

UUV 平台声兼容问题研究

梁 镜, 董 毅, 王 强

(中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要 UUV 平台上声呐设备集成度高, 设备之间容易相互干扰产生声兼容问题。通过理论与实例, 针对 UUV 平台上 2 类容易被忽略的声兼容问题——强信号干扰弱信号和谐波干扰, 对其产生机理进行了分析, 并据此提出了一套 UUV 平台声兼容的系统设计方案。研究可以为 UUV 平台的声兼容设计与分析解决实际工程应用中遇到的声兼容问题提供参考。

关键词 UUV; 声兼容; 平台设计; 谐波干扰

中图分类号 O427.9 : TB565 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2022)02-0103-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.02.002

Research on Acoustic Compatibility Problems of UUV Platform

LIANG Jing, DONG Yi, WANG Qiang

(No.710 R&D Institute, CSSC, Yichang 44300, China)

Abstract Sonar devices on UUV platform are highly integrated, thus acoustic compatibility problem may occur because of the interference between them. In this paper, the mechanism of two kinds of easily ignored acoustic compatibility problems, namely weak signal interference by strong signal and harmonic interference, is analyzed by theory and examples. Then a system design scheme of acoustic compatibility on UUV platform is proposed. This paper will provide a reference for the design and analysis of UUV acoustic compatibility, and help to solve these problems encountered in engineering applications.

Key words UUV; acoustic compatibility; platform design; harmonic interference

0 引言

水下无人航行器 (underwater unmanned vehicle, UUV) 是一种可在水下长时间潜航工作的海上无人装备, 具有自主控制、隐蔽性强、安全可靠、高效灵活等优点, 在海底勘察、反水雷、反潜跟踪、水下救援、情报监视与侦察等领域发挥着越来越重要的作用^[1]。而声呐设备是 UUV 水下作业必不可少的载荷, 例如“蛟龙”号载人深潜器便搭载有 9 种 16 部声呐^[2]。对于一型功能强大的侦察型 UUV,

其至少需要配备以下声呐设备: 1) 多普勒计程仪 (DVL) 作为辅助导航设备; 2) 前视声呐作为水下航行的避碰设备或目标探测设备; 3) 侧扫声呐作为水底目标探测设备; 4) 水下通信声呐作为 UUV 水下航行时与母船之间的通信设备; 5) 被动声呐作为水下目标辐射噪声侦听设备。此外, 往往还会配备 1 套超短基线定位声呐作为 UUV 水下航行安全的保障设备, 选配浅地层剖面仪或多波束测深声呐等提升其水下目标侦察能力。因此, 对于集成如此多声呐设备的 UUV, 若不经系统设计, 极容易

产生声兼容问题。

文献[3]对编队反潜时各平台声呐之间产生干扰的原因进行了分析, 文献[4]对解决平台联合作战时来自友舰声呐信号的干扰问题进行了研究, 文献[5]从声兼容的角度对主动声呐的发射波形设计问题进行了讨论, 文献[6]对多部主动声呐之间的频率间隔确定方法进行了研究。这些研究对某些特定场景下多台声呐之间的声兼容问题进行了探讨, 得出了一些有益结论, 但当前尚缺乏系统的针对 UUV 平台特点的 UUV 声兼容设计的研究。鉴于 UUV 平台声兼容设计需求, 本文通过工程实例对 UUV 平台上容易产生的强声信号干扰与谐波干扰 2 类声兼容问题进行了分析, 最后对 UUV 平台的声兼容设计提出了一套系统方案。

1 声兼容问题的产生

主动声呐设备有一定的工作频率, 当两声呐的工作频率相近时就容易相互干扰, 这一点在工程设计上已得到了充分的认识^[2, 4, 6]。本文考虑 UUV 平台上声呐设备的工作环境的复杂性, 认为还有至少以下 3 点容易被忽视的声兼容问题: 1) 平台振动噪声干扰; 2) 强信号干扰弱信号; 3) 谐波干扰。其中问题 1 是指平台运行时自身振动与振动带来的辐射噪声对声学设备的干扰, 该部分干扰随平台运行客观存在; 问题 2 与 3 则与声学设备在平台上工作的机制相关, 可通过合理的设计进行规避。本文将重点对问题 2 与 3 展开讨论。

1.1 强信号干扰弱信号

高频成像声呐是侦察型 UUV 常带的一类目标探测载荷, 其特点是依靠目标的回波信号实现对目标的探测、定位与成像, 因此目标回波信号的信噪比是影响成像效果的关键因素。根据声呐方程, 成像声呐的回声信号级可以表示为

$$EL=SL-2TL+TS$$

式中: SL 为高频成像声呐发射声源级; TL 为传播损失; TS 为你的目标强度。考虑高频信号声吸收, 150 m 左右距离 TL 将大于 50 dB; 假设目标 TS 约为 -30 dB (平坦泥或泥沙质海底), 成像声呐的声源级 SL 为 200 dB, 则回声信号 EL 约为 70 dB。

不考虑频率因素, 则该回声信号级与一般条件下海洋环境噪声的量级相近。而当存在其它声学设备的直达波干扰时 (即使直达波不在该发声设备发射波束的中心方向), 干扰信号的强度将大于 $SL-TL'-DL$, 其中 DL 是受波束指向性影响, 直达波干扰声信号相对波束声轴处声信号强度的衰减量。由于 UUV 平台整体尺寸较小 (假设平台上两声学设备相距 5 m), 则干扰直达波信号的传播损失 $TL' \approx 14$ dB, 而一般条件下单波束发射换能器旁瓣相对声轴处发射信号的衰减量 DL 不大于 50 dB。当两声学设备发射源级相近时, 直达波干扰信号强度将比成像声呐回波信号的强度高 66 dB 以上。由此可见, 主动声呐的回波信号比较弱, 极容易受污染, 例如受电磁信号污染, 即工程中常见的电磁兼容问题。该问题在工程设计中得到了很大的关注, 也有大量相关研究, 本文不再赘述, 而将重点放在强声信号对弱声信号的干扰问题的讨论上。

1.2 谐波干扰

由于非线性效应的存在, UUV 平台上工作频段不重叠的 2 部声呐也有可能由于非线性效应产生的谐波导致其相互干扰, 影响声呐的工作性能。

根据文献[7-8]的研究, 由于换能器材料与传播介质的非均匀性, 声波在换能器端与传播过程中都可能由于非线性效应的存在而产生谐波, 只是其谐波能量较弱, 一般工程应用中可忽略其影响。工程应用中有 2 类产生谐波的途径需引起我们关注, 即发射端方波信号产生谐波与接收端限幅失真产生谐波。

1.2.1 发射端产生谐波

声呐设备发射声波一般是信号源根据设计产生目标频率的信号, 经过功率放大器后加载到换能器端, 从而驱动换能器发射出声波。工程实现中, 为降低电路设计的复杂度, 往往会使用更容易实现的方波作为信号的形式, 此时若电路系统与发射换能器匹配不理想, 很容易在工作频率之外产生谐波分量。

图 1 与图 2 对 2 种不同占空比 (分别为 40% 与 50%) 的方波信号 (设计工作频率为 20 kHz) 进行了仿真, 可以看出除工作频率 20 kHz 外, 2

种占空比不同的方波产生了不同形式的谐波成分, 40%占空比的方波偶次谐波与奇次谐波均明显存在, 而 50%占空比的方波偶次谐波较弱, 奇次谐波较强。

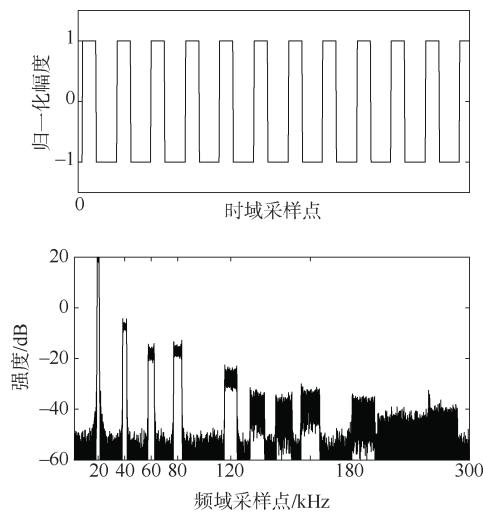


图 1 40% 占空比方波时、频域波形

Fig.1 Time and frequency domain waveform of 40% duty ratio square wave

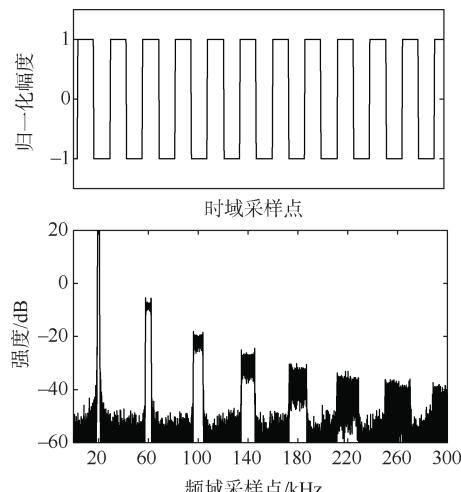


图 2 50% 占空比方波时、频域波形

Fig.2 Time and frequency domain waveform of 50% duty ratio square wave

1.2.2 接收端幅度失真产生谐波

受采样位数的限制, 主动声呐接收端 AD 采样的动态范围有限, 强干扰信号进入接收端时可能导致主动声呐接收信号限幅失真, 不仅会影响声呐信号处理, 还会由于信号失真带来更为复杂的谐波干扰问题^[9]。

图 3 仿真了工作频率为 20 kHz, 带宽 2 kHz, 脉冲宽度 10 ms 的 LFM 信号。当信号强度超出接受动态范围 6 dB 时信号限幅失真后的频谱, 可以看出此时信号产生了一连串奇次谐波, 其中 3 次谐波的强度仅比基波低 17 dB, 总体上呈现出随谐波的次数增加, 谐波的强度下降, 频带逐渐展宽的规律。

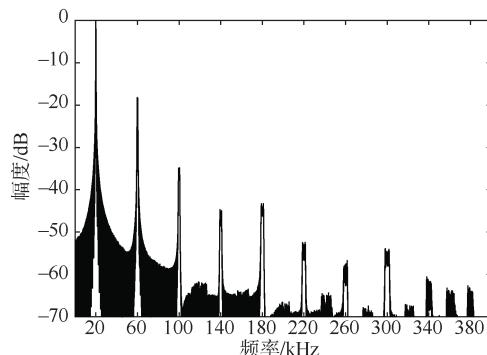


图 3 限幅失真信号谐波示意图

Fig.3 Harmonic schematic of limit distortion signal

2 实例分析

2.1 强信号干扰弱信号实例分析

工程应用中发现某 UUV 平台上水下声通信声呐对平台上的侧扫声呐图像造成了干扰, 其示例如图 4 所示。图中从右至左为单帧信号时延对应的距离, 从下至上代表不同时间对应的信号帧, 可以看出开启通信声呐后, 侧扫声呐图像中出现了长的条纹, 而关闭通信声呐后条纹消失。

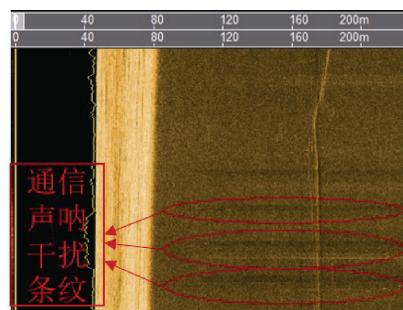


图 4 通信声呐直达声干扰实例图

Fig.4 Direct interference example diagram of communication sonar

已知该侧扫声呐工作频率为 300 kHz, 带宽 40 kHz, 脉冲宽度 5 ms, 声源级 225 dB; 该通信

声呐的工作周期为 15 s, 发射信号频率为 14 kHz, 带宽 4 kHz, 脉冲宽度 2 s, 试验中通过在 UUV 平台侧扫声呐安装处吊放标准水听器测得通信声呐在该位置的信号强度约为 165 dB。由前文分析可知侧扫声呐 150 m 左右距离, $TS \approx -30$ dB 的目标的回波强度 EL 约为 95 dB。根据侧扫声呐换能器频响曲线, 该换能器在 14 kHz 的响应级比 300 kHz 的小约 27 dB, 则可评估 150 m 处侧扫声呐回波信号的强度比水下通信声呐直达声波的强度低约 43 dB。

基于以上声呐参数与试验测试数据, 对存在通信声呐干扰情形下侧扫声呐的接收信号进行仿真, 结果如图 5。图 5 (a) 是通信声呐强干扰条件下侧扫声呐接收信号的频谱, 从频谱上可以看出干扰信号强度远高于目标回波信号强度; 图 5 (b) 是经过 30 阶带通滤波器 (中心频率 300 kHz, 带宽 40 kHz, 带外抑制大于 50 dB) 后接收信号的频谱。可见经过该理想带通滤波器后, 干扰信号依然很强, 这就解释了为什么通信声呐与侧扫声呐的工作频率相差甚远, 仍能对侧扫声呐图像造成干扰。

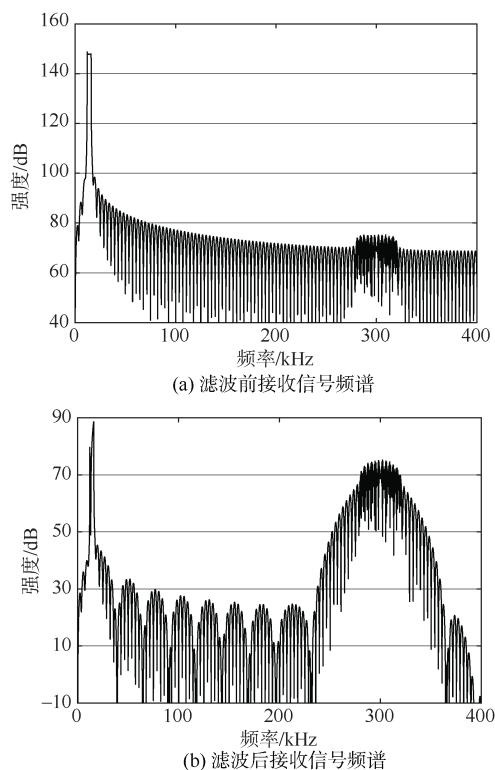


图 5 强声干扰信号仿真结果图

Fig.5 Simulation results of strong sound interference signal

2.2 限幅失真谐波干扰实例分析

1.2 节指出了 UUV 平台上声呐设备被谐波干扰的可能性, 其中发射端产生谐波问题可通过声呐单机设备优化设计避免, 而水介质中非线性传播产生的谐波能量较小, 在 UUV 的实际应用中影响较小, 这里结合工程应用中声呐的参数, 重点对接收端幅度失真谐波干扰问题进行算例分析。

如图 6 是某 UUV 平台上 DVL 对侧扫声呐图像的干扰示例图, 可以看到侧扫声呐图像上存在周期性的细亮条纹。

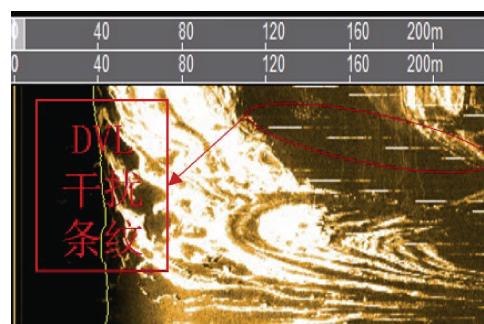


图 6 限幅失真谐波干扰实例图

Fig.6 An example diagram of harmonic interference of limit distortion signal

本文侧扫声呐信号处理端采样使用的是当前比较先进的 16 位 AD 采样, 有效动态量化范围达 85 dB。从上文的分析可知, 由于传播损失该侧扫声呐 150 m 距离上的回波与近处回波的强度可相差 100 dB 以上, 因此为避免接收信号 AD 采样时限幅失真, 侧扫声呐信号处理中在 AD 采样前先对接收信号进行固定增益与时变增益补偿, 从而降低接收信号强度的波动范围。设计中本侧扫声呐信号处理固定增益为 10 dB, 时变增益补偿采用 $2*20\lg(r)$ 的形式 (其中 r 为回波信号对应的距离)。AD 采样时有效量化的信号强度约为 150~235 dB。

试验中通过在 UUV 平台侧扫声呐安装处吊放标准水听器, 测得平台上 DVL 的工作周期为 1 s, 发射信号频率为 105 kHz, 带宽 3 kHz, 脉冲宽度 10 ms, 无明显谐波成分, 在侧扫声呐安装处测得 DVL 的信号强度约为 168 dB。当无干扰信号时, 从上文分析可知 150 m 距离上侧扫声呐回波信号余量约为 95 dB, 信号预处理端经过补偿后信号强

度约为 192 dB, 在 AD 采样有效量化范围内。根据侧扫声呐换能器频响曲线, 该换能器在 105 kHz 的响应级约比 300 kHz 的小 22 dB, 当 DVL 信号进入侧扫声呐的时间与侧扫声呐 150 m 处回波信号的时延重合时, 该干扰信号经过固定增益时变增益补偿将达到 243 dB, 超出侧扫声呐 AD 采样有效量化的信号强度上限为 8 dB。

基于以上声呐参数与试验测试数据, 对是否存在 DVL 干扰情形下侧扫声呐单个工作周期接收信号处理(包括增益补偿、AD 采样、带通滤波)进行仿真, 结果如图 7 所示。可以看出当存在干扰时, 不仅在 105 kHz 频点上存在明显干扰信号, 而且由于限幅失真, 在 315 kHz 频段产生了明显的 3 次谐波, 而该谐波刚好在侧扫声呐工作频段内, 且该谐波幅度比无干扰情形下侧扫声呐回波信号强度大得多, 这就解释了图 6 中开启 DVL 时侧扫声呐图像中出现周期性的细亮条纹的现象。

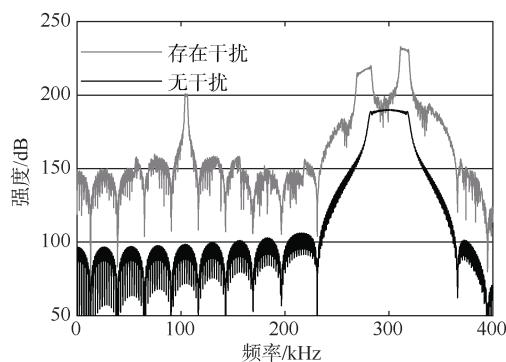


图 7 限幅失真干扰存在与否的对比图

Fig.7 Contrast diagram of simulation results between presence and absence of limited distortion interference

3 UUV 平台声兼容问题解决方案

从上文的分析可以看出, 诸如 UUV 这样集成多套声呐设备的平台, 要保证平台上各声呐设备的性能, 已不是单个声呐设备能解决的问题了, 需平台在设计之时就系统考虑声呐设备的声兼容问题。文献[4, 6, 10–11]针对一些典型声干扰场景提出了诸如频分法、时分法和空间分置等处理声兼容的方法, 但未对 UUV 这样的平台声兼容问题进行系统的考虑。本文结合 UUV 工程应用认为可以将 UUV

平台声兼容设计方法分为 3 个层次: 首先从平台总体设计上尽量降低声呐设备工作时产生声干扰的风险, 可通过工作频率设计与空间分置设计 2 种方法实现; 其次是从 UUV 平台声呐设备的应用流程上处理声兼容问题, 可通过时间同步方法实现; 最后是从单个声呐设备设计优化上处理声干扰问题:

3.1 从平台总体设计上降低声干扰风险

平台总体设计时可充分考虑平台上每个声呐设备的频率特性与波束指向性特性, 通过频率设计与空间设计来降低声呐设备之间相互干扰的风险。

频率设计是指在 UUV 平台设计之时就设计出平台上各个声呐设备的工作频段, 让每个声呐工作在不同的频段, 这样可以通过声呐设备自身信号处理端的带通滤波器降低其他频段干扰声的影响。在频率设计时要考虑谐波干扰的复杂性, 尽量使谐波频率不在其它声呐设备的工作频带范围内。

空间设计是指对声呐设备在 UUV 平台上的布局进行设计, 设计中要充分考虑声呐设备发射波束的指向性特性, 尽量避免一个声呐设备的发射波束主瓣、旁瓣指向另一个声呐设备的接收波束范围内, 从而降低出现直达波强声干扰的风险。当 2 个声呐设备由于工作原理限制, 无法避免主瓣直达波进入另一个声呐设备接收波束范围内时, 要尽量的拉大两者之间的直线距离, 减少干扰影响; 当一个声呐设备发射波束旁瓣指向另一个声呐接收波束范围内的时候, 可以考虑利用声障板削弱直达波的强度^[12]。

3.2 时间同步设计避免声干扰

时间同步设计是指将多个声呐设备发射信号的时序进行同步, 这样使得任一声呐处于接收状态时, 不会受到另一声呐发射信号的干扰。在时间同步设计中可根据待同步主动声呐工作时发射信号的脉冲宽度、接收信号的最大时延(即最大作用距离处对应的回波信号的时延), 或者主动声呐的固定发射周期特征来设计, 当 2 个待同步发射的主动声呐工作时发射信号的周期差异较大时, 可以结合软件设计使长周期的主动声呐发射一次, 而利用软件接收到的同步信号结合定时器使短周期的主动声呐发射几次, 这样可以在实现同步发射避免声干扰的同时最大限度的不影响单个设备的性能。

如图 8 是第 2 节实例分析中侧扫声呐与 DVL 经过同步设计后水池测试效果示意图, 从中可以看出当关闭同步发射时侧扫声呐图像中明显受到 DVL 发射信号(图中表现为规律性的细亮条纹)的干扰, 而当开启同步发射时, 由于侧扫声呐处于接收状态, DVL 不发射, 此时干扰条纹明显消失。

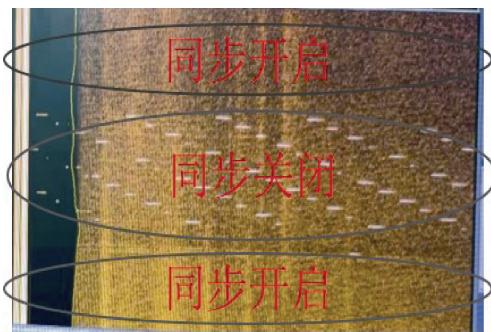


图 8 时间同步抗干扰效果图

Fig.8 Effect of time synchronous anti-interference

3.3 单声呐设备优化处理声干扰

除了从平台的角度解决声兼容问题, 单声呐设备还可以根据平台上的声环境, 针对性地从声呐自身工作原理与信号处理上削弱其他声呐设备发射信号的干扰。例如针对 2.1 节通信声呐强声信号干扰问题, 在侧扫声呐数字信号处理端增加陷波器抑制不在自身工作频段范围内的频率特征确定的强干扰信号; 针对 2.2 节中强干扰信号使侧扫声呐接收信号限幅失真的问题, 可以从侧扫声呐接收信号处理电路上做优化, 原信号处理流程是先对接收到的信号进行增益补偿处理, 再进行 AD 量化, 最后进行带通滤波, 这样干扰信号随增益补偿处理被放大使得接收信号在 AD 采样时限幅失真。若在增益补偿电路之前加一组模拟带通滤波器, 则由于干扰信号不在侧扫声呐工作频带内, 会被明显削弱, 此时再经过增益补偿处理, 就会大大降低接收信号限幅失真的风险。此外还可以针对性地设计主动声呐发射信号的波形, 使其相对干扰信号具有显著差异性特征, 这样有助于提高接收信号的信噪比, 降低干扰对自身工作性能的影响。

4 结束语

本文对集成多个声呐设备的 UUV 平台的声兼容

问题进行了研究, 指出了 UUV 平台上容易忽略的 2 类声兼容问题, 并结合工程设计实例对其产生的机理进行了分析, 最后提出了一套平台声兼容问题的系统解决方案。通过本文的研究可以得出如下结论:

1) 对于声呐设备集成度高的 UUV 平台, 由于来自其它声呐的直达声干扰信号强度远远高于声呐自身的回波信号, 容易带来强信号干扰弱信号的问题;

2) 由于非线性现象的存在, 声波在产生、传播、与接收端容易产生谐波, 从而带来谐波干扰的问题;

3) 可以从 UUV 平台总体声呐设备的工作频率设计与空间设计、工作流程上的时间同步设计, 及单声呐设备针对性的优化设计这 3 个层次上系统的解决 UUV 平台的声兼容问题。

参考文献

- [1] 肖玉杰, 邱志明, 石章松. UUV 国内外研究现状及若干关键问题综述[J]. 电光与控制, 2014, 21 (2): 46-49.
- [2] 朱敏, 张同伟, 杨波, 等. 蛟龙号载人潜水器声学系统[J]. 科学通报, 2014, 59 (35): 3463-3469.
- [3] 张卫, 吴波. 利用非技术手段提高水声兼容效能的研究[J]. 舰船电子工程, 2008, 28 (10): 166-169.
- [4] 刘贯领, 沈文苗. 一个解决声呐系统同频干扰的新思路[J]. 应用声学, 2009, 28 (2): 97-102.
- [5] 刘贯领, 沈文苗, 凌国民. 声呐信号抗混响能力和声兼容性分析[J]. 声学技术, 2008, 27 (3): 319-322.
- [6] 姜可宇. 水声系统主动声呐之间声兼容性理论分析与建模[J]. 声学技术, 2016, 35 (6): 274-276.
- [7] 倪以发, 吴文虬, 章德. 压电换能器的声非线性[J]. 南京大学学报, 1998, 34 (4): 449-454.
- [8] 兰朝凤, 隋雪梅, 韩闯, 等. 声波幅度对有限振幅声波传播畸变的影响[J]. 江苏大学学报, 2016, 37 (6): 679-683.
- [9] 刘寅, 许枫, 张纯. LFM 信号限幅失真对侧扫声呐声图的影响[J]. 微计算机信息, 2012, 28 (4): 6-8.
- [10] 冯宏, 韩礼波. 基于 FPGA 的声学同步控制器设计实现[J]. 声学与电子工程, 2017 (1): 42-45.
- [11] 冯雪磊, 葛锡云, 周宏坤, 等. 基于波束计算的水下声学探测设备声兼容传播过程分析[J]. 声学技术, 2019, 38 (5): 495-501.
- [12] 唐春丽, 方开翔, 顾振福. 声呐导流罩吸声障板声学特性的研究[J]. 应用声学, 2010, 29 (3): 202-205.

(责任编辑: 肖楚楚)