延差编码通信体制<sup>[21]</sup>,研究了正交频分复用OFDM<sup>[22-23]</sup>、正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keyin, QPSK)<sup>[24]</sup>、多进制数字频率调制(Multiple Frequency Shift Keying, MFSK)<sup>[25]</sup>、自适应均衡<sup>[26]</sup>等技术,还进行了矢量信号处理、矢量通信技术和信道仿真技术等研究,研制了基于以上这些数字调制方式的实时高质量数字化水声语音通信的试验系统,进行了多次湖上和海洋长距离水声数字语音通信,误码率低,所需带宽小,语音通话质量令人满意<sup>[27-29]</sup>。西北工业大学王艳等<sup>[30]</sup>主要针对数字语音编码技术进行了深入研究,提出了一种基于快速自适应码书搜索方法的编解码算法,理论和试验结果都表明该算法在抗噪和抗误码方面具有良好的性能,可有效克服浅海水声信道复杂、通信频带窄的水文环境问题;在误码率低于2.5%时,均可实现清晰的语音通信。厦门大学水声实验室提出了基于调频制式<sup>[31]</sup>、语音识别与合成、数字检测音节压缩

合自适应增量调制技术<sup>[32]</sup>,基于以上技术先后研制了第1代和第2代水声语音通信样机,其中第1代水下语音通信样机进行了多次海上测试实验,可达到7500m左右的稳定通信距离;第2代水下语音通信样机对第1代做了优化改进,加入了信道纠错编码技术,在容错能力、系统的鲁棒性等方面都有明显增强,多次海上测试都达到了10000m左右的稳定通信距离<sup>[20]</sup>。昆明五威科工贸有限公司采用文献[33]中的数字单边带调制技术,研制了WR22水下语音通信机<sup>[34]</sup>(如图5所示),已成功装备某水下航行器,采用半双工通信方式,最大通信距离约1000m,最大工作深度为30m,待机时间达10h。苏州桑泰海洋仪器研发有限责任公司开发的水下语音通信机<sup>[35]</sup>(如图6所示),采用PPT(键控)或VOX(声控)两种发射控制方式,2个信道,传输距离达1500m,最大工作深度为60m。



图5 WR22型水下语音通信机<sup>[34]</sup>  
Fig.5 Model WR22 frogman underwater<sup>[34]</sup>



图6 苏州桑泰型水下语音通信机<sup>[35]</sup>  
Fig.6 Model Suzhou Santai frogman underwater voice communicator<sup>[35]</sup>

## 2 关键问题

实现高质量水声语音通信的关键是如何克服浅海复杂水文环境对语音信号的干扰。浅海水域一般是指海深在200m以内的大陆架海区,浅海水声信道极其复杂,其主要特征表现为有限的通信带宽、复杂的海洋环境噪声以及由于时空变化引起的多途效应<sup>[36]</sup>。多途效应是影响水声语音通信质量的



关键因素，这是由于水声信号在浅海中传输受到海面、海底或障碍物以及温跃层的反射、折射导致声波传输路径千差万别，从而使接收机接收到的声信号幅度衰弱、或产生码间干扰和频谱展宽，改变了发送码元的波形，降低了通信的可靠性，限制了通信速率。针对以上多途效应对水声语音信号的影响，可考虑通过数字调制解调技术增加码元间的保护间隔，采用适当的分集技术和自适应技术来有效克服干扰。另外，可根据作用距离选择合理的工作频段以及改进水声换能器的结构和指向性设计<sup>[37-38]</sup>，同时，蛙人在使用水下语音通信机的过程中要避开遮挡物等，这些方法都能有效改善多途效应的干扰。水声信道带宽受限的主要原因是海洋对信号的吸收损失以及水声换能器带宽的限制。由于声波在水中传播过程中会受到介质的反射、折射和热吸收等，使得声波能量会随之衰减，衰减系数会随着信号工作频率的增加而上升，因此，要根据通信距离来选择合适的声工作频率<sup>[39]</sup>。由于海洋环境噪声源较复杂，主要包括潮汐、洋流、海面波浪、风成噪声、生物噪声、工业噪声等，并且浅海环境噪声频谱级变化范围较大，随着频率的降低，环境噪声增大，因而水声工作频率不能选得太低。要克服浅海复杂水文环境噪声对声传输信道的干扰，必须根据作用距离选择合适的工作频段和采用高质量的水声语音信号调制解调技术。

另外，在水下语音通信机配合水肺呼吸器使用过程中发现，蛙人在水下说话时，语音信号是在高压空气环境中产生的，呼吸阀向外部水中排除气泡的过程伴随着大量的噪声，气泡和呼吸噪声直接影响发送和接收语音的清晰度。针对呼吸和气泡噪声的干扰，可考虑采用有效的滤波算法对发送的语音信号进行处理，也可考虑改进水肺呼吸器的结构，在呼吸阀出口处增加更细的筛网使排出的气泡尽量小而缓慢；采用骨传导耳蜗声音接收器来接收对方的声音信号也是一种选择。

### 3 发展趋势

通过以上分析可知，对浅海声信道传输的语音信号进行高质量的调制解调成为克服水下语音通信受有限的带宽、复杂的海洋环境噪声和多途效应等影响的关键<sup>[40]</sup>。基于数字信号处理技术的调制解调技术已取代模拟技术，成为蛙人水下语音通信领域发展的共识与趋势<sup>[41-42]</sup>，越来越多的诸如扩频技术、信号编解码技术、分集技术和自适应技术等，被运用到蛙人用水下语音通信系统中来改善声能量的传

播损失、多途效应和声信号的衰落对水下语音信号传输的影响。水下语音通信中数字调制解调技术被广泛地运用和研究，主要基于以下几方面的原因：一是数字调制技术的纠错编码技术以及加密技术可以增加传输的可靠性，可有效地提高水声语音通信系统的抗噪和抗误码等抗干扰能力；二是采用数字处理技术能够实现水声信号传输的差错可控，可对时域和频域范围内畸变的信号进行补偿，抵消由于信道多途和频率扩展对水声信号产生的影响；三是越来越强大的数字微处理器信号处理能力，使得对水声语音信号能进行各种复杂的快速调制解调，并且易与现代数字交换技术和数字存储技术进行互联互通、信号中继复用等<sup>[43]</sup>。

在水下语音通信机结构组成方面，也由之前的分体式、大体积向模块化、小型化、低功耗和一体化发展，如图 7 和图 8 所示。其中，图 7 为 OTS Buddy-Phone-2-on-mask 型水下语音通信机<sup>[44]</sup>，通信机和全面罩一体化设计，通信机本体置于全面罩侧面，采用干电池供电。图 8 为 DIVELINK Model



图 7 OTS Buddy-Phone-2-on-mask 型水下语音通信机<sup>[44]</sup>  
Fig.7 Model OTS Buddy-Phone-2-on-mask frogman underwater voice communicator<sup>[44]</sup>



图 8 DIVELINK Model COM-FFS SCUBAPRO 型水下语音通信机<sup>[45]</sup>  
Fig.8 DIVELINK Model COM-FFS SCUBAPRO frogman underwater voice communicator<sup>[45]</sup>

COM-FFS SCUBAPRO 型水下语音通信机<sup>[45]</sup>, 通信机本体和全面罩合二为一, 通信机本体置于头盔后部, 电池可拆卸充电, 通信机整体结构紧凑, 更利于潜水员水下作业。

水声语音通信技术由于其在军事战略和民用领域的广泛需求和重要地位, 已经进入了高速发展的新时期。但是水下语音通信机所面对的浅海水声信道由于其诸多的复杂特性, 使得水声信道也成为了比空天信道更复杂的通信信道, 相较于空天通信技术的发展, 水声语音通信技术也远远落后<sup>[35]</sup>。随着人类对海洋资源的深入探索, 水声语音通信技术必定会发挥越来越重要的作用<sup>[46]</sup>。因此, 水声语音通信技术在未来相当长的时间都具有较大的发展空间和重要的研究价值。

## 4 结 论

国内外对蛙人水下语音通信机进行了大量探索和研究, 并形成了序列化的产品。随着现代新技术的发展, 在调制方式上, 数字调制技术逐渐取代模拟调制技术成为研究热点, 并且越来越多的基于数字信号处理技术的诸如扩频技术、信号编解码技术、分集技术和自适应技术等调制解调技术被运用到蛙人水下语音通信领域中, 已成为克服水下蛙人语音传输中多途效应和海洋环境噪声等干扰因素对蛙人水下语音通话质量影响的有效措施; 在结构设计方面, 由之前的分体式、大体积向模块化、小型化、低功耗和一体式发展, 可更好适应水下行动和作业需求。可以预见, 在未来的近浅海作战或民用领域水下作业中, 蛙人水下语音通信机将成为一种重要工具, 发挥不可替代的作用。

## 参 考 文 献

- [1] 段凯义, 刘宁. 国外蛙人运载器的历史和现状(上)[J]. 鱼雷与发射技术, 2004(4):1-10.  
DUAN Kuangyi, LIU Ning. The history and current situation of foreign frogman carrier[J]. Torpedo and launch technology, 2004(4): 1-10.
- [2] 王帅, 刘涛. 蛙人运载装备体系发展现状及关键技术[J]. 中国造船, 2012, 53(2): 198-210.  
WANG Shuai, LIU Tao. Current status of swimmer delivery equipment system and key technologies[J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(2): 198-210.
- [3] 白峻, 曾锋, 刘峰, 等. 蛙人水下信息系统发展综述[J]. 电声技术, 2014, 38(9): 60-64.  
BAI Jun, CENG Feng, LIU Feng, et al. Development review of frogman underwater information system[J]. Underwater Acoustic Engineering, 2014, 38(9): 60-64.
- [4] 白夜. 蛙人语音编码技术及其 DSP 实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- BAI Ye. Frogman speech coding technology and its implementation based on dsp[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [5] Ocean Technology Systems. View our featured products [EB/OL]. [2017-9-10]. <https://www.oceantechnologysystems.com/>.
- [6] Ocean Technology Systems. Magnacom SW-1000-SC2-CH [EB/OL]. [2017-9-10]. <https://www.oceantechnologysystems.com/store/military/hybrid-wireless-hardwire/magnacom-sw-1000-sc-2-ch-70-w-hybrid-transceiver/>.
- [7] Ocean Technology Systems. Aquacom SSB-2010, 4-channel transceiver (5 Watts output power) [EB/OL]. [2017-9-10]. <https://www.oceantechnologysystems.com/store/wireless/aquacom-ssb-2010-4-channel-transceiver-5-watts-output-power/>.
- [8] Subsea Import Corporation. Diver Unit Model 1080 VOX surface Unit Model 1080sx [EB/OL]. [2017-9-10]. <http://scubascenetaunton.com/dive-mobile>.
- [9] Divelink Underwater Communications Ltd. Model COM-UC-8-10/20-SE-VOX [EB/OL]. [2017-10-10]. <http://divelink.net/products/diver-belt-packs>.
- [10] HAYRI S. Underwater acoustic voice communications using digital techniques[D]. Loughborough: Loughborough University, 1997.
- [11] SARI H, WOODWARD B. Underwater acoustic voice communications using digital pulse position modulation[C]//OCEANS '97. MTS/IEEE Conference Proceedings, 1997, 2: 870-874.
- [12] Öktem Kemalettin Kerem. Anlysis of using OFDM for short-range, multi-user, underwater acoustic communication[D]. Ankara: Bilkent University, 2006
- [13] Seyyed Mahmood Jafari Sadeghi, Mostafa Derakhtian, Mohammad Ali Masnadi-Shirazi. Design and implementation of an OFDM-based voice transmission system for mobile Underwater Vehicles[C]//IEEE Symposium on Computers and Communications. IEEE Computer Society, 2012: 49-52.
- [14] WANG C, YIN J W, HUANG D F, et al. Experimental demonstration of differential OFDM underwater acoustic communication with acoustic vector sensor[J]. Applied Acoustics, 2014, 78: 7-10.
- [15] REN H P, BAI C, KONG Q J, et al. A chaotic spread spectrum system for underwater acoustic communication[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2017, 478: 77-92.
- [16] IMRAN M. Apparatus, system and method for underwater voice communication by a diver: US, US9219955[P]. 2015.
- [17] NOWAK L, PENKOWSKI M, DETKOS R. Device for underwater voice communication: PL, WO2017048145[P], 2017-03-23.
- [18] KROPF K. Underwater voice communication devices and associated methods: US, WO2017014812[P], 2017-01-26.
- [19] 朱维庆, 朱敏, 武岩波, 等. 载人潜水器“蛟龙”号的水声通信信号处理[J]. 声学学报, 2012, 37(6): 565-573.  
ZHU Weiqing, ZHU Min, WU Yanbo, et al. Signal processing in underwater acoustoc commnuication system for manned deep submwrnsible “Jiaolong”[J]. Acta Acistoca, 2012, 37(6): 565-573.
- [20] 卜文强. 基于 TMS320C67x 的水声语音通信系统研究与实现[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.  
BU Wenqiang. Research and implementation of underwater acoustic voice communication system based on TMS320C67x[D]. Xiamen: Xiamen University, 2014.
- [21] 何辉. 基于 OFDM 的水声语音通信系统的设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.  
HE Hui. Design of underwater acoustic voice communication system based on OFDM[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [22] 殷敬伟, 王驰, 白夜, 等. 基于差分正交频分复用的水下语音通信应用研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(5): 591-597.  
YIN Jingwei, WANG Chi, BAI Ye, et al. Application of differential orthogonal frequency division multiplexing in underwater

- speech communication[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, **34**(5): 591-597.
- [23] 范庆宝. 基于 OFDM 水声通信技术建立近海对潜通信系统的研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.  
FAN Qingbao. Offshore to dives communications system's research based on the OFDM underwater sound communication establishment[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [24] 胡稼悦. 便携式水声数字语音通信系统的设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.  
HU Jiayue. Design of portable underwater acoustic voice communication system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [25] 陈乃锋. MFSK 水声通信信号处理子系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.  
CHEN Naifeng. Design and Implementation of MFSK underwater acoustic communication signal processing subsystem[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [26] 李娜. OFDM 水声通信信道估计与均衡技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.  
LI Na. Study of channel estimation and equalization technology in OFDM underwater acoustic communication[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [27] 孙大为. 数字化单边带水声语音通信系统的研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.  
SUN Dawei. Research and implementation of digital SSB underwater acoustic voice communication system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [28] 吴君君. 基于 DSP 的水下语音通信系统的硬件设计和实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.  
WU Junjun. The hardware design and implementation of underwater acoustic voice communication system based on DSP[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [29] 马巍. 水下数字式语音通信系统设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2013.  
MA Wei. Design and implementation of underwater digital voice communication system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [30] 王艳. 数字语音编码技术及其在水声通信中的应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.  
WANG Yan. Digital speech coding technology and the application in underwater communication[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [31] 陶毅. 浅海水声信道抗多途跳频通信系统研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.  
TAO Yi. Study of an anti-multipath frequency-hopping communication system in shallow water acoustic channel[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.
- [32] 程恩, 袁飞, 苏为, 等. 水声通信技术研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2011, **50**(2): 271-275.  
CHEN En, YUAN Fei, SU Wei, et al. Research progress of underwater acoustic communication technology[J]. *Xiamen University (Natural Science)*, 2011, **50**(2): 271-275.
- [33] 孙宗鑫, 赵天宇, 曲征, 等. 数字单边带水声语音通信研究[J]. 声学技术, 2015, **34**(2, Pt.2): 394-396.  
SUN Zongxin, ZHAO Tianyu, QU Zheng, et al. Research of digital sss underwater acoustic communication system[J]. *Technical Acoustics*, 2015, **34**(2, Pt.2): 394-396.
- [34] 昆明五威科工贸有限公司. WRZ2 水下语音通信机[EB/OL]. [2016-3-10]. [http://www.kmwuwei.com/Index\\_12.html](http://www.kmwuwei.com/Index_12.html).  
Kunming Wuwei Technology Engineering & Trade Co., Ltd. Model WRZ2 frogman underwater [EB/OL]. [2016-3-10]. [http://www.kmwuwei.com/Index\\_12.html](http://www.kmwuwei.com/Index_12.html)
- [35] 苏州桑泰海洋仪器研发有限责任公司. 水下语音通信机[EB/OL]. [2015-8-17]. <http://www.sz-soundtech.com/cpxx>.  
Suzhou Soundtech Oceanic Instrument Research and Development CO. Ltd. Model Suzhou Santai frogman underwater voice communicator [EB/OL]. [2015-8-17]. <http://www.sz-soundtech.com/cpxx>.
- [36] 方志波. 浅海水声数字语音通信系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.  
FANG Zhibo. Study of underwater acoustic digital voice communication system in shallow sea[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [37] ABDI A, GUO H, SONG A, et al. An overview of underwater acoustic communication via particle velocity channels: Channel modeling and transceiver design[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2015, **127**(3): 1820.
- [38] ZHANG E, ABDI A. Underwater communication via frequency shift keying in particle velocity channels: Experimental results[C]// *OCEANS 2015-MTS/IEEE Monterey*, 2015: 1-4.
- [39] 刘磊. 跳频通信技术在网络鱼雷中的应用研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2011.  
LIU Lei. Research on the application of frequency hopping communication technology in the network torpedo[D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2011.
- [40] 贾宁, 黄建纯. 水声通信技术综述[J]. 物理, 2014, **43**(10): 650-657.
- [41] JIA Ning, HUANG Jianchun. Overview of underwater acoustic communications[J]. *Physics*, 2014, **43**(10): 650-657.
- [42] 王翔. 水下个人数字通信关键技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.  
WANG Xiang. The key technology of the personal voice underwater communication[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [43] 郭中源, 陈岩. 水下数字语音通信系统的研究和实现[J]. 声学学报, 2008, **33**(5): 409-418.  
GUO Zhongyuan, CHEN Yan. Study and implementation of underwater digital voice communication system[J]. *Acta Acustica*, 2008, **33**(5): 409-418.
- [44] 何永江. 水下机器人通信系统设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.  
HE Yongjiang. Design and Implementation of communication system used for underwater robot[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [45] Ocean Technology Systems. OTS Buddy-Phone-2-on-mask [EB/OL]. [2017-9-10]. <https://www.oceantechnologiesystems.com/store/wireless/sp-100d-2-buddy-phone-2-channel-surface-station-1-2-watt-output-power/>.
- [46] DIVELINK Underwater Communications Ltd. DIVELINK Model COM-FFS SCUBAPRO [EB/OL]. [2017-10-10]. <http://www.divelink.info/head-mounted/>.
- [47] MANDAR C, SHIRAZ S. Underwater acoustic communications and networking: recent advances and future challenges[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2008, **42**(1): 103-106.