

水下蛙人主被动探测实验研究

聂东虎^{1,2}, 乔钢^{1,2}, 朱知萌^{1,2}, 张锴³

(1. 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001;
3. 中国电子科技集团公司第二十研究所, 陕西西安 710068)

摘要: 为了对抗来自水下的“非对称”威胁小目标, 以携带开放式呼吸器的蛙人作为研究对象, 对蛙人的肺部组织、氧气瓶和呼吸产生的气泡的目标强度进行了仿真和实验研究, 并测量了不同姿态蛙人的目标强度, 分别给出了水池和湖中的测量结果; 根据水池和松花湖测量数据, 对呼吸声和呼吸器减压阀等辐射源噪声的时频特性进行了分析, 并给出了蛙人呼吸声源级估计的结果。

关键词: 蛙人探测; 声辐射特性; 目标强度; 声源级; 呼吸特征

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-04-0300-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.04.002

Experimental research of passive and active detection for underwater diver

NIE Dong-hu^{1,2}, QIAO Gang^{1,2}, ZHU Zhi-meng^{1,2}, ZHANG Kai³

(1. Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

2. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

3. No 20th Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: To counter ‘asymmetric’ threats from underwater small target, the diver carrying with open-circuit SCUBA is conducted as research target. The simulation and experimental researches on the target strengths of lung tissue of diver, oxygen tanks and breathing bubbles have been carried out. The tank and lake experiments are conducted and the results of the tests are given. Target strengths of diver in different poses are measured in lake experiment. The time-frequency characteristics of the frogman breathing and the pressure reducing valve noise are analyzed, and the experimental results of diver radiated noise in different movement rhythms are obtained.

Key words: diver detection; acoustic radiation characteristics; target strength; acoustic source level; respiration feature

0 引言

水下蛙人探测是非传统安全保障领域重要的新的研究方向, 是当前国内外小目标探测声呐发展的重点和难点, 对港口、大型舰船、滨海娱乐场所和海上石油钻井平台等重点水域安保和防御具有重要意义。在港口等重要水域布放声学传感器, 将水声作为信息的载体, 对入侵目标进行探测、定位和识别是目前对抗来自水下蛙人的“非对称”威胁的最主要手段, 可用被动和主动两种方式进行探测。

主动探测方面, 国外已经有多家公司研制并投

入使用了部分先进的专用蛙人探测声呐系统对重点水域进行防护和监控。国内近年来也加大了这方面的研究力度, 并取得了一定的进展。但由于技术敏感等因素, 公开的有价值数据很少。其中有代表性的有: 国外, Sarangapani^[1]使用傅里叶映射方法, 建立了蛙人目标强度的模型, 即目标强度是入射波方向和频率的复杂函数; Hollet^[2]给出了发射信号为 100 kHz 时, 携带闭式呼吸器的蛙人目标强度为 -20~-25 dB, 携带开放式呼吸器的蛙人目标强度约 -15 dB。Zampolli^[3]用软壳柱状空气腔及硬壳柱状空气腔来模拟蛙人肺、内脏组织和钢质的呼吸器壳, 并给出了随频率变化的向前和向后散射的目标强度。国内, 姜卫^[4]等人利用比较法测量了动物肺部组织的目标强度, 在 20~40 kHz 频段内平均为 -25.3 dB; 张波^[5,6]等人研究了影响蛙人目标强度的主要因素, 通过理论建模和实验测量研究了蛙人身体和各种潜水装备的回波机理, 其中蛙人呼吸产生的气泡群对回波的贡献最大, 另外相对潜水装备, 蛙人身体对回波的贡献很小。

收稿日期: 2014-07-10; 修回日期: 2014-10-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(HEUCF140514)、国家自然科学基金(61401114; 61431004; 11304056)、水声对抗重点实验室支持项目资助(SSDKKFJJ-2014-02-01)、水声技术重点实验室基金项目资助(9140C200501150C20002)、上海交通大学海洋工程国家重点实验室开放基金资助(1414)

作者简介: 聂东虎(1978-), 男, 辽宁义县人, 博士, 讲师, 研究方向为水下目标探测和声信号处理。

通讯作者: 聂东虎, E-mail: niedonghu@hrbeu.edu.cn

被动探测主要利用蛙人的辐射噪声(呼吸声、呼吸器减压阀和呼出气泡破裂声等)进行探测。具有隐蔽性好的优点,且辐射噪声携带目标的特征信息,可用于目标识别。但由于目标辐射噪声功率很低,可探测距离有限,当工作在港口等噪声环境时的探测性能下降。尽管如此,它仍然是主动探测受限情况下的替代,例如强混响环境或避免发射信号的场所等。美国斯蒂文森理工学院和荷兰的防御应用科学研究院是最主要的研究力量,通过实验研究了蛙人辐射噪声特征^[7-13],并分别研制了水下被动监测系统 SPADES 和 Delphinus system,后者最远探测距离可达 350 m。

本文在已有研究基础上,以携带开放式呼吸器的蛙人作为研究对象,对蛙人的目标辐射噪声特性和声散射特性进行研究,给出了仿真和测试的结果。

1 蛙人目标强度仿真与测量

1.1 肺部组织建模与仿真

肺是蛙人散射的重要来源,用一个声学软球体来模拟人的肺部组织,目标强度计算公式为^[1-4]

$$TS=20\log(R/2) \quad (1)$$

式中, R 表示软球体的半径。一个人的肺部组织体积大约为 3~4 L,取 3.5 L 计算得到的目标强度为 -26.5 dB。

1.2 氧气瓶建模与仿真

除肺部组织以外,蛙人的潜水服、氧气瓶也是重要的散射源。用刚性圆柱来模拟氧气瓶,目标强度计算公式如下^[1]:

$$TS=10\lg\frac{aL^2}{2\lambda}\left[\frac{\sin(kL\sin\theta)}{kL\sin\theta}\right]^2\cos^2\theta \quad (2)$$

其中: L 是圆柱体长度; a 是圆柱体的半径,单位为 m; k 是波数,声波入射方向与法线成 θ 角,且满足远场 $r > L^2/\lambda$ 和 $ka \gg 1$ 的条件。

在固定频率、不同入射角的情况下对刚性圆柱的目标强度进行了仿真,目标强度随入射角变化的坐标图如图 1 所示。其中入射频率 $f=40$ kHz,声速 $c=1500$ m/s,长 $L=0.4$ m,半径 $a=0.06$ m。从图中可以看出,在入射角 θ 较小时(相当圆柱法线方向)目标强度值在 -10 dB 附近。

固定入射角、不同频率的情况下对刚性圆柱的目标强度进行了仿真,其中,入射频率 $f=20\sim60$ kHz,声速 $c=1500$ m/s,长 $L=0.4$ m,半径 $a=0.06$ m,入射角 θ 分别为 1° 、 5° 、 10° 。仿真结果如图 2 所示,入射角为 1° 时,目标强度随频率提高而缓慢增

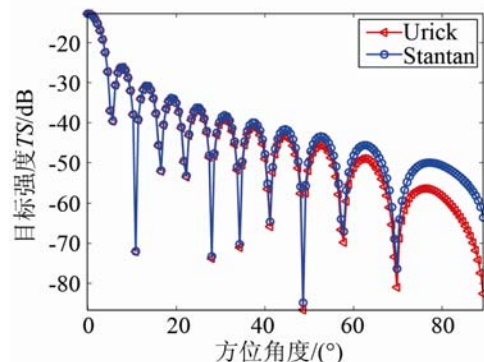


图1 固定频率下目标强度随入射角度变化坐标图

Fig.1 Diagram of target strength versus incident angle under fixed-frequency

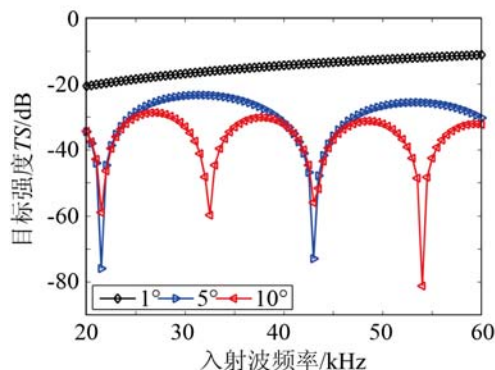


图2 固定入射角度下目标强度随频率变化曲线

Fig.2 Polar diagram of target strength versus incident angle under fixed-frequency

大,入射角为 5° 和 10° 时,目标强度随频率变化具有较大的起伏。造成这种现象的原因为:在目标尺寸固定条件下,入射声波在圆柱法线附近时,目标强度与入射波的波长的对数成反比关系,因此随声波频率提高而增大;当入射角变大时,目标强度不仅与入射波波长有关,还和入射角有关,由式(2)可知,目标对入射波的调制作用引起目标强度的起伏振荡。

1.3 目标强度测量

目标强度的测量一般采用两种方法:直接法和比较法。直接法是用标准水听器接收直达声信号和目标回波信号的电压值,根据球面波的传播理论进行计算:

$$TS=20\lg\frac{(2d_2+d_1)(d_2+d_1)}{(d_2+d_1+1)d_1}-20\lg\frac{U_{\text{直}}}{U_{\text{回}}} \quad (3)$$

式中: $U_{\text{回}}$ 表示蛙人回波信号的电压有效值; $U_{\text{直}}$ 表示直达声的电压有效值; d_1 表示发射换能器与标准水听器距离; d_2 表示标准水听器与蛙人的距离。

采用比较法测量目标的目标强度公式为

$$TS_M=20\lg\frac{U_M}{U_Q}+TS_Q \quad (4)$$

式中: U_M 为目标回波的电压有效值; U_Q 为标准球回波的电压有效值; TS_Q 为标准球的目标强度, 可根据式(1)计算。

1.4 目标强度的水池和湖试结果

1.4.1 猪肺目标强度测量

用充气的猪肺模拟人体肺部, 在水池中用比较法测量其目标强度, 标准目标球半径分别为 $R_1=5.65\text{ cm}$, $R_2=7.95\text{ cm}$ (见图 3), 用式(4)可计算得到它们的目标强度分别为 -30.98 dB 和 -28.01 dB 。发射换能器有较窄的指向性, 接收水听器为标准水听器 B&K8104, 灵敏度为 -207 dB 。



图 3 标准球和猪肺
Fig.3 Standard ball and pig lung

以信号频率为中心频点, 前后 5 kHz 带宽进行带通滤波, 滤波器采用 7 阶巴特沃斯带通滤波器。用比较法测得猪肺的目标强度随频率变化的曲线如图 4 所示。在整个的频段范围内猪肺的目标强度平均值为 -30.3 dB , 与仿真值 -26.5 dB 较接近。

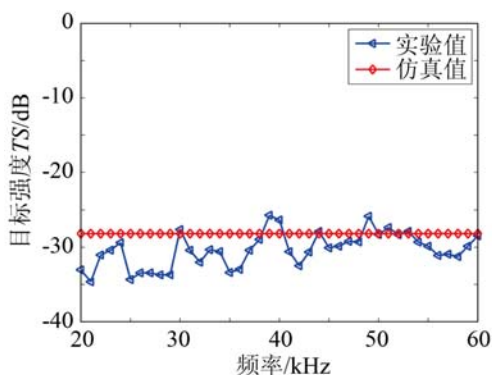


图 4 猪肺目标强度随频率变化曲线
Fig.4 Target strength of pig lung versus frequency

1.4.2 模拟氧气瓶的目标强度测量

用一个型号为 MFX/ABC4、直径和高度分别为 14 cm 和 47 cm 的干粉灭火器模拟氧气瓶, 进行水池实验。测得灭火器目标强度随频率变化曲线如图 5 所示, 在整个频段范围内平均值为 -16.6 dB , 图中红色曲线表示入射角为 1° 时刚性圆柱目标强度随频率变化的仿真值。由于实验时入射声波不是严格在法线附近, 因此回波强度的测量值产生了起伏。

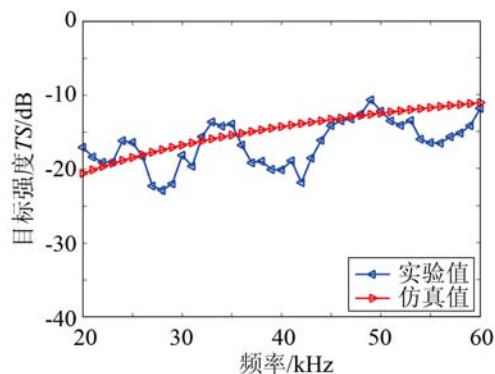


图 5 灭火器目标强度随频率变化曲线
Fig.5 Target strength of fire extinguisher versus frequency

1.4.3 蛙人目标强度的湖试结果

2009 年 9 月在松花湖进行了蛙人目标探测的湖上实验, 其中目标强度采用直接法进行测量。

蛙人身高约为 175 cm , 体重约 80 kg 。发射换能器、标准水听器、蛙人同位于水下 6 m 处, 并保持一条直线上, 标准水听器位于发射换能器和蛙人之间, 发射换能器距标准水听器 1 m , 标准水听器距蛙人 3.5 m 。在蛙人下潜的位置前后用铅鱼坠两根绳, 绳子每隔 1 m 打一个结, 作为距离标记, 如图 6 所示。

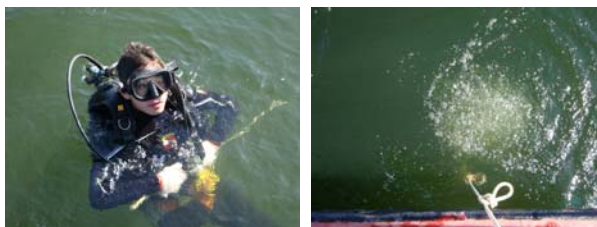


图 6 蛙人目标强度测量现场照片
Fig.6 Photos for the diver target strength measurement

本文给出了 $20\sim70\text{ kHz}$ 频段内, 正面、侧面、平躺三种姿态下的目标强度测量结果, 如图 7 所示。正面时目标强度平均值为 -15.1 dB , 侧面时目标强度平均值为 -15.9 dB , 平躺时目标强度平均值为 -25.3 dB 。造成目标强度差别的主要原因是散射

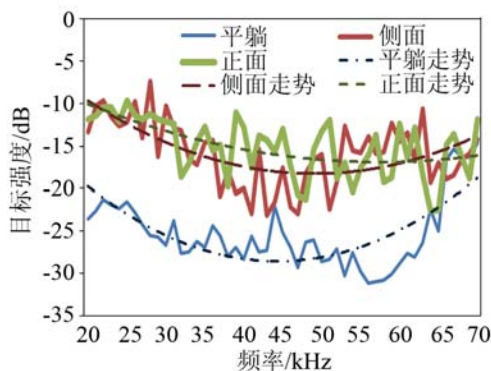


图 7 蛙人目标强度随频率变化曲线
Fig.7 Target strength of diver versus frequency

截面不同,正面和侧面姿态时,散射截面比较大,而平躺的时候散射截面比较小。其中目标强度相对较高的测量值,是来自呼吸气泡的散射贡献。

从图7中走势来看,随着频率的上升蛙人目标强度先降后升,这种起伏变化情况与1.2节的柱体的仿真结果大致吻合。正面时的主要散射目标是肺部和氧气瓶,氧气瓶被蛙人部分遮挡,因此目标强度起伏相对平缓;侧面时肺部和氧气瓶都参与散射,但入射波很难控制在目标法线方向,因此相对起伏稍大;平躺时入射波与目标法线方向偏离较大,因此起伏最大。但由于蛙人目标更复杂,一方面反射波是由肺部、氧气瓶和气泡等多个子目标共同散射叠加的结果,另一方面湖试的蛙人姿态和距离等很难严格控制,因此与仿真和模拟目标的实验结果也产生了较大差别。

2 蛙人辐射噪声测量与分析

2.1 蛙人辐射噪声的水池仿真和湖试测量

在水池试验中,分别用吹气法产生与人呼吸节奏一致的气泡和用气泵产生连续的气泡来模拟蛙人的呼气泡。实验时标准水听器放置于水下1 m深,距离呼出气泡的管子2 m,产生气泡的管口端口位于水下1 m。图8为它们的功率谱密度曲线。

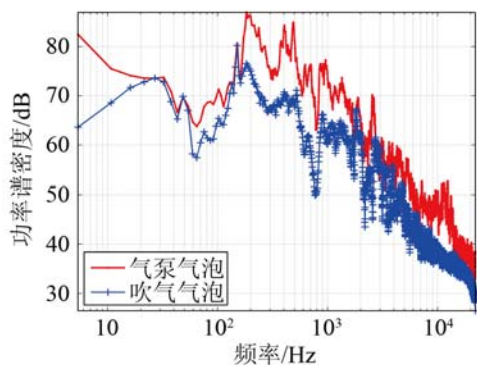


图8 水池模拟气泡的功率谱密度

Fig.8 Power spectrum density of simulated bubbles in pool test

由图8可知,吹气法产生的有节奏气泡功率谱密度与气泵产生的连续气泡功率谱密度曲线的构成大致相似,在功率谱密度上后者大于前者,尤其在0~30 Hz、60~130 Hz和160~1700 Hz之间,具有较明显的差别,这与两者产生的方式不同有关。

湖试实验示意图如图9所示,蛙人在水下保持相对静止,进行正常节奏呼吸,用信号绳与操作人员通信。

采用Welch谱估计方法,对湖试时的背景噪声和蛙人呼吸声的功率谱密度进行估计,结果如图10

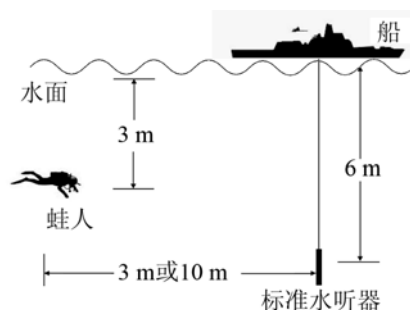


图9 湖上试验设备布放示意图

Fig.9 Equipmental layout for lake trial

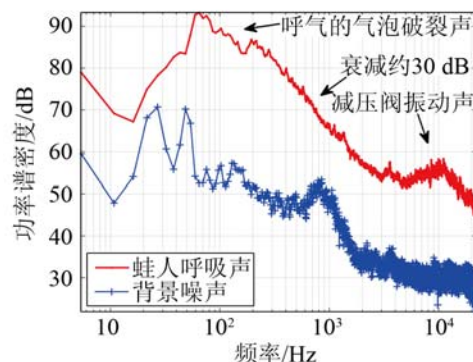


图10 蛙人呼吸声和背景噪声的功率谱密度

Fig.10 Power spectrum densities of diver breathing sound and background noise in lake trial

所示,其中蛙人距离水听器3 m。由图10可知:当水中有蛙人呼吸声时,信号的功率明显上升,在30~300 Hz之间能量分布较大,并在64.6 Hz附近产生谱峰(图10是对表1中3 m处的第3个样本的处理结果),这部分能量是由蛙人呼出的气泡破裂产生的,听起来是连续的“咕噜声”,没有明显的节奏;气泡在上升破裂过程中,能量不断消耗,在300~1200 Hz的频带上有约20 dB的衰减,每倍频程大致减小10 dB,1200~3000 Hz有约10 dB的衰减;在蛙人呼吸声的时频谱上,可以观察到明显的节奏变化,这是由周期的吸气动作引起的,吸气引起减压阀振动产生声波,听起来是周期出现的“哧”声,分布在3~20 kHz之间,并在11.03 kHz附近产生谱峰。从背景噪声看,在1 kHz附近声级约40 dB,大致与深海0级海况的噪声谱级相当,1 kHz以下则大致对应航运稀少情况下的噪声谱级。

2.2 蛙人呼吸信号特征

由2.1节的讨论可知:吸气和呼气产生的辐射噪声分布在不同的频带。吸气引起的减压阀振动声频率相对较高,具有较明显的节奏。呼出气泡噪声频率较低,在上升破裂过程中形成连续的辐射噪声。

按照呼吸声的频率分布,对信号进行滤波,并采用周期图法对滤波后信号包络的功率谱密度进行估计,图11给出了蛙人呼气和吸气噪声、气泵

气泡噪声、吹气法气泡噪声的包络在 0~1 Hz 之间的功率谱密度曲线。由图 11 可知,蛙人呼吸和吸气以及吹气法产生的噪声信号包络功率谱密度在 0.2~0.4 Hz 之间有一个明显的峰值,约 0.33 Hz,这和蛙人的呼吸频率相一致。

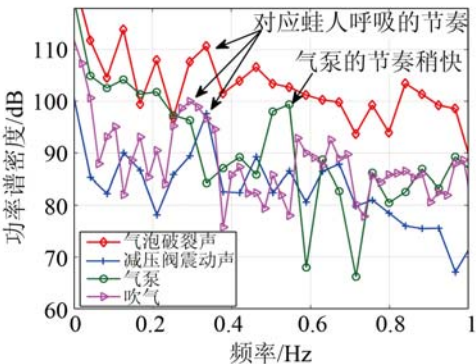


图 11 蛙人呼吸声和模拟呼吸声包络的功率谱密度曲线
Fig.11 Envelop power spectrum densities of the diver breathing sound and the simulated breathing sound

上述三者的谱结构和形成原因不同:水池吹气法产生气泡的管子放置比较浅,气泡很快就上升到水面,与下一次的气泡破裂声有时间差,因而产生节奏。而湖试在水下 3 m 深,气泡破裂形成连续的辐射噪声,但吸气部分被滤除后,留下的空白也会引起较明显的节奏,这与吹气法没有吸气过程类似。气泡破裂的“咕噜…咕噜…”声也暗含着周期过程,因此在功率谱密度曲线上产生了多个峰值,且幅值相对较大,但与吸气的情况不同。气泵产生的气泡噪声也有多个峰值,但是相对频率稍高,且连续的气泡破裂声在更低的频率上产生了较高的谱值,也与吸气的情况不同。因此,吸气的节奏特征可作为检测和识别蛙人的一个重要依据。

2.3 蛙人呼吸声辐射声源级测量

根据目标辐射声源级的定义和本试验中采用的设备布放方式,声源级的计算公式为:

声源级=呼吸声最大的谱峰值-灵敏度+
传播损失-放大倍数-3dB (5)

其中,水听器灵敏度为-207 dB,分别在 3 m 和 10 m 处测量,测量放大器的放大倍数为 60 dB,式中的-3 dB 表示折算到有效值。采用 Welch 谱估计方法,对多个周期的蛙人呼吸声样本的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)和均方谱(Mean Square Spectrum, MSS)进行估计,并通过对应的最大谱峰峰值计算声源级,计算结果如表 1 所示,表中结果是折算到距离目标 1 m 处的声源级。声源级的计算与谱估计的方法有关,两种方法估计的声源级相差约 8.6 dB。

表 1 蛙人呼吸声的声源级湖试测量结果
Table 1 Diver breathing sound levels measured in lake trial

	样本 编号	呼吸周 期数	峰值频 率/Hz	声源级/dB	
				PSD 谱峰	MSS 谱峰
3 m 远处测 量结果	1	13	59.2	96.3	104.9
	2	10	75.4	98.1	106.7
	3	9	64.6	99.3	107.9
	4	7	75.4	99.0	107.7
	5	7	64.6	99.2	107.9
	6	8	64.6	98.5	107.1
	7	8	64.6	98.2	106.8
	8	10	64.6	96.8	106.4
	9	11	64.6	98.1	106.7
10 m 远处测 量结果	10	13	64.6	95.8	104.5
	11	4	48.4	99.5	108.2
	12	14	48.4	99.0	107.6
	13	13	48.4	98.4	107.0
	14	7	48.4	98.8	107.4
	15	7	48.4	98.8	107.4
	16	7	48.4	99.0	107.6
	17	12	48.4	99.3	108.0
	18	13	48.4	98.4	107.1
	19	4	80.7	100.8	109.4
	20	6	48.4	99.9	108.5

2.4 蛙人呼吸声探测距离

实验当天天气晴朗、无风,水文条件良好,便携式发电机通过橡胶垫和船体传播的噪声是最主要的干扰。蛙人由近向远处游,最远能监听 70 m 远处蛙人的呼吸声。蛙人由近及远的运动过程中,呼出气泡的破裂声在传播过程中衰减相对较小,吸气引起的减压阀振动声的衰减相对较大,在 70 m 处时,只能听到气泡破裂产生的“咕噜声”,而减压阀振动产生的有节律的“哧声”已经消失。图 12 分别给出了 70 m 远处 10 Hz~2 kHz 频段内呼吸和

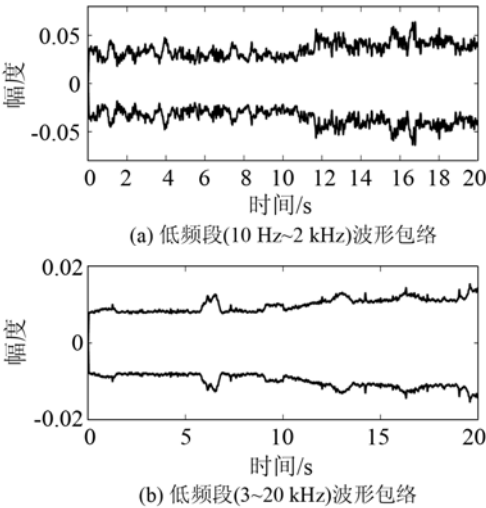


图 12 在 70 m 处时蛙人呼吸声包络
Fig.12 Envelop of the diver breathing sound signal at 70 m away

3~20 kHz 的吸气噪声信号的包络。吸气声信号包络尚能看到“鼓包”,但相较呼气声信号包络,已经非常微弱。

3 结 论

通过理论分析、仿真、水池试验和湖上试验验证,得到以下结论:

(1) 蛙人的潜水装备、呼吸气泡是主要的散射源,肺部次之。另外,不同姿态、不同的入射波频率对蛙人的目标强度也有影响,在 20~70 kHz 频率内测得三种姿态下的目标强度平均值分别为-15.1 dB、-15.9 dB、-25.3 dB。

(2) 蛙人呼吸声信号的能量主要分布在 30~300 Hz 之间,这部分能量是由呼气时的气泡破裂产生的,300~3000 Hz 的频带上约有 30 dB 的衰减。吸气引起的减压阀振动声信号主要集中在高频段(2 kHz 以上),在 11.03 kHz 附近产生了较明显的谱峰,但能量相对较低。高频段信号包络呈明显的周期性,周期约为 3 s,与蛙人的呼吸周期相同,可作为目标检测和识别的依据。

(3) 分别采用 PSD 和 MSS 的最大谱峰值对蛙人呼吸声的辐射声源级进行计算,结果约为 95~101 dB 和 104~110 dB。声源级的测量结果受多方面的因素影响,比如蛙人在水中很难控制距离以及呼吸的时强时弱等,因此测量结果不可避免地存在误差。另外,测量是在近场进行的,一定程度上影响了测量结果。在当时的噪声环境下,蛙人呼吸声最远能探测到的距离为 70 m 左右。

参 考 文 献

- [1] Sarangapani S, Miller J H, Potty G R, et al. Measurements and modeling of the target strength of divers[C]// 6th Biennial Conference on Engineering Systems of Design and Analysis, Brest, France, 2005.
- [2] Hollet R D, Kessel R T, Pinto M. At-sea measurements of diver target strengths at 100 kHz: Measure technique and first results[R]. Hamburg, Germany: Undersea Defence Technology Conference and Exhibition 2006.
- [3] Zampolli M, Jensen F, Tesei A. Review of target strength information for waterside security applications[C]// Proceedings of the 1st Int. Conf. on Waterside Security (WSS 2008), Copenhagen, Denmark, August 2008.
- [4] 姜卫, 范军, 胡碰. 声呐频段内动物体肺部组织目标强度的水下测量[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 45-47.
JIANG Wei, FAN Jun, HU Peng. The underwater measurement of the target strengths of animal lung tissue at the sonar frequency[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(5): 45-47.
- [5] 张波, 马忠成. 蛙人目标强度的水下测量[J]. 声学技术, 2009, 28(5): 303-304.
ZHANG Bo, MA Zhongcheng. Underwater measurement of target strength of diver[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(5): 303-304.
- [6] 张波, 刘文章. 蛙人回波建模与实验研究[J]. 应用声学, 2010, 29(4): 313-320.
ZHANG Bo, LIU Wenzhang. Modeling and experimental study of echo from a diver[J]. Applied Acoustics, 2010, 29(4): 313-320.
- [7] Borowski B, Sutin A, Roh H S, et al. Passive acoustic threat detection in estuarine environments[C]// Proc. SPIE, 2008, v. 6945, p. 694513.
- [8] Stolkin R, Radhakrishnan S, Sutin A, et al. Passive acoustic detection of modulated underwater sounds from biological and anthropogenic sources[C]// OCEANS 2007, Sept. 29, 2007-Oct. 4, 2007: 1-8.
- [9] Chen X, Wang R, Tureli U. Passive acoustic detection of divers under strong interference[C]// MTS/IEEE Oceans 06, Boston, USA, 2006.
- [10] Stolkin R, Sutin A, Radhakrishnan S, et al. Feature based passive acoustic detection of a diver[C]// SPIE Defense and Security Symposium, 2006.
- [11] Chung Kil W, Li Hongbin, Sutin A. A frequency-domain multi-band matched-filter approach to passive diver detection[C]// Signals, Systems and Computers, 2007. ACSSC 2007. Conference Record of the Forty-First Asilomar Conference on (11 April 2008), pp. 1252-1256.
- [12] Stolkin R a, Florescu J. Probabilistic analysis of a passive acoustic diver detection system for optimal sensor placement and extensions to localization and tracking[C]// Oceans 2007 MTS/IEEE Conference, Vancouver, BC, 29 September-4 October 2007.
- [13] Chen X, Tureli U. Passive acoustic detection of divers using single hydrophone[C]// 40th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, ACSSC '06, Pacific Grove, CA, 29 October-1 November 2006.