

◇ 研究报告 ◇

水下蛙人被动探测测向实验研究*

宋宏健^{1,2†} 许枫¹ 杨娟¹ 安旭东¹ 吕涛¹

(1 中国科学院声学研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 为了对携带开式呼吸器的水下蛙人进行被动探测,本文采用四个水听器组成的十字阵在浅海水域对水下开式蛙人进行了被动探测、测向实验。结果表明:蛙人辐射噪声具有周期性特征,其周期与蛙人的呼吸频率有关;另外,蛙人呼吸辐射噪声具有显著频带,并且其频带与蛙人携带的呼吸器有关。根据蛙人辐射噪声的显著频带和周期性特征,设计信号处理算法实现了对蛙人的被动声学探测识别。使用互相关方法处理一对水听器的接收信号,可以确定蛙人的方位,但是根据理论分析会出现一个假方位。对比十字阵中两对水听器的测向结果可确定蛙人的准确方位。

关键词 开式蛙人,十字阵,互相关

中图分类号: TB566 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2016)06-0547-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2016.06.011

The passive direction finding experimental research for underwater swimmers

SONG Hongjian^{1,2} XU Feng¹ YANG Juan¹ AN Xudong¹ LYU Tao¹

(1 *Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract The purpose of this work is to detect and localize underwater swimmers. This paper presented a four-hydrophone array to detect underwater swimmers carrying open breathing apparatus. The detection and location experiments of underwater swimmers are carried out in shallow sea. The experimental results indicate that the radiation noise of divers has cyclical characteristics, and its period depends on the divers breathing frequency. In addition, the radiated noise of underwater divers has significant frequency band, and the frequency band is related to the breathing apparatus. According to periodic characteristics of radiated noise and significant frequency band, a signal processing algorithm was designed to detect and identify underwater divers. Using cross-correlation method for processing the received acoustic signals of a pair of hydrophones can determine the position of underwater divers, but there will be a false orientation based on theoretical analysis. Fusion two lateral results from the cross array can determine the exact location of underwater divers.

Key words Frogman equipped with an open circuit scuba, Cross array, Cross correlation

2016-01-13 收稿; 2016-04-19 定稿

*国家自然科学基金项目(Y154061221)

作者简介: 宋宏健(1988-), 男, 河南鲁山人, 博士研究生, 研究方向: 信号与信息处理。

†通讯作者 E-mail: songhongjian2011@163.com

1 引言

我国海洋面积辽阔,水上建有重要港口、航道、大型水上活动区域以及与重要沿岸设施连接的水域,它们的安全与经济(海上运输、口岸贸易)、能源(海上石油与天然气开采、核电与水力发电)以及民众生活等息息相关。港口以及船只等水上设施的安全保障越来越得到广泛的重视,对水上设施的安全技术来讲,一项重要的威胁来自于水下蛙人。主动式蛙人目标监测技术是目前水下监控领域的主要手段^[1]。但是主动式声呐需要面临浅海复杂环境带来的混响干扰,而且容易被发现、破坏或规避,相比较而言,被动声呐具有功耗低、隐蔽性好的特点。因此被动蛙人探测技术具有重要价值。

国外研究机构对蛙人呼吸辐射噪声开展了大量研究工作。2005年Stevens理工学院的Stolkin等研究人员设计实验研究蛙人在水下的辐射噪声,总结出了水下蛙人辐射噪声信号的特征并提出了蛙人的检测方法^[2]。接着,Stevens理工学院的研究人员研究了携带开式呼吸器的蛙人水下辐射噪声的特征。2007年他们发表的成果表明蛙人的辐射噪声主要来自开式呼吸器的一级头^[3-4]。2008年Dalberg等研究人员的实验实现了对蛙人的分类识别^[5]。Stevens理工学院根据多年水下小目标的研究经验,研制出了水下水面小目标被动识别定位系统:Stevens passive acoustic detection system (SPACES)^[6]。瑞典Lennartsson等研究人员也对水下蛙人被动探测进行了相关的研究工作,他们设计

了蛙人检测器,并使用ROC曲线分析检测器的性能以及噪声对检测器的影响^[7]。

国内关于蛙人被动声学方面的研究工作有限,哈尔滨工业大学做过一些关于蛙人辐射噪声特性的研究,但仅限于简单地模拟蛙人在水下的呼吸特性^[8]。中科院声学所对蛙人水下呼吸特性开展了研究工作,对水下蛙人进行了被动声学的水池实验和海上实验,验证了水下蛙人辐射噪声的周期性特征^[9]。刘东涛通过实验指出了水下开式蛙人呼吸的频率特征^[10]。

论文的主要工作分两部分,一是研究携带开式呼吸器的蛙人水下呼吸辐射噪声的特性;其二是使用四元十字阵实现了对水下蛙人目标的被动测向。

2 实验

基于课题组以前的工作,水池实验已经验证了水下蛙人呼吸辐射噪声信号主要是由呼吸调节器的一级头(高压阀)和二级头(低压阀)引起的,湖上实验也证明了蛙人辐射噪声的周期性特征^[9]。设计此次海上实验的目的一是在背景噪声环境复杂的海上水域研究蛙人辐射噪声的特点;二是为了使用小尺度阵实现对蛙人的测向。为实际在海上使用被动声学方法抵御蛙人入侵奠定良好的技术基础。实验中使用设计的十字阵采集蛙人辐射噪声数据。使用十字阵采集系统既可以多通道采集蛙人的辐射噪声信号以研究蛙人的辐射噪声特点,又可以对多个通道的数据联合处理实现对水下蛙人的定向。

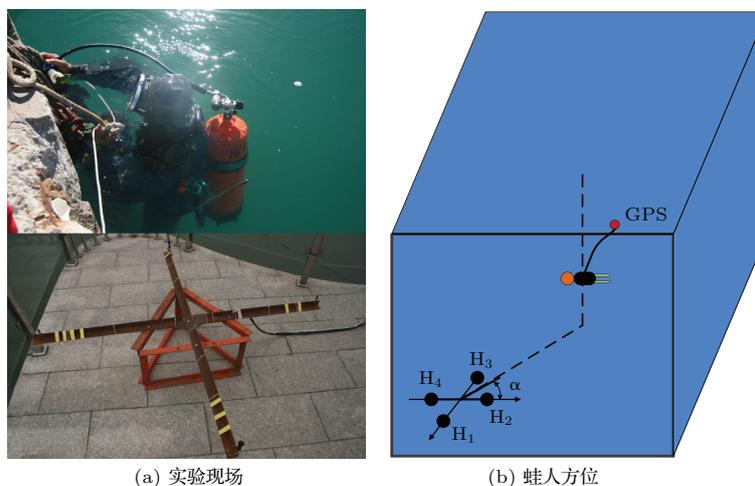


图1 实验现场图片及蛙人方位示意图

Fig. 1 Experimental scene photograph and the location of array and swimmer

海上实验在青岛附近海域进行。海上实验现场照片及阵与蛙人的布放位置如图 1 所示。十字阵由 B&K8105 水听器 and 三角支架组成，实验中将十字阵沉底布放。聘请蛙人在水听器附近游动，蛙人游动过程中携带有 GPS，采集蛙人辐射的声信号。采集系统由 B&k2692 信号调理单元和 B&K3560C 采集器组成，实现对十字阵四通道同步采集。十字阵中每个水听器到直线阵中心的距离是 78 cm，因此每条直线上两个阵元的距离是 156 cm。角度分辨率 $\Delta\theta = \arcsin(1.22\lambda/L)$ ，其中 λ 是水中声波的波长， L 是阵长。当信号频率是 80 kHz 时，角度分辨率是 0.81° ；当信号频率是 30 kHz 时，角度分辨率是 2.16° 。蛙人在水中游动较慢，十字阵可以满足探测蛙人方位的需求。

3 信号处理方法

传统的信号处理方法(如：频谱分析、相关等)都只是单纯从频域或时域对信号进行分析和处理。其中对确定性信号或者随机信号的基本假设是：它们是平稳和时不变的^[11]。传统的频谱分析只是单纯从频域获知被分析信号的频带及其频带范围等特征。为了更好分析水下蛙人辐射噪声信号的变化及其特征，选择短时傅里叶变换对蛙人信号进行时频分析，并在此基础上提取蛙人的显著频带。显著频带是一个能反应蛙人信号频率特征，有别于环境噪声，在能量上明显高于环境噪声的频带范围。因此，提取显著频带的原则是蛙人信号相对于环境噪声具有较高的信噪比。在此基础上提取蛙人呼吸信号包络，研究蛙人辐射噪声特征。

3.1 辐射噪声特征研究

根据蛙人辐射噪声的显著频带设计滤波器以提高显著频带的信噪比，然后提取蛙人辐射噪声信号的包络，对蛙人辐射噪声信号包络傅里叶变换后可以清晰观察到水下蛙人呼吸特征的低频分布情况，具体流程如图 2 所示。

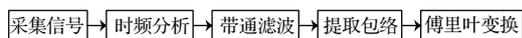


图 2 蛙人包络特征提取

Fig. 2 The process of envelope feature extraction

3.2 被动测向方法

对蛙人测向的信号处理流程如图 3 所示，处理得到的目标方位将以极坐标强度图的方式显示。

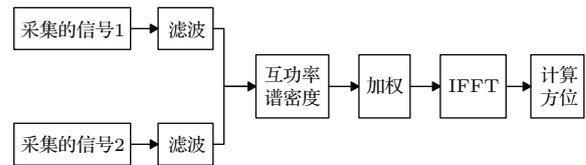


图 3 测向信号处理流程

Fig. 3 Direction finding signal processing process

互相关信号处理法通过计算不同水听器对接收信号之间的互相关来确定目标的方位角^[3]。假设待处理的信号是两个相距 L 的水听器接收的。两个水听器接收来自与两个水听器连线成 α 夹角的目标的辐射噪声。目标和水听器之间的距离远大于两个水听器的间距 L 。水听器和目标的相对位置示意如图 4 所示。目标与水听器的距离比水听器之间的距离 L 大的多。目标辐射噪声到达两个水听器的时间延时为 ΔT ：

$$\Delta T = \frac{L \sin \alpha}{c}, \quad (1)$$

其中， ΔT 是时间延时， c 是水中的声速。假设声场中记录的噪声是蛙人发出的，并且两个水听器接收的信号 $h_1(t)$ 和 $h_2(t)$ 是这个蛙人的辐射噪声经过延时和缩放得到的。

$$h_2(t) = \beta h_1(t - \Delta T), \quad (2)$$

其中 β 是缩放因子 (β 的值由衰减和水听器的灵敏度而定)。信号 $h_1(t)$ 和 $h_2(t)$ 的互相关函数 $R_{12}(\tau)$ 定义为

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(t')h_2(\tau - t')dt'. \quad (3)$$

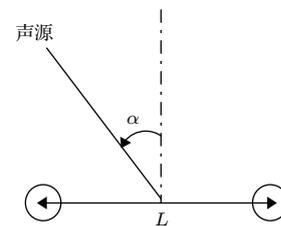


图 4 水听器阵和目标位置示意

Fig. 4 Hydrophone array and the target position

根据式 (3) 得到两个信号的互相关函数：

$$R_{12}(\tau) = \beta R_{11}(\tau - \Delta T), \quad (4)$$

根据互相关函数性质，互相关函数 $R_{12}(\tau)$ 在 $\tau = \Delta T$ 处得到最大值。可以根据互相关函数最大值的位置(即 ΔT 的位置)，利用式 (1) 估计蛙人的

方位。由于单个线列阵在垂直平面上是无方向的,因此,当计算得出目标方位后,它就会出现左、右模糊的歧义解,如图5所示。

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \arcsin\left(\frac{c\Delta T}{L}\right), \\ \alpha_2 &= \pi - \arcsin\left(\frac{c\Delta T}{L}\right),\end{aligned}\quad (5)$$

由式(5)得出,根据同一个延时可以得到声源的两个方向角,因此利用一个水听器对计算声源的方向角将产生歧义解。使用两个水听器对分别进行互相关处理,然后再对处理结果进行对比可以消除单个水听器对测向产生的歧义解^[1]。

计算互相关时使用FFT方法计算互功率谱密度,然后进行加权,再计算求得互相关。比较了几种加权方法,使用加权方法可以有效抑制蛙人的干扰信号^[12]。

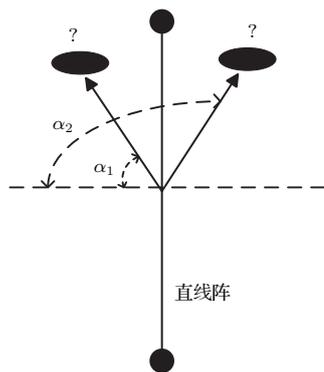


图5 直线阵方位模糊歧义方位

Fig. 5 The ambiguous bearing of the line array

4 实验结果

针对十字阵采集的实验数据,首先研究了蛙人的辐射噪声,然后对多通道的数据进行解方位计算,得到了蛙人的在水下的方位信息。具体分析如下。

4.1 辐射噪声特征研究

蛙人辐射噪声数据的时频图如图6所示,从图6中可明显观察到蛙人呼吸信号的周期性信号特征和辐射噪声的宽频特征。蛙人呼吸具有明显的周期性特征,频率成分丰富,频带宽;从频率轴上看,蛙人信号具有显著的频带,而且这种呼吸器辐射噪声的显著频带范围特别宽。图7是一组水下蛙人辐射噪声和背景噪声的对比,可以看出蛙人辐射噪声比背景噪声高出约20 dB。

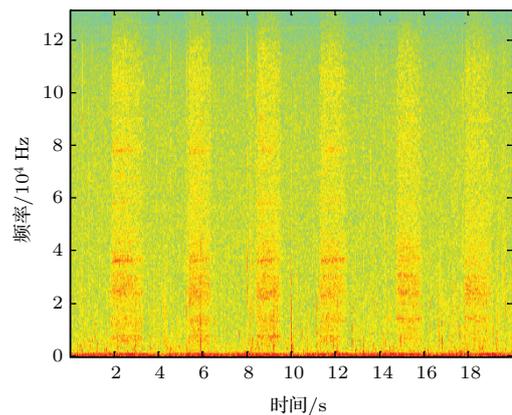


图6 蛙人辐射噪声信号时频图

Fig. 6 The time-frequency diagram of frogman radiation noise signal

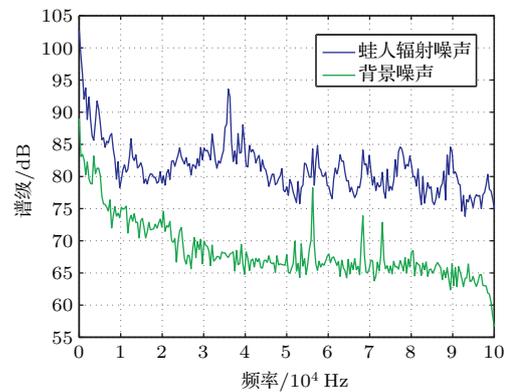


图7 蛙人谱级

Fig. 7 The spectrum level of swimmer

图6中可以明显观察到蛙人的呼吸周期性,然后时域波形中无法观察到蛙人辐射噪声的周期性特征,对辐射噪声进行滤波和包络提取,以得到蛙人呼吸的周期性特征,如图8所示。观察单个呼吸信号,其长度集中在1 s到1.6 s之间,呼吸周期集中在2.6 s到3.4 s之间,这些水下蛙人辐射噪声信号固有的物理特征都可以作为水下开式蛙人的识别特征量。

图9所示是蛙人携带另一种呼吸器在水下活动时的辐射噪声时频图,从图9中可以更明显地看出蛙人辐射噪声信号相对于环境噪声所固有的显著频带的分布。对比图6、图9可以看出由于不同的水下呼吸器可能携带着不同型号、品牌的呼吸调节器,呼吸调节器一级头在气体压力转换过程中辐射噪声的频率成分及频带范围可能不一样,这就需要具体问题具体分析。

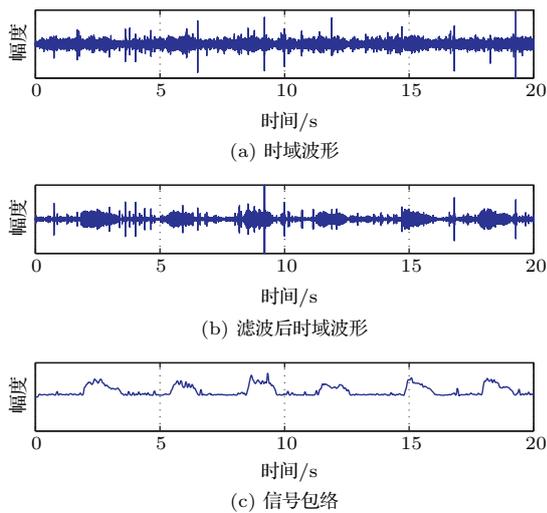


图8 蛙人信号包络

Fig. 8 The envelope of frogman signal

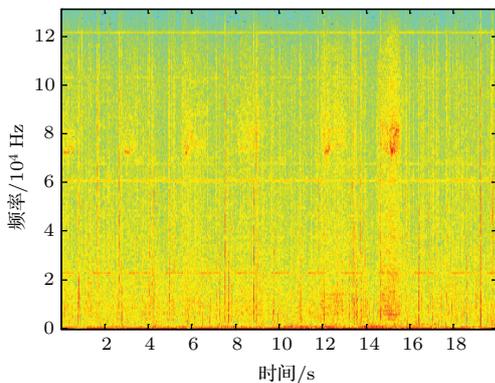


图9 另一种呼吸器的蛙人辐射噪声时频图

Fig. 9 The time-frequency diagram of another frogman radiation noise signal

虽然不同呼吸器的显著频带差异明显,然而其呼吸频率分布却呈现出了相似的规律。分析蛙人

辐射噪声的时频图说明了蛙人辐射噪声信号的基本特征:水下蛙人呼吸具有低频周期性,呼吸频率在0.32 Hz左右,如图10所示呼吸频率主要集中在0.15 Hz到0.4 Hz范围内。每个呼吸周期内包含丰富的高频信号成分。简单地说,实际采集的蛙人信号主要由呼吸器产生的高频信号成分组成,并被蛙人呼吸的低频周期信号调制^[11]。

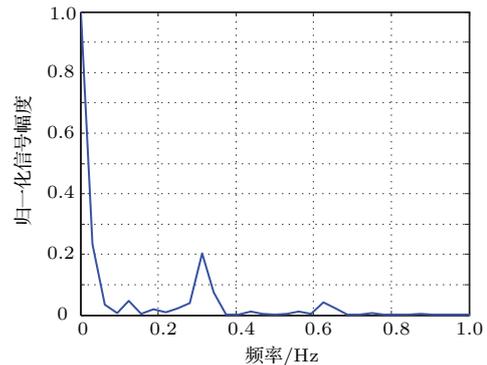


图10 信号包络谱局部显示

Fig. 10 Local displaying of envelope spectral

4.2 被动测向研究

对水下蛙人的测向结果如图11的极坐标强度图所示。图11中显示的是蛙人随着时间变化的方位变化过程,不包含蛙人的距离信息。圆的半径表示时间过程,整个圆圈表示方位。时间越早得到的方位信息越靠近圆心,最新得到的目标的方位信息在极坐标方位图圆的最边缘。由于水下蛙人呼吸具有周期性,因此得到方位信息变化过程是一个间断的带有周期过程。图11中两幅图中的红色直线是由于电噪声干扰产生的。

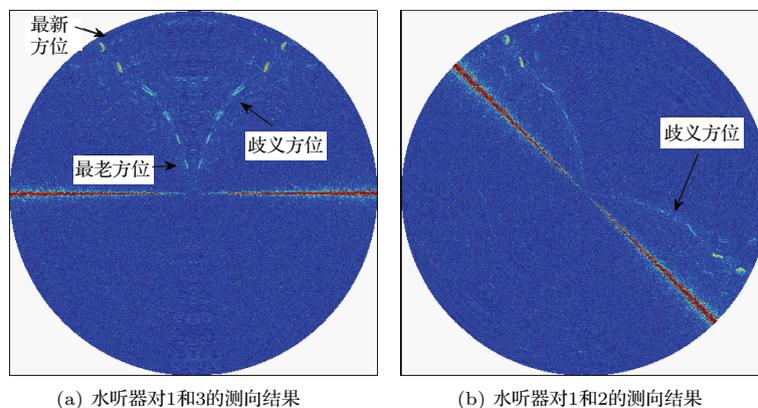


图11 蛙人测向结果

Fig. 11 The direction finding results of frogman

根据理论分析,一个水听器对解算的方向会出现一个歧义的方位,图11分别是十字阵中两对水听器对的测向结果,均有一个歧义解,对比两个极坐标方位图即可得到水下蛙人唯一的方向信息。图11(a)是如图1中所示的水听器1和水听器3联合处理的结果,图11(b)是水听器1和水听器2联合处理的结果,根据十字阵的结构,两组水听器对构成的直线之间存在一个 45° 的夹角。因此将图11(b)旋转 45° 更容易观察确定蛙人的方位。联合两个水听器对的处理结果,即可以得到蛙人在水下的唯一方位。结合GPS数据分析得出,十字水听器阵可在60 m范围内实现对蛙人的有效探测和测向。

5 结论与展望

本文通过浅海实验验证了小尺度水听器阵对水下蛙人进行被动探测测向的可行性。实验结果表明,携带不同呼吸器的蛙人辐射噪声频带分布差异显著,但是周期性是水下蛙人辐射噪声的一个共有特征;由于蛙人辐射噪声级低、水听器灵敏度低、环境背景噪声高,目前的十字阵在60 m范围内实现了对蛙人的测向。

尽管取得了一些实验成果,然而还有大量的后续工作需要继续研究。每种型号的呼吸器辐射噪声都不相同,即使是同一个人的呼吸特征也是不完全相同的,辐射噪声信号与个人的心理状态等因素都有关系。因此,构建稳健通用的蛙人识别特征量是蛙人探测识别定位工作的重中之重。目前得到的只是蛙人的平面方位信息,着力开发探测定位蛙人在水下三维方位信息的阵和算法是以后工作的另一个重点。

参 考 文 献

- [1] FILLINGER L, SUTIN A, SEDUNOVE A. Acoustic ship signature measurements by cross-correlation method[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2011, 129(2): 774-778.
- [2] DZIELSKI J. Guidance of an unmanned underwater vehicle using[C]//Waterside Security Conference (WSS), 2010 International. IEEE, 2010: 1-4.
- [3] SUTIN A. Stevens passive acoustic system for underwater surveillance[C]//Waterside Security Conference (WSS), 2010 International. IEEE, 2010: 1-6.
- [4] DONSKOY D. Acoustic emission mechanism from SCUBA diving equipment[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2007, 121(5): 3086.
- [5] LENNARTSSON R K, DALLERG E, PERSSON L, et al. Passive acoustic detection and classification of divers in harbor environments[C]. *OCEANS*, 2009: 1-7.
- [6] LENNARTSSON R K, IMAS L, TIMOTHY Y. Air turbulence induced vibration of SCUBA breathing apparatus[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2007, 122(5): 2965.
- [7] LENNARTSSON R K, DALBERG E, FRISTEDT T. Electric detection of divers in harbor environments[C]. *Proc.Oceans'09 MTS/IEEE, Biloxi, USA*, 2009: 105-108.
- [8] 王萍. 水下小目标被动声学特性及探测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [9] 张伟豪. 水下蛙人被动探测技术实验研究[J]. *声学学报*, 2012, 37(3): 301-307.
- [10] ZHANG Weihao. Experiment and study for passive acoustic detection of underwater divers[J]. *Acta Acustica*, 2012, 37(3): 301-307.
- [11] 刘东涛. 基于包络特征的识别方法研究[C]//2009年全国水声学学术交流暨水声学分会换届改选会议论文集. 大连, 2009: 296-299.
- [12] 张伟豪. 水下蛙人探测及声处置关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011: 35-77.
- [13] KNAPP C, CARTER G. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions*, 1976, 23(4): 320-327.