

引用格式: 侯森, 胡长青. 海洋中持续泄漏气泡的声学检测[J]. 声学技术, 2020, 39(6): 669-675. [HOU Sen, HU Changqing. Acoustic detection of continued leaking bubbles in the ocean[J]. Technical Acoustics, 39(6): 669-675.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.06.003

海洋中持续泄漏气泡的声学检测

侯 森^{1,2}, 胡长青¹

(1. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 201815; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 声学方法是检测水面下气体泄漏的主要方法。由于气泡振荡产生的声信号能量较弱, 且频段往往与环境噪声频段重叠, 不易提取和分析。针对这个问题, 提出了一种结合频域积累与时频能量检测的处理方法, 通过频域积累提高信噪比后, 利用一种自适应时频检测算法分析气泡声信号特性。海上实验表明, 该方法可以在较强环境噪声下对持续泄漏的气泡进行有效检测。

关键词: 气体泄漏; 检测方法; 频域积累; 时频分析

中图分类号: O427.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-06-0669-07

Acoustic detection of continued leaking bubbles in the ocean

HOU Sen^{1,2}, HU Changqing¹

(1. Shanghai Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201815, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Acoustic method is the main method to detect gas leakage under water surface. It is difficult to extract and analyze the bubble acoustic signals when the leakage flow is small, because the ambient noise is strong and its frequency band overlaps with bubble sound. To solve this problem, an algorithm combining frequency domain accumulation and time-frequency detection is proposed in this paper. After increasing the signal-to-noise ratio by frequency domain accumulation, an adaptive time-frequency detection algorithm is used to extract and analyze periodic bubble acoustic signals. Experiments on the sea show that the method in this paper can effectively detect continuous leaking bubbles under strong environmental noise.

Key words: underwater gas leak; detection method; frequency domain; time-frequency analysis accumulation

0 引 言

气体泄漏广泛存在于海洋环境之中, 其中海底甲烷水合物自然泄漏及相关开采运输造成的泄漏, 往往都具有长时间持续泄漏的特征, 不仅会造成经济损失, 更容易引发安全和环境问题^[1-3]。依据泄漏气泡产生的声学信号作为检测识别方法, 具有易于实现、适用性强等特点。

为了在实际海洋环境中对气体泄漏的声学检测, 很多人对气泡声信号进行了研究。王鑫等^[4]对气泡声发射信号进行了分类, 并指出当泄漏量较小时, 气泡声发射信号以振荡声为主。侯森等^[5]基于水合物气泡泄漏时的物理特性, 对泄漏气泡振荡特性进行了修正, 计算了不同环境下泄漏

气泡半径与能量和半径与频率的关系。杜非^[6]指出海洋中持续性气泡泄漏具有较强的周期性和重复性, 并研究了微量气泡泄漏时的声学特性。吴连军等^[7]研究了微弱信号的提取方法, 指出频域积累法可以有效提高窄带信号的信噪比。此外, 还有很多人对微弱声信号的提取和检测做出了研究^[8-10]。

为了解决气泡信号容易被环境噪声遮蔽的问题, 本文从气泡振荡特性的研究出发, 采用了频域积累的方法进行降噪处理, 并针对连续泄漏气泡具有强周期性的特点, 通过一种基于时频分析的自适应检测算法, 判别有无气泡声信号并对气泡振荡主频率进行检测。通过仿真和实验, 验证了本文方法可以在较强干扰的环境中实现对持续泄漏气泡的检测、判别。

1 泄漏气泡声学特性

1.1 气泡动力学模型

当泄漏量较小时, 持续泄漏气泡的声信号主

收稿日期: 2020-06-11; 修回日期: 2020-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(11674353)资助项目。

作者简介: 侯森(1993-), 男, 山东济南人, 博士研究生, 研究方向为水声学。

通讯作者: 胡长青, E-mail: hchq@mail.ioa.ac.cn

要由气泡振荡产生^[4]。在构建气泡振荡模型时，做了以下假设：气泡为理想球形、液体不可压缩、忽略海流等因素引起的压力场变化并忽略泡内蒸气压。同时在模型中考虑了液体黏性以及气泡内气体非理想时对气泡振荡的影响。气泡内压强为

$$P_{i0} = P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \quad (1)$$

其中： P_0 为环境压强， R_0 为气泡平衡半径； P_{i0} 为气泡平衡时的内部压强； σ 为张力系数。考虑到实际气泡内为非理想气体，引入描述气泡可压缩性的系数 β 进行修正^[5]，则任意时刻下的气体状态方程如式(2)所示：

$$P_i \left[\frac{4\pi}{3} (R^3 - \beta R_0^3) \right]^\kappa = P_{i0} \left[\frac{4\pi}{3} (1 - \beta) R_0^3 \right]^\kappa \quad (2)$$

其中： P_i 为任意时刻的气体内部压强， R 为任意时刻下的气泡半径大小， κ 为多方指数。引入粘滞系数 u ，则任意时刻下气泡外部压强 P_{out} 为

$$P_{out} = P_i - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4u\dot{R}}{R} \quad (3)$$

假设液体不可压缩，根据能量守恒定理，液体动能的增量等于气泡对液体所做的功，如式(4)所示：

$$2\pi\rho R^3 \dot{R}^2 = \int_{R_0}^R (P_{out} - P_0) 4\pi R^2 dR \quad (4)$$

其中： \dot{R} 为气泡半径 R 的一阶导数，等式左边为动能的变化，等式右面为不考虑声波作用时气泡对液体所做的功。将式(1)~(3)代入式(4)中，并对 R 求导，可得式(5)，即修正后的 Rayleigh-Plesset 方程为^[5,11]

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left\{ \left[P_0 + \frac{2\sigma}{R} \right] \left[\frac{(1-\beta) R_0^3}{(R^3 - \beta R_0^3)} \right]^\kappa - P_0 - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4u\dot{R}}{R} \right\} \quad (5)$$

由于式(5)难以求取解析解，本文通过四阶龙格库塔(Runge-kutta)算法进行了特定初值下的数值求解。设环境参数如下： $P_0 = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ； $\beta = 0.1$ ； $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ； $\kappa = 1.4$ ； $\sigma = 72 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ ； $u = 8 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。气泡初始半径为平衡半径的 1.2 倍，即 $R_1/R_0 = 1.2$ 。则不同半径气泡的振动如图 1 所示，气泡在泄漏时获得初始能量，并围绕平衡半径做振荡衰减。从图 1 中可以看出，气泡振动声信号单频特性明显，且能量衰减很快，环境一定时，气泡振荡频率随气泡半径增大而降低；气泡振幅则随气泡半径增大而增大。

海洋环境中发生的泄漏通常具有持续性，并且有位置固定，压差、漏孔等参数在一定时间内稳定的特点^[6]。故同一泄漏点产生的气泡往往具有

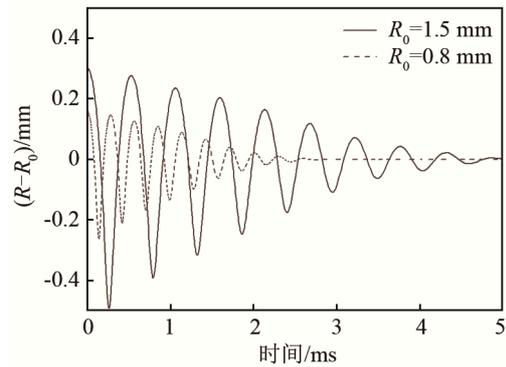


图 1 不同半径气泡振荡曲线
Fig.1 Vibrations of bubbles with different radii

气泡半径相近、泄漏气泡间隔相对恒定的特点。为模拟海洋环境中持续泄漏气泡的声信号，除采用上文的环境参数外，设生成气泡的平衡半径 R_0 为 1.3~1.8 mm 间的随机值，气泡生成间隔为 0.1 s。图 2 所示是理想无噪声的连续气泡声信号，由于气泡能量衰减极快，在时域上表现为振动频率相近的一连串脉冲信号。而当环境噪声能量较强时，气泡声信号易被淹没。在加入信噪比为 -10 dB 的加性高斯噪声后，噪声背景下的气泡声信号如图 3 所示，气泡声信号被环境噪声淹没。在强噪声干扰下，很难在时域上观察出气泡振荡引起的脉冲波形。

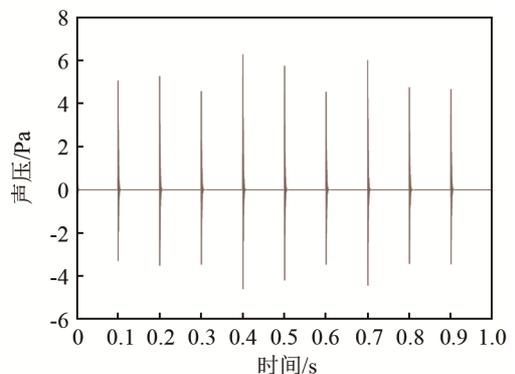


图 2 无噪声干扰时持续泄漏气泡声信号
Fig.2 Bubble sound signal without noise

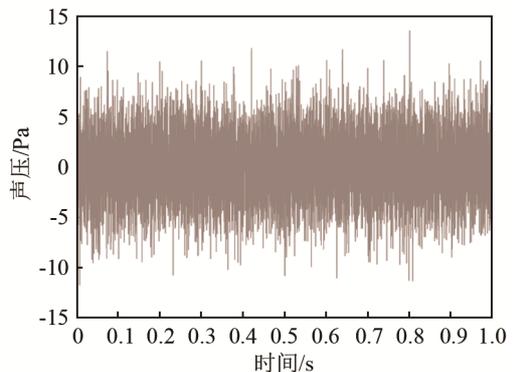


图 3 噪声背景下气泡声信号
Fig.3 Bubble sound signal under noise background

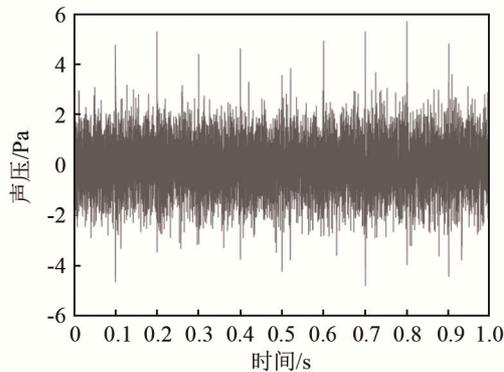
1.2 频域积累

针对气泡声信号易被环境噪声淹没的问题，由于气泡声和环境噪声频段重叠，传统的滤波方法难以有效滤除噪声干扰。当气泡持续泄漏时，泄漏产生的声信号主要集中在一定频段范围内，采用频域积累的方法，可以使气泡声能量得到明显加强；而环境噪声的相关性差，经过频域累加后，其能量不容易被积累，故可以有效提高信噪比。频域积累法的主要步骤为：将待处理的信号 $x(n)$ 分割成 M 段等长度的信号片段，依次将各信号片段做傅里叶变换并在频域进行累加，基于离散傅里叶变换的频域累加公式为^[12]

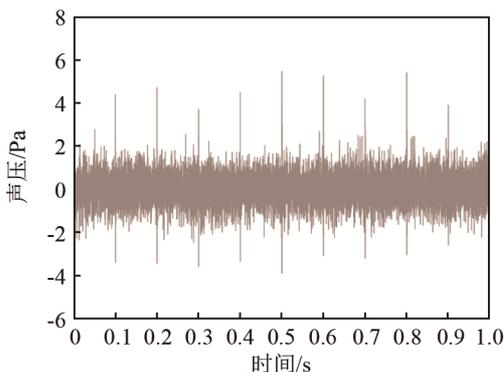
$$X(L) = \sum_{m=0}^M \sum_{l=0}^{L-1} x_m(l) W_L^{lk}, k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (6)$$

其中： $x_m(l)$ 为第 m 段信号， L 为离散傅里叶变换的点数， $W_L = e^{-j\frac{2\pi}{L}}$ 表示旋转因子， $X(L)$ 为傅里叶变换后的频域信号。将经过频域积累后的 $X(L)$ 进行反傅里叶变换即可得重构的时域信号波形。对图 3 进行频域积累降噪处理，重构后的时域信号如图 4 所示。

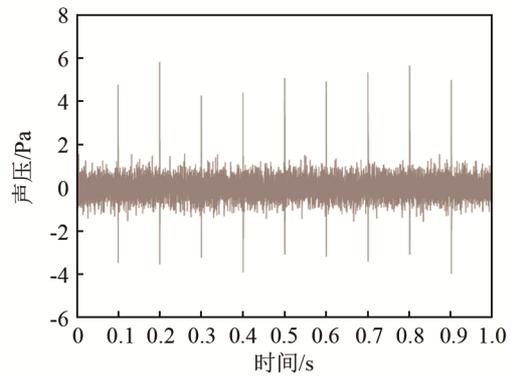
由图 4 和图 2 的对比可以看出，经过频域积累处理，重构后的声信号可以较好地还原出原信号的时域波形，脉冲峰的间隔及振荡幅值等信息得到了较好保留。由图 4 和图 3 的对比可以看出，



(a) 频域积累 10 次



(b) 频域积累 25 次



(c) 频域积累 50 次

图 4 基于频域积累法降噪处理

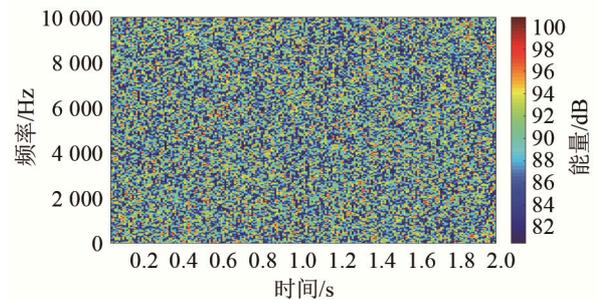
Fig.4 Noise reduction based on frequency domain accumulation

图 4 中信号的信噪比有明显的提升，且降噪效果随频域积累次数的增加而提升。

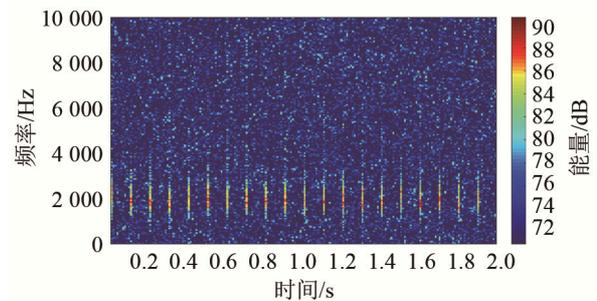
1.3 时频分析

对频域积累前后的声信号做时频分析，如图 5 所示。图 5(a)为图 3 中信号的时频图，从图中可以看出，当加入宽带强噪声干扰后，在时频图中难以分辨气泡声信号。图 5(b)为图 4(c)中信号的时频分析，从图中可以看出，进行 50 次频域积累处理后，信噪比明显提高，同时气泡的振荡频率以及泄漏时间间隔等信息保留较好。

从图 5(b)中可以看出，气泡声信号叠加噪声的模型中，能量随时间的变化在不同的频段处有明显的差异，为此对图 5(b)进行了展开讨论，图 6 和



(a) 未经频域积累的时频图(图 3 中信号的时频图)

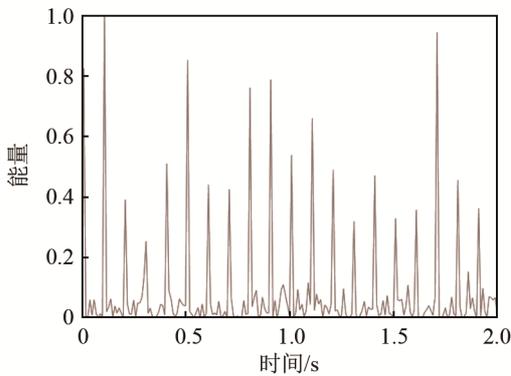


(b) 频域积累 50 次后的时频图(图 4(c)中信号的时频图)

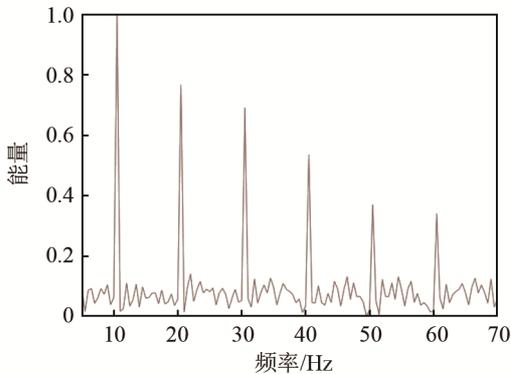
图 5 频域积累前后时频分析

Fig.5 Time-frequency analyses before and after frequency domain accumulation

图 7 分析了不同频段处的能量变化规律。图 6(a)为气泡振荡主频段处的时间-能量变化图,由于持续泄漏气泡具有很强的重复性,所以在能量变化上表现出了强周期性。为了描述能量的周期性变化,对时间-能量曲线做了频谱分析,结果如图 6(b)所示,时间-能量曲线的频谱具有明显的基频峰和谐波峰,基频和气泡泄漏时间间隔吻合。而非气泡振荡频段的能量变化如图 7 所示,可以发现能量随时间的变化具有随机性,时间-能量的频谱中也没有基频峰和谐波峰的对对应关系。所以检测特定频段下的能量变化规律可以作为气泡检测的依据,具体方法将在第 2 节中展开讨论。

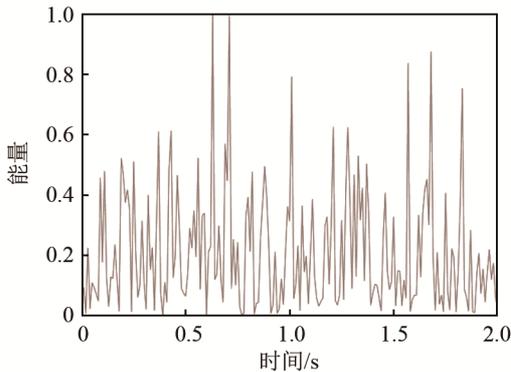


(a) 2 kHz 处的时间-能量曲线

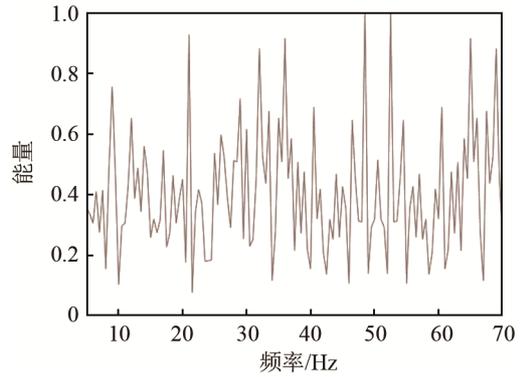


(b) 图 6(a)的频谱

图 6 气泡声信号主频段处声信号能量随时间和频率的变化
Fig.6 Variation of sound signal energy at bubble resonance frequencies with time and frequency



(a) 100 Hz 处的时间-能量曲线



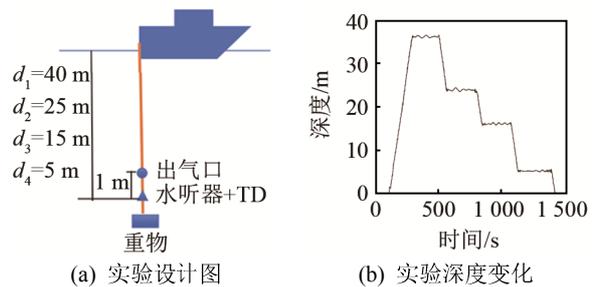
(b) 图 7(a)的频谱

图 7 低频段声信号能量随时间和频率的变化
Fig.7 Variation of sound signal energy at low frequencies with time and frequency

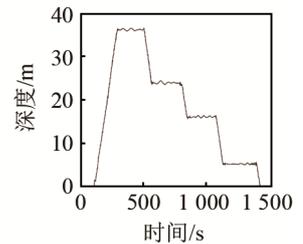
2 实验数据处理

2020 年项目组在某海域进行了海上实验。实验设计图如图 8(a)所示,利用高压气泵向单孔导气管供气来模拟海洋中持续泄漏气泡,在出气口下方 1 m 处布置水听器和温深仪(Temperature Depth, TD),并选取了 4 个深度测量气泡声信号数据。实验深度变化如图 8(b)所示,分别在 5.5、16.0、24.0 和 36.5 m 深度处进行了气泡声信号测量。自容式水听器和温深仪如图 8(c)示。实验平台及供气气泵如图 8(d)所示,实验过程中通过改变供气压强,保持实验过程压差基本恒定在 0.45 MPa。

以 5.5 m 处的声信号数据处理为例,经过滤波等预处理后,接收到的信号如图 9 所示。由图 9 可见,在实际海洋环境下,气泡信号被环境噪声完



(a) 实验设计图



(b) 实验深度变化



(c) 水听器和 TD



(d) 实验平台实景

图 8 实验场景简介

Fig.8 Introduction to the experimental scene

全淹没，很难观察到气泡信号特征。运用频域积累的方法进行 30 次处理后，结果如图 10 所示，从时域上看，信噪比有所提高，可以在部分时段见到气泡形成的脉冲峰，但噪声干扰依然严重。从图 11 中的时频图上看，除了一些可能由气泡信号引起的亮点外，低频段的噪声干扰明显，较难区分出气泡信号的能量频段。由此可见，在非理想噪声环境下，频域积累方法结合传统的时频分析不能有效检测气泡声。

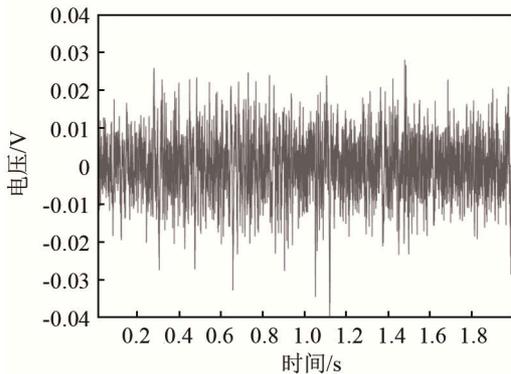


图 9 预处理后海洋环境中声信号图

Fig.9 Sound signal in marine environment after preprocessing

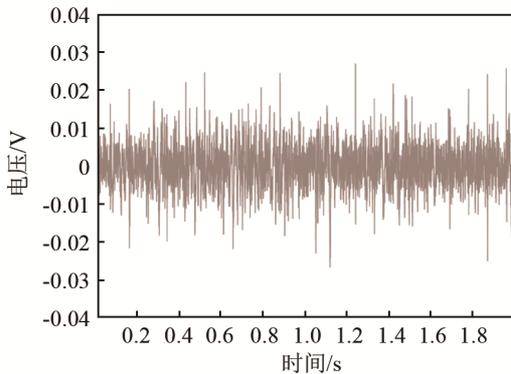


图 10 频域积累后气泡声信号图

Fig.10 The bubble sound signal after frequency domain accumulation

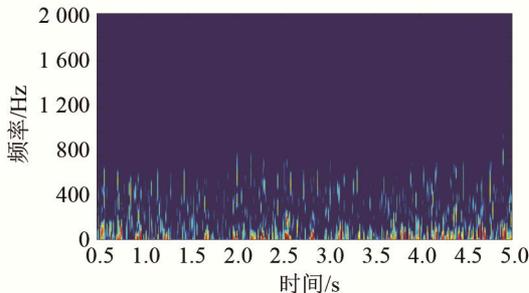


图 11 频域积累后气泡时频图

Fig.11 Time-frequency analysis of the bubble sound signal after frequency domain accumulation

为了在较强干扰下对气泡振荡频段进行检测，本文基于 1.3 节中的内容采用一种自适应检测算法对气泡声信号进行搜索判别。为了方便区

分，下述算法中 F 表示声信号的频率， f 表示为时间-能量频谱图中的频率。

(1) 假设 F_i 为待检测的声信号频率，计算声信号在 F_i 处的时间-能量变化关系并做频谱分析。对时间-能量曲线的频谱做归一化处理，并设 $[f_{min}, f_{max}]$ 为搜索区间，进行峰值检测。

(2) 从低频峰开始遍历搜索区间内的峰值，将第一个峰值 f_0 设为基频，并进行谐波检测。搜索 $[nf_0 - \Delta f, nf_0 + \Delta f]$ 区间内是否存在对应的第 n 次谐波峰 ($n=1, 2, \dots, 5$)。若 5 次检测中存在 3 次以上谐波峰，则认为可能存在气泡并记录下来；若谐波峰少于 3 次，则记结果为空，更换基频 f_0 重复此步骤，直到遍历搜索区间内所有峰值。若最后结果仍为空，则认为该频率 F_i 下无气泡。

(3) 对输出结果为可能存在气泡的频率值 F_i 进行结果检验。如果其邻近频段输出结果同样为可能存在气泡，则认为该频段为气泡振荡频率；如果邻近频段结果是无气泡，则认为 F_i 处的输出结果是虚警予以剔除。

上述检测算法流程如图 12 所示。其中考虑到

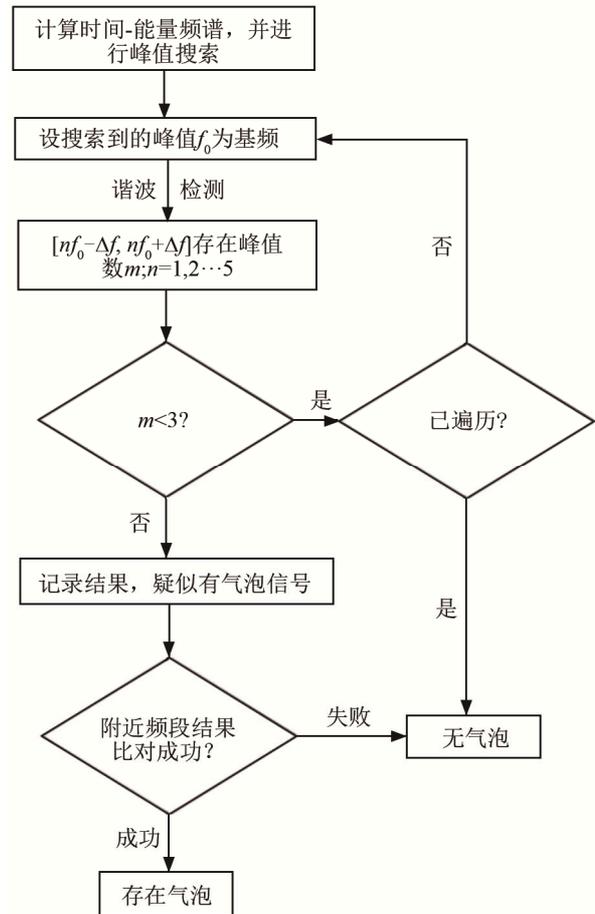


图 12 气泡声信号自适应检测流程图

Fig.12 Flowchart of adaptive detection of bubble sound signal

步骤(2)中, 基频 f_0 的误差会给高次谐波检测带来较大影响, 在每次检测到谐波后, 对基频 f_0 进行修正, 修正公式为

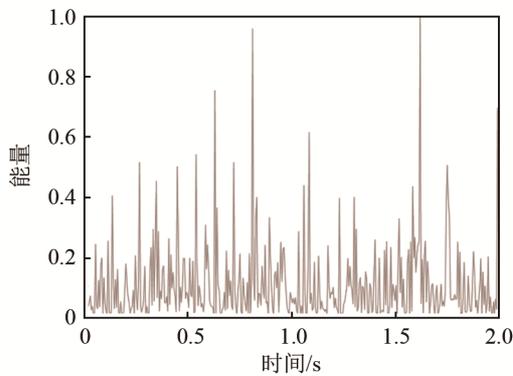
$$f_{n0} = \frac{(n+1)f_0 + \frac{2}{n}f_n}{n+3} \quad (7)$$

其中: f_{n0} 为第 n 次谐波检测后对基频的修正值; f_n 为检测到的第 n 次谐波的频率。

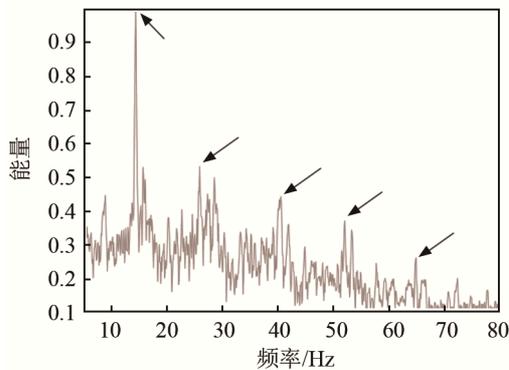
根据声信号主要能量的频段范围, 对频率 F 在 0.1~1.5 kHz 范围内的声信号进行了检测。设置参数如下: $f_{\min} = 2$ Hz, $f_{\max} = 100$ Hz, $\Delta f = 1$ Hz。代入上述算法, 对不同频率下有无气泡进行了检测。

不同频段处的声信号时间-能量及频谱变化如图 13、14 所示。通过图 13 可以发现, 气泡振荡频段附近的时间-能量曲线, 波形有较明显的周期性, 时间-能量的频谱具有较为明显的基频峰和谐波峰, 如图中箭头所指; 而在噪声干扰较强的频段, 如图 14 所示, 能量随时间变化没有明显的周期性, 且其频谱无谐波特性。通过检测算法可以明显区分。

经过本文算法在不同深度下检测得到的气泡声频率如表 1 所示。表 1 中第二列为检测结果存在气泡的频段范围; 第三列为第二列数据的中值,

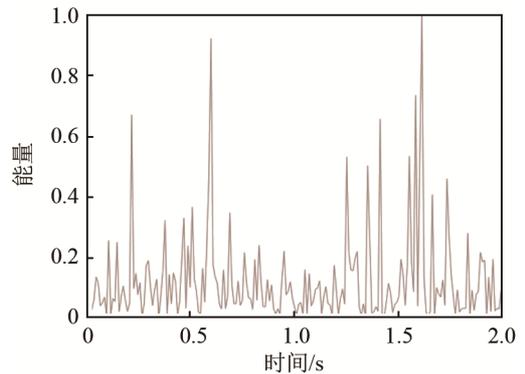


(a) 613 Hz 处的时间-能量曲线

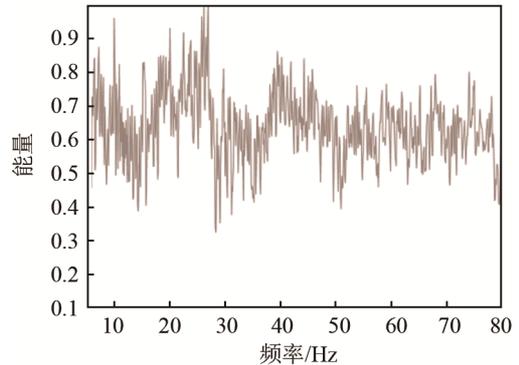


(b) 图 13(a) 的频谱分析

图 13 存在气泡频段的声信号能量随时间和频率的变化
Fig.13 Variation of sound signal energy at bubble resonance frequencies with time and frequency



(a) 200 Hz 处的时间-能量曲线



(b) 图 14(a) 的频谱

图 14 低频段处声信号的能量随时间和频率的变化
Fig.14 Variation of sound signal energy at low frequencies with time and frequency

近似认为是气泡振荡的主频率; 第四列数据为不同深度气泡声频率与 5.5 m 深处气泡频率的比值。Minneart^[13]指出气泡频率是气泡半径和压强的函数。由于漏孔大小及内外压差恒定, 不同深度的气泡半径仅由环境压强单一决定。故在本实验环境下, 可以由不同深度下的环境压强经 Minneart 频率公式计算得到频率比值, 如表 1 中第五列所示。通过表 1 中数据可以看出, 本文方法检测得到的气泡声频率随深度变化的趋势与理论值较为吻合, 表明了本文方法在实际海洋环境中检测提取气泡声信号的有效性。

表 1 不同深度下气泡声频率
Table 1 Bubble sound frequencies at different depths

深度/m	存在气泡频段/Hz	中心频率/Hz	实测频率比值	理论频率比值
5.5	578~651	615	1.000 0	1.000 0
16.0	904~937	921	1.497 6	1.526 8
24.0	1 074~1 116	1 095	1.780 5	1.917 1
36.5	1 510~1 526	1 518	2.468 3	2.486 2

3 结 论

实际海洋环境中的泄漏气泡声信号, 声能量

较弱,频谱与其它环境噪声频谱重叠,传统方法较难将气泡声信号分离检测出来。本文首先通过频域积累的方法,进行了降噪处理,提高了信噪比。并在此基础上,基于持续泄漏气泡在气泡振荡主频段附近能量存在强周期性的特点,采用一种基于时频分析的自适应检测算法,对不同频率的声信号进行有无气泡声的检测,最后对所有频率检测结果进行汇总,得出气泡声的频段范围。对海上实验数据的处理表明,本文方法可以较好地实现对气泡声信号的检测和提取。

参 考 文 献

- [1] YOON, J H, CHUN M K, LEE H. Generalized model for predicting phase behavior of clathrate hydrate[J]. *Aiche Journal*, 2002, **48**(6): 1317-1330.
- [2] LEIFE I, BOLESB J Measurement of marine hydrocarbon seepflow through fractured rock and unconsolidated sediment[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, **22**(4): 551-568.
- [3] SAUTER E J, MUYAKSHIN S I, CHARLOU J L, et al. Methane discharge from a deep-sea submarine mud volcano into the upper water column by gas hydrate-coated methane bubbles[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, **243**(3-4): 354-365.
- [4] 王鑫, 李晓磊, 李美慧, 等. 基于聚类方法的运动气泡声发射信号分析[J]. *化工学报*, 2018, **69**(7): 2964-2971.
WANG Xin, LI Xiaolei, LI Huimei, et al. Analyze acoustic emission signals from moving bubbles by clustering method[J]. *J Chem Ind Eng*, 2018, **69**(7): 2964-2971.
- [5] 侯森, 胡长青, 蒿超凡. 水合物分解的噪声研究[J]. *声学技术*, 2019, **38**(3): 258-262.
HOU Sen, HU Changqing, HAO Chaofan. Study of hydrate dissociation noise[J]. *Technical Acoustics*, 2019, **38**(3): 258-262.
- [6] 杜非. 基于气泡声学的水下气体泄漏检测方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
DU Fei. Research on underwater gas leak detection method based on bubble acoustic[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [7] 吴连军, 郝惠敏. 频域积累耦合 LMS 的噪声消除方法[J]. *仪表技术与传感器*, 2019(11): 117-121.
WU Lianjun, HAO Huimin. Denoising method of frequency domain accumulation coupling LMS algorithm[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019(11): 117-121.
- [8] 蒋留兵, 韦洪浪, 杨昌昱, 等. 频域积累与 EMD 去噪结合的微动信号检测算法[J]. *科技导报*, 2014, **32**(19): 36-42.
JIANG Liubing, WEI Hongliang, YANG Changyu, et al. Micro-tremor signal detection algorithm based on frequency domain cumulation combined with EMD de-noising[J]. *Sci Technol Rev*, 2014, **32**(19): 36-42.
- [9] DU F, LI Y B, JIN S J. Statistical analysis of the performance of MDL enumeration for multiple-missed detection in array processing[J]. *Sensors* 2015, **15**: 20250-20266.
- [10] 蒿超凡, 赵梅, 胡长青. 一种考虑时延的双气泡耦合振荡模型[J]. *声学技术*, 2020, **39**(4): 389-394.
HAO Chaofan, ZHAO Mei, HU Changqing. A double-bubble coupled oscillation model considering time delay[J]. *Technical Acoustics*, **39**(4): 389-394.
- [11] PLESSET M S, PROSPERETTI A. Bubble dynamics and cavitation[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1977, **9**(1): 145-185.
- [12] SINGLETON R C. An algorithm for computing the mixed radix fast Fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 1969, **17**(2): 93-103.
- [13] MINNAERT M. XVI. On musical air-bubbles and the sounds of running water[J]. *Philosophical Magazine*, 1933, **16**(104): 235-248.