

空气介质中刚硬目标声回波对消的亮点模型

马忠成^{1,2}, 吕良浩¹, 杨宝山¹

(1. 大连测控技术研究所, 辽宁 大连 116013; 2. 水下测控技术重点实验室, 辽宁 大连 116013)

摘要:为了研究回波对消的物理基础, 本文根据线性系统理论建立了回波对消的亮点模型, 定义了声学中的对消度。从目标回波的物理声学理论出发, 得到亮点模型各参数的物理定义。构造回波对消系统和测试条件, 进行了2类单亮点目标的测试。在不同频率和信号类型下, 在1.8~2.8 kHz的测试频段, 信号达到6.0~14.6 dB的对消效果。与相关理论解的对比和试验表明, 回波对消亮点模型对不同目标和信号形式均具有普适性。

关键词:对消; 声回波; 亮点模型; 相位; 线性系统; 对消系统; 对消度; 参量阵

DOI: 10.11990/jheu.202506042

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.u.20250626.1741.014>

中图分类号: TG156 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2025)08-1503-05

Highlight model for cancellation of target acoustic echo in air medium

MA Zhongcheng^{1,2}, LYU Lianghao¹, YANG Baoshan¹

(1. Dalian Scientific Test & Control Technology Institute, Dalian 116013, China; 2. Science and Technology on Underwater Test and Control Laboratory, Dalian 116013, China)

Abstract: The physical basis of echo cancellation was studied. Considering linear system theory, a highlight model for echo cancellation was established, and the cancelling ratio in acoustics was defined. The physical definition of each parameter in the highlight model of the target echo was defined according to physical acoustic theory. An echo cancelling system was constructed, and the test conditions were determined. Two kinds of single highlight targets were tested, in the test frequency band of 1.8 kHz to 2.8 kHz. Comparison of the theoretical solution and experimental results shows that the highlight model for echo cancellation is universal for different targets and signal forms.

Keywords: cancellation; acoustic echo; highlight model; phase; linear system; cancelling system; cancelling ratio; parametric array

随着新型探测技术的发展, 单纯依靠吸波、吸声材料的隐身策略已难以实现对低频、宽带特征的控制, 基于回波对消的主动控制技术因其低频适应性和灵活性引起关注。事实上, 隐身只是低可探测性技术的狭义概念, 广义的低可探测性是指抑制、抵消对方探测信息或诱惑对方, 用主动、被动方式减小被探测的概率以及战术上的隐蔽、欺骗的所有方法。回波对消除用于特征控制, 还可转化为对抗和诱骗, 是用途更广泛的低可观察性技术途径^[1-2]。迄今为止, 雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 对消的研究较为深入。其基本原理是次级源实时产生与目标反射波幅度相同、相位相反的对消波。实际应用

中由于目标认知、信号处理等因素限制, 对消信号的实时性和准确性都存在偏差, 难以达到理想的对消效果。文献[1-6]以不同形式给出了对消波频率、幅度、相位偏差的表达公式, 得到对消波和入射波的频率、初始相位及其误差对对消效果的影响, 计算得到对消信号相位、幅度偏差的上限。由于来波方向以及目标数据特征均难以精准获取, 对回波数据在一定方位角内平均化处理对应实际应用。仿真表明, 将平滑后的目标回波幅度和相位数据装订到对消源, 仍能得到较高的对抗概率^[7-8]。信息高速处理的实时技术一直阻碍回波对消技术的实用化, 结合相控阵和数字存储转发的实施方案^[5], 仿真得到较理想的对消效果; 处理时延更少的思想是对消来波信号^[9-10], 对消波与入射波共同作用到目标, 避免了建立目标散射特性数据库以及提取数据库数据的时延累计误差。

由点源模型出发, RCS对消从基本原理^[2]、计

收稿日期: 2025-06-18. 网络出版日期: 2025-06-26.
基金项目: 国防重点基金项目(7131304).
作者简介: 马忠成, 男, 研究员;
吕良浩, 男, 高级工程师.
通信作者: 马忠成, E-mail: 13704261100@163.com.

算仿真到技术设计均进行了一定程度的研究,部分思想可直接为声学领域借鉴。但点源模型难以反映体目标尤其是复杂目标。同时由于目标、环境和对消源技术的特殊性,RCS 对消的技术和方法不能完全适用于声学目标。本文提出声学目标回波对消概念,从体目标角度研究回波对消的声学原理和物理模型,设计研制对消系统,在空气环境下进行实际目标的试验测试。

1 回波对消的声学原理

目标回波是入射波对传播信道和目标散射的线性响应过程。设 h_1 、 h_2 和 h 分别为入射波、回波信道传递函数及目标传递函数, p_i 为入射声信号,则回波 p_s 响应的时域模型如图 1 所示。

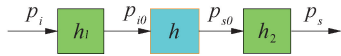


图 1 目标回波的线性系统

Fig. 1 Linear system of target echo

回波表达式为:

$$p_s(t) = p_i(t) \otimes h_1(t) \otimes h(f, \phi) \otimes h_2(t) = p_{i0}(t) \otimes h(f, \phi) \otimes h_2(t) \quad (1)$$

式中 $h(f, \phi)$ 表示目标传递函数,与频率 f 和入射角 ϕ 有关。

回波对消的过程是建立一个与目标传递函数反相的发送响应函数:

$$h'(f, \phi) = h(f, \phi) e^{i\pi} \quad (2)$$

与实时感知的来波 p_{i0} 卷积,通过与目标回波在回波信道中相干叠加,形成回波降低。

从物理上,目标的反射声场一直对应其反射亮点或亮区,点源模型的单亮点目标传递函数为:

$$h(f, \phi) = A(f, \phi) e^{i\varphi} \quad (3)$$

式中 A 和 φ 表示亮点的幅度和相位跃变。式(3)是多数 RCS 对消研究的理论基础。但作为体积目标, φ 还包含由于参考点位置或亮点移动导致的传播时延 τ_0 , 式(3)可写为:

$$h(f, \phi) = A(f, \phi) e^{i(\varphi_0 + \omega\tau_0)} \quad (4)$$

复杂目标的反射可视为有限亮点的叠加^[11-12], 则目标传递函数可描述为满足亮点分布关系的集总模型:

$$h(f, \phi) = \sum_{m=1}^M A_m(f, \phi) e^{i\omega\tau_m} e^{i\varphi_m} \quad (5)$$

式中 τ_m 为第 m 个亮点相对于参考点的传播时延。发送响应可以描述为,时延上反映亮点空间分布的集总参数模型:

$$h'(f, \phi) = \sum_{m=1}^M A_m(f, \phi) e^{i\omega\tau_m} e^{i\varphi_m} e^{i\pi} \quad (6)$$

亮点时延随来波方位变化,为避免时延补偿运

算,对消声源采用分布式模型更具有实际价值:

$$h'(f, \phi) = \sum_{m=1}^M A_m(f, \phi) e^{ikr_m} e^{i\varphi_m} e^{i\pi} \quad (7)$$

式中 $kr_m = \omega\tau_m$ 。

2 回波对消的亮点参数模型

用式(4)~(7)描述对消声源模型,涉及回波亮点的主要参数,即幅度、相位、时延。以单亮点目标为例描述亮点参数物理模型。如图 2 所示,由源点 M 发出的单位入射波 p_i 作用到刚硬大目标, $p_{i0} = (1/r) e^{ikr}$, 经 S 面反射后,满足 Helmholtz 方程散射声场 $p_s(\mathbf{r})$, 其 kirchhoff 近似解为^[12-13]:

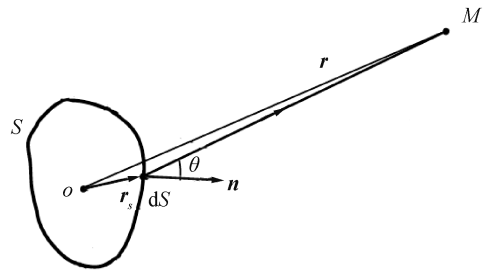


图 2 目标反射模型

Fig. 2 Target reflection model

$$p_s = -\frac{ik}{2\pi} \frac{e^{i2kr}}{r^2} \int_{S_1} e^{ik2\Delta r} \cos \theta dS \quad (8)$$

式中: θ 为面元-声源连线与外法线夹角; Δr 为积分面元到参考点距离 ($\Delta r \approx \mathbf{r}_s \cdot \mathbf{r} / |\mathbf{r}|$)。积分是在照射面的亮区 S 进行,对于刚硬表面得到的公式同样适用于阻抗表面,只需在式(8)中加入反射系数项^[14-15]:

$$p_s = \frac{-ik}{2\pi} \frac{e^{i2kr}}{r^2} \int_{S_1} e^{ik2\Delta r} V(\theta) \cos \theta dS \quad (9)$$

式中 V 为目标表面复反射系数,对刚硬表面 $V=1$ 。根据平稳相位理论,式中只有稳相点附近的表面起主要作用,其他区域正负抵消。凸光滑表面的稳相点是距观察点最近的点,该点处, $\theta=0$, Δr 变化最小,即相位变化最慢。经推导可得:

$$p_s = p_{i0} \frac{e^{ikr}}{r} \frac{1}{2} V(0) \sqrt{|D|} e^{-i2k\Delta r_0} \quad (10)$$

式中: Δr_0 为参考点距离到稳相点的距离; D 为稳相点处表面的高斯曲率半径。目标传递函数为:

$$h(f, \phi) = \frac{1}{2} \sqrt{|D|} V(0) e^{-i2k\Delta r_0} = \frac{1}{2} \sqrt{|D|} |V(0)| e^{i(\varphi_0 - 2k\Delta r_0)} \quad (11)$$

式中 φ_0 为垂直入射复反射系数相位。数学上的稳相点即声学中的回波亮点,式(11)给出了回波亮点的 3 要素,回波亮点位置为距声源最近的点,回波幅

度取决于亮点处高斯曲率,回波相位跃变为:

$$\varphi = \varphi_0 - 2k\Delta r_0 \quad (12)$$

式中的 $-2k\Delta r_0$ 体现了参考点引起的亮点时延。

当目标为球或柱时, $h'(f, \phi) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M |V_m(\phi, 0)| \cdot \sqrt{|D_m|} e^{-ik2\Delta r_m} e^{i\varphi_{0m}} e^{i\pi}$ 。无限长弹性柱和弹性柱壳^[16-17]以及弹性球^[18](sommerfeld-watson transformation, SWT)解表明,其镜反射波相位均为:

$$\varphi = \varphi_0 - 2ka \quad (13)$$

说明 kirchhoff 近似解得到的镜反射回波亮点相位值适于刚性目标,同样也适于弹性目标。相位匹配是回波对消的首要条件。由此,式(7)中各参数从数学上的描述,转变为物理上的定义:

$$h'(f, \phi) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M |V_m(\phi, 0)| \sqrt{|D_m|} e^{-ik2\Delta r_m} e^{i\varphi_{0m}} e^{i\pi} \quad (14)$$

式中 $V_m(f, \phi, 0)$ 表示方位角 ϕ 下亮点处的复反射系数,该位置表面法线与入射波夹角为 0° , 其相位即为镜反射波相位跃变。由于镜反射是目标最主要的回波来源,称该式为回波对消的亮点模型。

对平板和有限长柱等特殊目标,可视为凸表面的极限情况。注意到式(12)中相位数值与高斯曲率无关;与曲率相关的幅度因子可由式(9)直接计算积分,仍得到与其面积或线度成正比的有限值^[19]。

3 声对消试验

图 3 所示为研制的一套回波对消系统。实时处理器是对消系统核心,是由 4 片 TS201 构成的 DSP 处理器,与存储、控制、信号调理、A/D、D/A 器件构成对消控制器,如图中虚框所示。参考接收器(麦克风)安装在目标亮点位置,由于其接收的信号包括入射波和目标背景散射波,实时处理器首先进行散射波分离处理^[20],得到纯净入射波。将入射波与事先存储的目标传递函数卷积处理,反相加载到功率放大器。为控制次级声源(对消声源)的波束宽度,采用了参量阵声源。为此,实时处理器还须将对消波进行反解调处理^[21],调制到高频原波后发送到 D/A 输出。

为避开环境多途干扰,得到良好的声传输信道,采用参量阵作为试验主声源,构成麦克风阵列,接收对消后的弱回波信号,如图 4 所示。图 4(a)测试系统中,测试主声源采用参量阵,测试接收器为麦克风阵;图 4(b)对消系统中,抵消声源采用参量阵,参考接收器为麦克风。选择 2 种典型硬表面目标:室内的水泥墙壁和室外的金属柱。由于是参量阵窄波束入射,目标回波完全来自有限波束照射表面的镜反

射。反射响应数据库预先装订到寄存器中,实时调用。测试系统如图 5 所示。

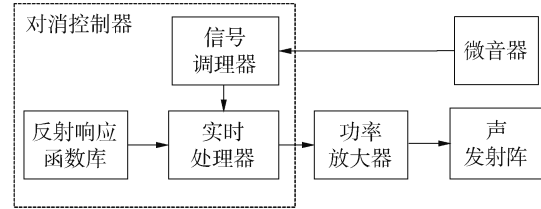


图 3 对消系统原理示意

Fig. 3 Schematic diagram of cancelling system



(a) 测试系统

(b) 抵消系统

图 4 测试声学设备和测试目标

Fig. 4 Acoustic equipment and targets for testing

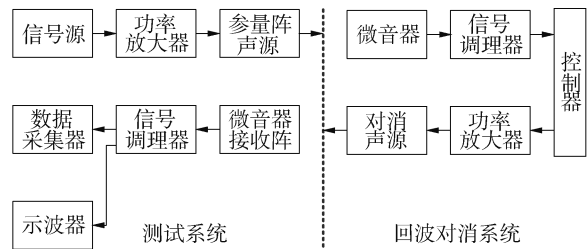


图 5 试验设备组成框图

Fig. 5 Block diagram of test equipment

文献[5,22]以回波余量定义对消度,回波余量为零时,对消度为零。声学环境总是存在具有一定程度的背景干扰,回波余量为零的情形难以判别。本文定义声学中回波对消度为对消前后回波幅度的对数值:

$$C = 20\lg \frac{P_{s1}}{P_{s2}} \quad (15)$$

根据目标强度定义,对消度 C 为目标强度的降低值:

$$C = 20\lg \frac{P_{s1}}{P_{s2}} = 20\lg \frac{P_{s1}|_{r=1}}{P_i} - 20\lg \frac{P_{s2}|_{r=1}}{P_i} = \Delta TS \quad (16)$$

C 越大,目标强度降低越显著;当 $S < 0$ 时,对消变为回波增强的反作用。

采用 1.8~2.8 kHz 宽带和窄带信号对水泥墙壁进行测试。表 1 为测试结果,针对所有的频段,对消度达到 6.0~14.6 dB。硬目标的回波相位跃变在各频率为 0,以单频信号的传递函数装订,对宽带入射波同样得到了较高的对消度。

表 1 室内水泥墙壁回波对消效果

信号形式	频率/kHz	对消度/dB
LFM	1.8~2.2	9.8
CW	1.8	9.8
CW	1.9	8.9
CW	2.0	10.2
CW	2.1	8.4
CW	2.2	8.0
CW	2.3	8.5
CW	2.4	14.6
CW	2.5	14.1
CW	2.6	13.9
CW	2.7	9.2
CW	2.8	6.0

表 2 室外金属柱回波对消效果

脉宽/ms	初相位/(°)	相对幅度/V	对消度/dB
20	0	1.0	8.6
10	60	1.0	8.4
10	0	0.7	6.2

对图 4 中金属柱(直径 0.4 m,高 2.5 m)的测试在室外进行,测试频率 2 kHz,变化主声源信号形式(初相位、脉宽、幅度)构造不同类型的入射场,典型波形如图 6 所示。

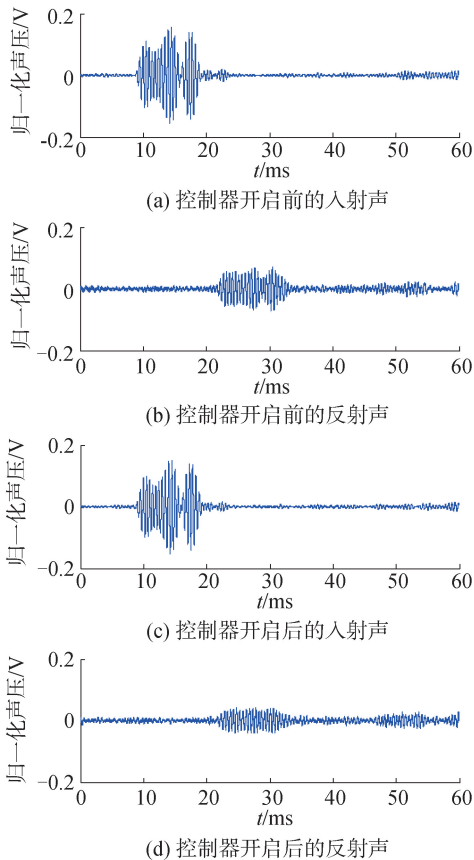


图 6 金属柱反射波时域波形

Fig. 6 Time domain waveform of reflected wave from metal cylinder

由于室外噪声干扰,测试效果不如室内理想,但可见所装订的传递函数具有对不同信号的适应性,见表 2。

4 结论

1)从线性系统理论出发,建立回波对消的亮点模型,通过物理声学计算,给出了对消模型中各参数的物理概念和计算方法。构造回波对消系统,进行了 2 类单亮点目标的测试。

2)从物理声学得到亮点对消模型适用于刚硬目标,也适用于弹性目标的镜反射波控制。对消波相位只取决于亮点处垂直入射角的复反射系数相位。目标回波的精准掌握是提高对消度的关键。对回波相位可准确估测的目标,达到 6 dB 以上的回波降低并不困难,这比敷设吸声材料更加有效。

3)对消系统的工作涉及多个环节的实时性问题,如测频、测向、入射波的获取与响应函数卷积运算等,当对目标散射认知不足或由于工程因素,对消源不能与散射中心重合,回波对消难以实现全空间的回波降低,甚至形成干涉增强。为进行物理机理的验证,本文试验过程中加入了对入射波的部分预知信息,实践中还有大量的实时处理工作。

4)本文的回波对消模型从收发合置的单站情况得到,根据物理声学原理和线性系统理论,也可推广应用于收发分置的镜反射双站情形。

参考文献:

[1] 张德文. 反雷达的电子隐身技术[J]. 航天电子对抗, 1996, 12(3): 30-39.
ZHANG Dewen. Anti stealth technology of electronic radar [J]. Aerospace electronic warfare, 1996, 12(3): 30-39.

[2] 邓扬建, 张杰儒. 雷达有源隐身技术研究[J]. 电子对抗技术, 1997, 12(4): 11-17.
DENG Yangjian, ZHANG Jieru. Research on radar active stealth technology[J]. Electronic information warfare technology, 1997, 12(4): 11-17.

[3] 曲长文, 向迎春. 基于目标 RCS 特性的有源对消隐身分析[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(2): 109-112.
QU Changwen, XIANG Yingchun. Active cancellation stealth analysis based on RCS characteristic of target [J]. Radar science and technology, 2010, 8(2): 109-112.

[4] 洪光启, 陈图强, 吴晓葆. 雷达有源对消原理研究[J]. 雷达与对抗, 1995, 15(1): 32-35.
HONG Guangqi, CHEN Tuqiang, WU Xiaobao. Study on the principle of radar active cancellation [J]. Radar & ECM, 1995, 15(1): 32-35.

- [5] 徐胜,徐元铭. 有源对消隐身系统设计研究[J]. 航空电子技术, 2014, 45(3): 26-32.
XU Sheng, XU Yuanming. Research on active cancellation stealth system design[J]. Avionics technology, 2014, 45(3): 26-32.
- [6] 王玉军,赵国庆,王宏伟. 一种LFM雷达回波对消干扰算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2008, 35(6): 1031-1035.
WANG Yujun, ZHAO Guoqing, WANG Hongwei. Echo cancelling algorithm for the LFM radar[J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(6): 1031-1035.
- [7] 向迎春,曲长文,李炳荣,等. 基于舰船雷达散射特性的对消隐身仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(1): 104-110.
XIANG Yingchun, QU Changwen, LI Bingrong, et al. Simulation research on cancellation stealth of warship based on its radar scattering properties [J]. Journal of system simulation, 2013, 25(1):104-110.
- [8] 杨小鹏,赵维江,黄立伟. 目标RCS的计算和对消效果的统计分析[J]. 电波科学学报, 2002, 17(1): 88-92.
YANG Xiaopeng, ZHAO Weijiang, HUANG Liwei. Calculation of RCS of targets and statistical analysis of cancellation effect[J]. Chinese journal of radio science, 2002, 17(1): 88-92.
- [9] 陈世春,黄沛霖,姬金祖. 线性调频波的转发干扰对消分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(7): 939-946.
CHEN Shichun, HUANG Peilin, JI Jinzu. Analysis on repeater jamming active cancellation for linear frequency modulated wave[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(7): 939-946.
- [10] 边晓臣,黄沛霖,姬金祖. 基于线性调频波的有源对消隐身仿真及分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(8): 1769-1776.
BIAN Xiaochen, HUANG Peilin, JI Jinzu. Simulation and analysis of active cancellation stealth based on LFM wave[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(8): 1769-1776.
- [11] 汤渭霖. 声呐目标回波的亮点模型[J]. 声学学报, 1994, 19(2): 92-100.
TANG Weilin. Highlight model of echoes from sonar targets[J]. Acta acustica, 1994, 19(2): 92-100.
- [12] 汤渭霖,范军,马忠成. 水中目标声散射[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 217.
- [13] 沈杰罗夫 E. Л. 水声学波动问题[M], 何祚镛, 赵晋英译. 北京:国防工业出版社,1983:55.
ШЕНЛЕРОВ Е. Л. Волновые задачи гидроакустики [M]. Translated by He Z Y, Zhao J Y. Beijing: National Defense Industry Press, 1983:55.
- [14] 汤渭霖. 用物理声学方法计算非硬表面的声散射[J]. 声学学报, 1993, 18(1):45-53.
TANG Weiling. Calculation of acoustic scattering of a nonrigid surface using physical acoustic method[J]. Acta acustica, 1993, 18(1):45-53.
- [15] LEW H. Broadband echoes from underwater targets[J]. International journal of computational engineering science, 2004, 5(2): 281-290.
- [16] DOOLITTLE R D, ÜBERALL H, UGINČIUS P. Sound scattering by elastic cylinders [J]. The journal of the acoustical society of America, 1968, 43(1): 1-14.
- [17] UGINČIUS P, ÜBERALL H. Creeping-wave analysis of acoustic scattering by elastic cylindrical shells [J]. The journal of the acoustical society of America, 1968, 43(5): 1025-1035.
- [18] WILLIAMS K L, MARSTON P L. Backscattering from an elastic sphere; sommerfeld-Watson transformation and experimental confirmation[J]. Acoustical society of America journal, 1985, 78(3): 1093-1102.
- [19] URICK R J. Principles of underwater sound[M]. 3rd Edition. New York: McGraw-Hill. 1983: 30.
- [20] YANG Baoshan, MA Zhongcheng, ZHU Lingguo. Method of separation of incidental acoustic field on cylindrical shell by vector processing[J]. Mathematical problems in engineering, 2020: 5203830.
- [21] 吕良浩,胡德胜. 参量阵差频波与原频波相位及幅值关系研究[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(10): 95-99.
LYU Lianghao, HU Desheng. Research on the relationship of phase and amplitude between differences and primary signal of parametric array [J]. Ship science and technology, 2015, 37(10): 95-99.
- [22] 梁百川. 有源隐身技术研究[J]. 舰船电子对抗, 2004, 27(1): 3-6.
LIANG Baichuan. Study on active stealth techniques [J]. Shipboard electronic countermeasure, 2004, 27(1): 3-6.

本文引用格式:

马忠成,吕良浩,杨宝山. 空气介质中刚硬目标声回波对消的亮点模型[J]. 哈尔滨工程大学学报,2025,46(8):1503-1507.
MA Zhongcheng, LYU Lianghao, YANG Baoshan. Highlight model for cancellation of target acoustic echo in air medium[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8):1503-1507.