

## 报告正文

**正文：**参照以下提纲撰写，要求内容翔实、清晰，层次分明，标题突出。请勿删除或改动下述提纲标题及括号中的文字。

### (一) 立项依据与研究内容 (4000-8000 字)：

1. 项目的立项依据 (研究意义、国内外研究现状及发展动态分析,需结合科学研究发展趋势来论述科学意义;或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录);

#### 1.1 研究意义

降低目标的声散射截面在军事上的应用得到了研究者的广泛关注。目前潜艇隐身主要通过涂敷吸波涂层,达到降低散射截面的目的。因为材料的吸声系数随着频率降低而减小,这使得低频吸声需要极厚的吸波涂层。虽然近年来变换声学的发展为目标散射截面的降低提供了一种新的研究思路<sup>[1]</sup>,但这种设计思路对材料的要求特别高(媒质的非各向同性)。从实际应用的角度来讲,并不需要完美的声学隐身,比如主动声呐回波探测目标,主要通过背向回波进行检测来判别目标。倘若我们可以设计一些特殊的平板结构覆盖目标,通过平板结构界面声阻抗的变化调控入射波的反射,减小目标的背向回波,则可达到降低目标散射截面的效果。这种方式被称为声波阵面操控,在物理上容易实现,而且是低频段降低水下目标声散射截面一个不错的选择。因此,本项目提出了干涉相消的声波阵面操控方式实现水下目标声散射截面的降低,特别需要指出是所设计的结构尺度小并具有一定的耐压性能,有望在潜艇隐身中应用。

#### 1.2 国内外研究现状及发展动态分析

##### (1) 干涉相消的波阵面操控降低雷达的散射截面

目前,电磁波领域发展了一些降低雷达散射截面的波阵面操控方法,即通过抑制法向反射或镜面反射波来实现的。例如,研究者们尝试使用理想电导体(the perfect conductor)和人造磁导体(the artificial magnetic conductor)构建类似棋盘一样的平板结构<sup>[2-3]</sup>来减小散射波的强度。由于从电导体上的反射波与从磁导体上的反射波相位差为 $\pi$ ,导致反射波干涉相消。类似的干涉相消的效果<sup>[3-4]</sup>也可以由两种具有不同共振频率的人造磁导体单元来实现。此外,对于非垂直入射

的情形，甚至有可能出现背向增强的现象<sup>[2]</sup>。为了克服这个缺点，研究者们通过随机的选择每个单元的反射相位<sup>[5-6]</sup>，导致反射波干涉相消，使得散射声波的能量分布在很宽的角度范围内，形成漫反射波。当然这里还需要引入一个约束，就是背向散射最弱。相关的研究最近已经在电磁波领域展开，即利用粒子群优化算法实现最优单基地雷达散射截面的降低<sup>[6]</sup>。文献<sup>[5-6]</sup>还表明单基地雷达散射截面最高可以降低 30dB，而在整个 X 波段可以达到 10dB 以上。

## (2) 广义 Snell 定律操控声波阵面降低散射截面

虽然电磁波领域对如何降低雷达的散射截面取得不少进展，但声学领域对如何利用声波阵面操控降低水下目标散射截面的研究还较少，目前更多关注的是在空气中如何操控声波阵面。波阵面操控这个概念起源光学或者射频电磁波<sup>[7-11]</sup>，但是声学领域一些较早的共振散射研究也体现出了波阵面操控的意图。例如，在 2011 年，张亚东在《声学学报》提出了全背向声反射的研究<sup>[12]</sup>，其利用局域共振（Helmholtz 共鸣器）和 Bragg 共振相互作用达到对声波束的控制。在 2013 年，两个研究小组将光学中的广义 Snell 定律引入到声学领域来实现声的异常反射<sup>[13-14]</sup>。随后，另外两个研究小组通过迷宫结构实现声的异常折射等现象<sup>[15-16]</sup>。从原理上来讲，张亚东等人的工作<sup>[12]</sup>与基于广义 Snell 定律操控声波束的工作<sup>[13-16]</sup>本质上都是干涉。前者在 Bragg 共振和 Helmholtz 共振接近时实现了全背向声反射，但是相应的带宽较窄；而后者通过调节不同局域单元的共振频率，实现反射相位的改变，从而达到对声波束进行调控的目的，但是其实现的声学结构却非常的复杂，需要借助 3D 打印技术来实现。在 2015 年，研究者们提出了一种非周期的梯度型梳状结构<sup>[17]</sup>来实现宽带声波束操控，其中声波束的方向主要取决于广义 Snell 定律，而结构长度的有限会引起的一定的衍射效应；而另一篇文献对周期的梯度型梳状结构<sup>[18]</sup>研究表明声波束最终的方向不仅取决于广义 Snell 定律，还取决于 Bragg 散射定律，导致可用于操控声波束的频带宽度变窄，但是在一定的带宽范围内镜面反射波被大大的抑制，这意味着对于垂直入射的情形，背向回波被大大的削弱。需要指出的是这种梯度型梳状结构是由一系列深度不相等的窄槽构成，通过窄槽的深度调控反射声波的相位。

## (3) 声波阵面操控存在的不足

虽然上述结构在空气中操控声波阵面非常有效，但是要想在水中应用要解决

下面三个问题:

1. 结构尺度问题: 反射声波的相位取决于窄槽深度与声波波长的比, 这将使得水中所设计的结构厚度是空气中所设计结构厚度的 4 倍多, 这对于低频段降低目标的散射截面并不可行, 其原因在于控制反射波的相位采取的是长度共振, 并且反射波的相位正比于窄槽的深度。

2. 材料特性阻抗问题: 水的声阻抗与一般固体材料的声阻抗差别不是很明显, 导致在空气中所设计的结构(以硬塑料为材料加工的)不能直接移植到水中, 这是因为窄槽刚性边界条件不能很好的符合。

3. 工作带宽问题: 虽然梯度型梳状结构具有宽带调控声波束的优点, 但是这与反射波的相位正比于窄槽深度的特性有关, 仍然存在结构尺度问题。需要特别指出的是, 其反射相位随着频率线性增加是实现宽带的根本原因所在。

为了解决上述问题, 在设计水下平板结构用于降低水下目标声散射截面需要突破以下两点:

1. 为了减小平板结构的厚度, 尽量不采用长度共振, 而采用局域共振(比如: 水中常见的局域共振结构 compliant tubes<sup>[19]</sup>, 共振的波长远大于振子的尺度), 并且所采用的局域共振要考虑水的声阻抗特性。

2. 为了实现宽带操控, 反射波的相位要随着频率线性增加。

### 1.3 本项目提出的研究思路

射频电磁波的一些研究表明, 通过合理设计电磁波的频率选择平面<sup>[10]</sup>(FSS), 可以在宽带范围内使得反射相位或者透射相位对频率的依赖关系为线性, 这可以通过设计多层结构<sup>[20-22]</sup>或者单层多共振结构<sup>[23-25]</sup>来实现。虽然电磁波和声波存在很大差别, 但是很多现象上存在一定的相似性, 例如: 申请者最近的一项研究, “干涉引起的角度无关的声学透明现象”<sup>[26]</sup>, 实际上就是声学领域的频率选择平面, 透射相位的剧烈变化特性也基本一致。

基于对上述相似性的认识, 本项目提出了多局域共振耦合的物理机制调控反射声波的相位, 使之在宽带范围内线性依赖于频率, 并在此基础上提出了干涉相消的声波阵面操控方式实现水下目标声散射截面的降低。其中“多局域共振耦合”指的是利用多个局域共振结构构成复合结构, 使得它们之间的距离远小于波长, 从而存在互相耦合, 导致反射相位在宽带范围内线性依赖于频率。为了方便, 该复合结构在本项目中称为多局域共振耦合单元。此外, “干涉相消

的声波阵面操控方式”指的是利用不同的多局域共振耦合单元构建板结构，通过控制多共振耦合单元之间的反射相位差来实现干涉相消，达到降低声散射截面的目的。因为多个局域共振互相耦合可以拓宽工作带宽<sup>[27]</sup>，并且水下局域共振结构的尺度又可以做到远小于声波的波长，这意味着我们所设计的平板结构在低频段降低目标声散射截面方面有着重要的应用前景。

#### 参考文献

- [1] H. Chen and C. T. Chan, Acoustic cloaking and transformation acoustics, **J. Phys. D: Appl. Phys.**, 43, 113001 (2010).
- [2] M. Paquay, J. C. Iriarte, I. Ederra, R. Gonzalo, P. de Maagt, Thin AMC structure for radar cross-section reduction, **IEEE Trans. Antennas Propag.**, 55, 3630-3638 (2007).
- [3] M. E. de Cos, Y. Alvarez and F. Las-Heras, A novel approach for RCS reduction using a combination of artificial magnetic conductors, **Prog. Electromagn. Res.**, 107, 147-159 (2010).
- [4] Y. Liu, H. Wang, Y. Jia, and S. Gong, Broadband Radar Cross-Section Reduction for Microstrip Patch Antenna Based on Hybrid AMC Structures, **Progress In Electromagnetics Research C.**, 50, 21-28 (2014).
- [5] J. Chen, Q. Cheng, J. Zhao, D. S. Dong, and T. J. Cui, Reduction of Radar Cross Section Based on a Metasurface, **Prog. Electromagn. Res.**, 146, 71-76 (2014).
- [6] K. Wang, J. Zhao, Q. Cheng, D. S. Dong, and T. J. Cui, Broadband and Broad-Angle Low-Scattering Metasurface Based on Hybrid Optimization Algorithm, **Sci. Rep.**, 4, 5935 (2014).
- [7] Nanfang Yu, Patrice Genevet, Mikhail A. Kats, Francesco Aieta, Jean-Philippe Tetienne, Federico Capasso and Zeno Gaburro, Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction, **Science**, 334, 333-337 (2011).
- [8] Xingjie Ni, Naresh K. Emani, Alexander V. Kildishev, Alexandra Boltasseva, Vladimir M. Shalaev, Broadband Light Bending with Plasmonic Nanoantennas, **Science**, 335, 427 (2012).
- [9] Francesco Monticone, Nasim Mohammadi Estakhri, and Andrea Alu, Full Control of Nanoscale Optical Transmission with a Composite Metascreen, **Phys. Rev. Lett.**, 110, 203903 (2013).
- [10] B. A. Munk, Frequency Selective Surfaces: Theory and Design (Wiley, New York, 2000).
- [11] Colan G. M. Ryan, Mohammad Reza Chaharmir, J. Shaker, Joey R. Bray, Yahia M. M.

Antar, and A. Ittipiboon, A Wideband Transmitarray Using Dual-Resonant Double Square Rings, **IEEE Trans. Antennas Propag.**, 58, 1486-1493 (2010).

[12] 张亚东, 王新龙, 周期镶嵌亥姆霍兹共鸣腔平板的声全背向反射, 《声学学报》, 36, 191-195 (2011)。

[13] Jiajun Zhao, Baowen Li, Zhining Chen and Cheng-Wei Qiu, Manipulating Acoustic Wavefront by Inhomogeneous Impedance and Steerable Extraordinary Reflection, **Sci. Rep.**, 3, 2537 (2013).

[14] Yong Li, Bin Liang, Zhong-ming Gu, Xin-ye Zou and Jian-chun Cheng, Reflected wavefront manipulation based on ultrathin planar acoustic metasurfaces, **Sci. Rep.**, 3, 2546 (2013).

[15] Kun Tang, Chunyin Qiu, Manzhu Ke, Jiuyang Lu, Yangtao Ye and Zhengyou Liu, Anomalous refraction of airborne sound through ultrathin metasurfaces, **Sci. Rep.**, 4, 6517 (2014).

[16] Yangbo Xie, Wenqi Wang, Huanyang Chen, Adam Konneker, Bogdan-Ioan Popa and Steven A. Cummer, Wavefront modulation and subwavelength diffractive acoustics with an acoustic metasurface, **Nat. Commun.**, 5, 5553 (2014).

[17] Yi-Fan Zhu, Xin-Ye Zou<sup>1</sup>, Rui-Qi Li, Xue Jiang, Juan Tu, Bin Liang, Jian-Chun Cheng, Dispersionless manipulation of reflected acoustic wavefront by subwavelength corrugated surface, **Sci. Rep.**, 5, 10966 (2015).

[18] Kun Tang, Chunyin Qiu, Jiuyang Lu, Manzhu Ke, and Zhengyou Liu, Highly efficient blazed gratings based on gradient-comb-like units, **J. Appl. Phys.**, 118, 083106 (2015).

[19] Ronald P. Radlinski, Scattering from multiple gratings of compliant tubes in a viscoelastic layer, **J. Acoust. Soc. Am.**, 85(6), 2301-2310 (1989).

[20] J. A. Encinar, Design of two-layer printed reflectarrays using patches of variable size, **IEEE Trans. Antennas Propagat.**, 49, 1403-1410 (2001).

[21] C. Han, C. Rodenbeck, J. Huang and K. Chang, A C/Ka dual frequency dual layer circularly polarized reflectarray antenna with microstrip ring elements, **IEEE Trans. Antennas Propagat.**, 52, 2871-2876 (2004).

[22] J. A. Encinar and J. A. Zornoza, Three-layer printed reflectarrays for contoured beam space applications, **IEEE Trans. Antennas Propagat.**, 52, 1138-1148 (2004).

[23] S. Sakita, H. Deguchi, and M. Tsuji, Single-layer microstrip reflectarray based on dual-resonance behavior, **Proc. of ISAP2007**, 1, 1290-1293 (2007).

- [24] M. R. Chaharmir, J. Shaker, M. Cuhaci, and A. Ittipiboon, Broadband reflectarray antenna with double cross loops, **Electron. Lett.**, 42, 65–66 (2006).
- [25] H. Deguchi, K. Mayumi, M. Tsuji, and T. Nishimura, Broadband Single-Layer Triple-Resonance Microstrip Reflectarray Antennas, **Proceedings of the 39th European Microwave Conference**, 29-32 (2009).
- [26] Lehua Qi, Gaokun Yu, Xinlong Wang, Guibo Wang, and Ning Wang, Interference-induced angle-independent acoustical transparency, **J. Appl. Phys.**, 116, 234506 (2014).
- [27] Xishan Yang, Jing Yin, Gaokun Yu, Linhui Peng, and Ning Wang, Acoustic superlens using Helmholtz-resonator-based metamaterials, **Appl. phys. Lett.**, 107, 193505 (2015).

## 2. 项目的研究内容、研究目标, 以及拟解决的关键科学问题(此部分为重点阐述内容);

### 2.1 研究内容

项目主要针对干涉相消降低水下目标声散射截面这个中心问题展开。拟对以下内容展开研究:

#### (1) 多局域共振耦合的物理机制

通过对现有波阵面操控的物理模型进行分析, 我们提出多局域共振耦合的物理机制使得反射声波的相位在宽带范围内线性依赖于频率, 并从理论上将多共振耦合的物理机制一般化。需要指出的是虽然反射声波的相位线性依赖于频率, 但是不同多局域共振耦合单元之间的反射相位差可以近似认为随频率不变, 从而可以利用干涉相消实现宽带声波阵面操控。

#### (2) 水下局域共振结构

我们从理论上研究一种具有一定耐压性的水下局域共振结构用于构建多局域共振耦合单元。具体是研究一种球状结构, 内部充水或者填充阻抗跟水接近的固体材料, 而球壳是由两种介质构成。

#### (3) 干涉相消的声波阵面操控机制

在完成前二项研究内容的基础上, 基于干涉相消的物理机制, 我们利用多局域共振耦合单元构建周期和非周期的平板结构, 并通过理论以及有限元仿真

来研究声散射特性。

#### (4) 实验研究

针对研究内容(2)和(3),我们对多局域共振耦合单元所构成的平板结构进行声散射特性的实验研究,包括反射相位在宽带范围内线性依赖于频率的实验验证、类似于棋盘的周期结构声散射的测量以及非周期平板结构声散射的测量。

## 2.2 研究目标

项目旨在通过理论建立多局域共振耦合一般化的理论,并用于获取当反射波相位线性依赖于频率时,各局域共振结构所对应的物理参数,达到设计水下多局域共振耦合单元的目的。在此基础上提出干涉相消的物理机制,并在理论以及有限元仿真的指导下利用多局域共振耦合单元设计平板结构,最后在水池中进行声散射实验的测量。预期所设计的样品结构厚度近似为波长的30分之一(通过compliant tubes<sup>[19]</sup>共振估计),而背向散射可降低10dB左右(雷达中利用相似原理制备的板结构最高可降低30dB<sup>[5-6]</sup>)。

## 2.3 拟解决的关键科学问题

### (1) 实现多局域共振耦合的物理机制

如何宽带实现反射波的相位使之近似以某一固定的斜率线性依赖于频率,其中涉及到多个局域共振频率如何选择以及它们之间的耦合机制?

### (2) 水下局域共振结构的设计

寻找一种合适的水下局域共振结构,并分析局域共振时阻尼衰减对降低目标声散射截面的影响是正面还是负面?

### 3. 拟采取的研究方案及可行性分析(包括研究方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明);

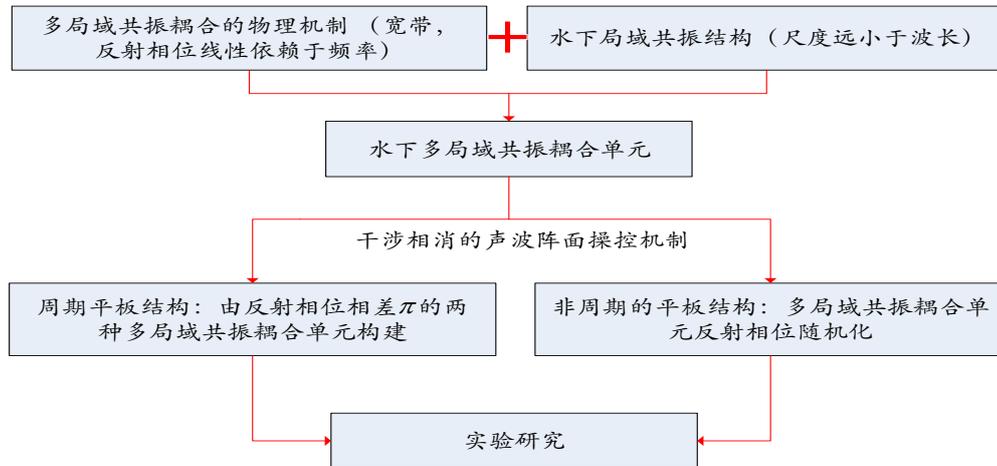


图 1 项目的技术路线

#### 3.1 研究方案

本项目围绕图 1 所给的技术路线, 针对每一项的研究内容制定相应的研究方案, 具体如下:

1. 针对多局域共振耦合物理机制的研究, 主要以 Floquet 理论为基础, 并结合阻抗方法分析现有实现波阵面操控的声学结构, 提出一种多共振耦合的简化物理模型, 推导出相应的理论表达式, 并采用 mathematica 软件作数值计算, 找出最佳的反射相位曲线所对应的物理参数。在此基础上, 将多局域共振耦合机制一般化, 通过建立反射相位与界面阻抗之间的关系, 然后将界面阻抗用多个不同局域共振的声阻抗来逼近, 获得反射相位线性依赖于频率时, 各个共振物理参数的分布图。

2. 针对水下局域共振结构的研究, 我们主要寻找一种水下合适的局域共振结构用于构建多共振耦合单元, compliant tubes 是一种水声中常用的局域共振结构, 可供选择。此外, 我们目前正在研究一种复合结构, 其共振机制类似于水下气泡共振, 但复合结构中不含空气, 一旦证实其可行, 也可用于构建水下多局域共振耦合单元, 使得板结构具有一定的耐压性能。

3. 针对干涉相消的声波阵面操控机制的研究, 我们首先将前两项研究内容的成果集成, 然后在理论分析和有限元模拟的基础上设计一种类似于棋盘一样

的周期结构，使得每个周期内所有多局域共振耦合单元产生的散射波干涉相消，导致法向反射或镜面反射方向声波的强度最小。此外，为了消除有可能出现的背向增强现象，我们设计一种平板结构，使得反射相位随机化，从而形成漫散射，特别是背向散射最弱。主要思路是通过理论建模并使用一些遗传优化算法，来寻找最优参数，当然这些最优参数可选择的区域应落在多局域共振耦合理论所预言的物理参数区，这样才能保证我们所设计的结构具备宽带特性。

#### 4. 针对实验内容，展开如下实验：

在水池实验中对单一多局域共振耦合单元所构成周期结构其反射相位线性依赖于频率的特性进行实验验证，主要通过插入法来测量反射声波的相位，亦即利用水汽界面的声压反射系数近似为-1这个特点来测量。

在水池实验中对不同多局域共振耦合单元所构建的平板结构进行声散射测量，包括单基地测量和多基地测量。单基地测量在一定程度会显示出该平板结构可用于降低声散射截面最大的角宽度，超过这个角宽度，有可能会出现背向增强现象；而多基地测量主要针对是镜面反射波被抑制的情况，即前向散射截面降低的情况。此外，为了消除有可能出现的背向增强现象，我们将会设计一种平板结构，使其反射相位随机化，从而形成漫散射，特别是背向散射最弱，并对该结构进行声散射测量。

### 3.2 可行性分析

申请者近年来一直从事声学共振现象相关的研究，受青年基金研究内容以及一些降低雷达散射截面研究的启发，提出了本项目。项目的选题已经在申请者所在的研究团队（王宁教授领导）内部进行了深入的讨论，并且中国海洋大学也具备水下实验条件。下面我们对本项目的可行性作如下的分析：

#### (1) 多共振耦合机制的初步研究

受到我们所研究的双局域共振耦合会导致在两个不同共振频率之间存在一个全透射共振峰<sup>[26]</sup>的启发，在声反射问题研究中我们引入了共振频率分别为  $f_1$  和  $f_3$  的共振结构构成双共振系统，发现在两个不同共振频率 ( $f_1 < f_3$ ) 之间总是存在一个频率使得反射波的相位为  $2\pi$  的整数倍，而两个不同共振频率对应的反射相位总是  $\pi$  的奇数倍。因此，当这两个不同共振频率之间的间隔相差不是很大时，

会产生共振耦合，使得反射相位在这两个共振频率之间变化  $2\pi$ ，并且反射相位近似线性依赖于频率。此外，为了拓宽带宽，我们又引入了一个新的共振结构，其频率  $f_2$  等于  $f_1$ ，这样的选择源于我们利用 Helmholtz 共鸣器相互耦合拓宽声超透镜成像带宽的研究<sup>[27]</sup>。为了显示我们所设计的多共振耦合机制与基于长度共振机制的差别，我们在空气中利用长度共振构建了三共振耦合单元，如图 2(a) 所示，而图 2(b) 为基于长度共振的梯度型梳状结构的基本单元。图 2(c) 给出了反射相位随频率变化的曲线。虽然在一定的带宽范围之内两种共振单元所对应的反射相位都线性依赖于频率，但是我们所设计的三共振耦合单元，反射相位仅取决于两个不同的共振频率  $f_1 \approx 0.197c/\Lambda$  和  $f_3 \approx 0.394c/\Lambda$ ，而基于长度共振的反射相位取决于槽的深度  $l$ 。这就是为什么基于多共振耦合的物理机制所设计的结构易于在水中推广的原因所在，只要我们在水中找出合适的局域共振结构即可，这是因为多共振耦合机制只取决于不同的共振频率，而与共振的类型无关（长度共振或者局域共振都可以用来构建多共振耦合单元）。需要指出的是，现阶段我们只是初步在空气中研究了一种多共振耦合结构，而本项目的目标之一就是建立一般化的理论模型来设计水下多局域共振耦合结构用于降低目标的声散射截面。

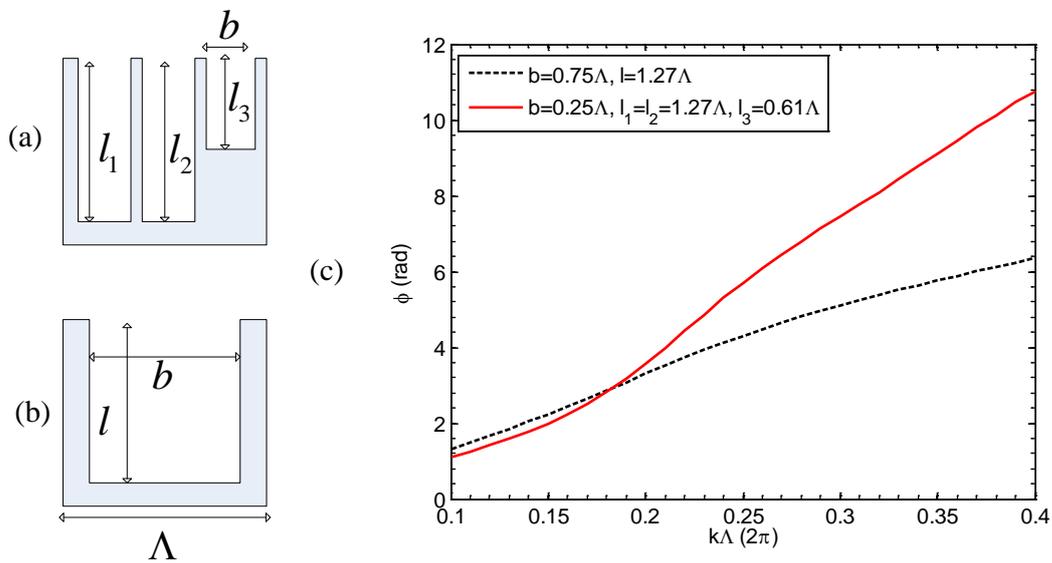


图 2 多共振耦合单元所构成的周期结构对应的反射相位

## (2) 宽带干涉相消的物理机制

在利用多共振耦合的物理机制获得反射波相位随着频率呈线性变化的曲线

之后，接下来的任务就在于如何利用这些基本单元来构建平板结构，达到降低目标散射截面的目的。基于广义 Snell 定律的波阵面操控是一种选择，但是需要反射相位沿着界面以  $2\pi$  周期变化，才能完全消除法向反射或者镜面反射波。此外，从目前的一些研究来看，这种波阵面操控的方式主要着重于声波束方向的调控，而对法向反射或镜面反射波的抑制关注的不多。在本项目中，我们采用一种类似于降低雷达散射截面的方式来操控声波阵面，即设计一种周期结构，每个周期是由反射相位相差  $\pi$  的两种类型的多共振耦合单元构成（同种类型的多共振耦合单元需要重复一定的个数），这使得镜面反射波干涉相消。又因为同种类型多共振耦合单元构成的周期结构其反射波相位近似以某一固定斜率线性依赖于频率（如图 3 所示），这意味着如果我们在某一个频率实现干涉相消，则在宽带范围内也可以实现。需要指出的是，虽然这种基于干涉相消的波束操控方式会使得法向反射或者镜面反射波被抑制，但是声波束的最终的方向取决于 Bragg 散射定律，因此会在某一特定的入射角出现背向散射增强的现象<sup>[2]</sup>，这意味着其用于背向隐身的角宽度是有限的。为了突破角宽度的限制，本项目还计划随机选择每个多共振耦合单元的反射相位，使得散射声波的能量分布在很宽的角度范围内，形成漫反射波，达到降低目标散射截面的目的。此外，为了最大限度的抑制背向散射，还可以使用一些优化算法来搜索最优的设计参数。

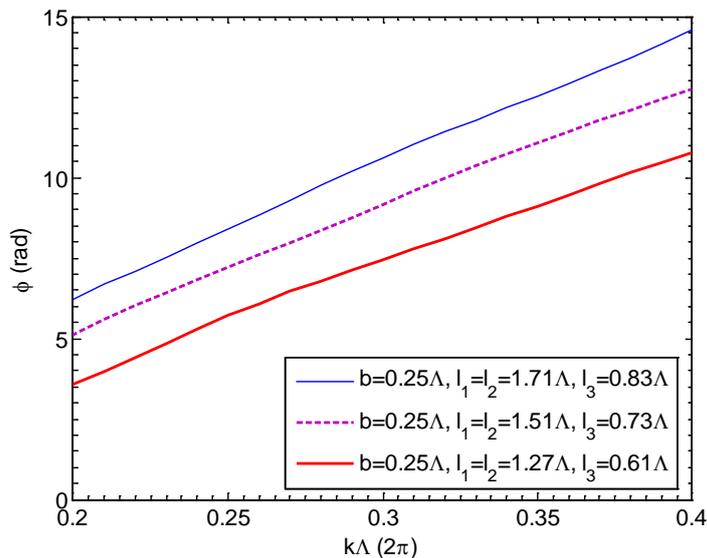


图 3 不同参数下，多共振耦合单元构成周期结构所对应的反射相位随频率的变化

## 4. 本项目的特色与创新之处；

本项目的特色与创新之处有：

1. 提出了一种多局域共振耦合的物理机制调控反射声波的相位，使其在宽带范围内线性依赖于频率。
2. 提出了一种干涉相消的声波阵面操控方式用于降低水下目标的背向散射。此外，所设计的结构尺度小，有望在潜艇隐身中应用。

## 5. 年度研究计划及预期研究结果（包括拟组织的重要学术交流活动、国际合作与交流计划等）。

### 5.1 年度研究计划

1. 第一年（2017）：建立多局域共振耦合实现宽带控制反射波相位的理论，寻找反射波的相位以某一固定的斜率线性依赖于频率的平板结构，为宽带波阵面控制提供必要的理论基础。

2. 第二年（2018）：通过分析反射系数与界面声阻抗的关系，建立一般化的理论来获取多局域共振耦合单元的物理参数。

3. 第三年（2019）：设计水下的局域共振结构，并构建相应的多局域共振耦合单元，用于制备类似于棋盘一样的平板结构实现法向反射以及镜面反射波的抑制，达到降低声散射截面的目的，并进行相应的实验。

4. 第四年（2020）：通过随机选择多局域共振耦合单元反射波的相位以及使用粒子群优化算法来制备水下的平板结构，达到抑制背向回波的目的，并在海洋大学的室内水池进行实验验证。此外，如果条件允许，将进行海上水声实验。

## 5.2 预期研究成果

1. 预期在国际一流刊物上发表 6 篇及以上的学术论文，国内核心期刊发表 5 篇及以上学术论文。

2. 关于宽带背向声隐身现象，拟申请专利 1 项。

3. 培养硕士研究生 4 名，本科毕业论文 6 篇。

### (二) 研究基础与工作条件

#### 1. 研究基础（与本项目相关的研究工作积累和已取得的研究工作成绩）；

申请者近年来主要从事物理声学及海洋声学的研究，在王宁教授的指导下，尝试将物理声学的一些研究成果推广到水声学中。研究成果发表在诸如 **Applied Physics Letters**, **J. Acoust. Soc. Am.** 等国际有影响的声学刊物上。受到青年基金研究内容的启发，在申请者的带领之下，本项目组提出了多局域共振耦合的物理机制调控反射声波的相位，并在此基础上利用干涉相消的声波阵面操控方式实现水下目标声散射截面的降低。现阶段已经取得了初步的研究成果（如可行性分析中的图 2 和图 3 所示）。此外，我们取得了如下与本项目相关的研究成果，如图 4 和图 5 所示，分别是利用局域共振实现声学透明现象<sup>[26]</sup>和利用多局域共振耦合拓宽超透镜成像带宽<sup>[27]</sup>。

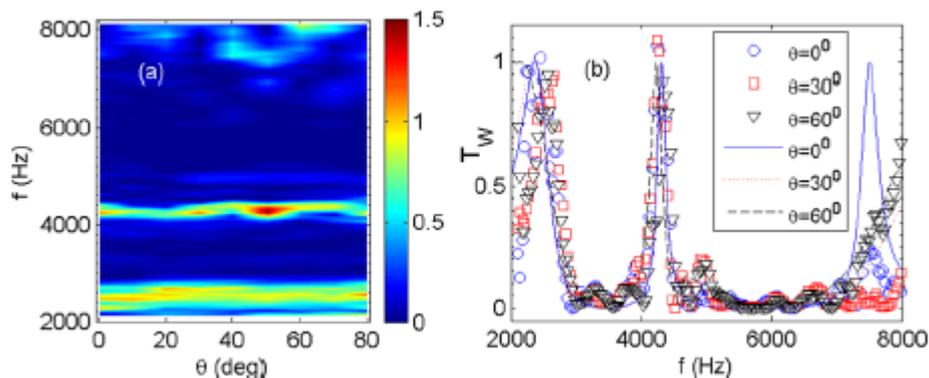


图 4 局域共振实现角度无关的声学透明现象

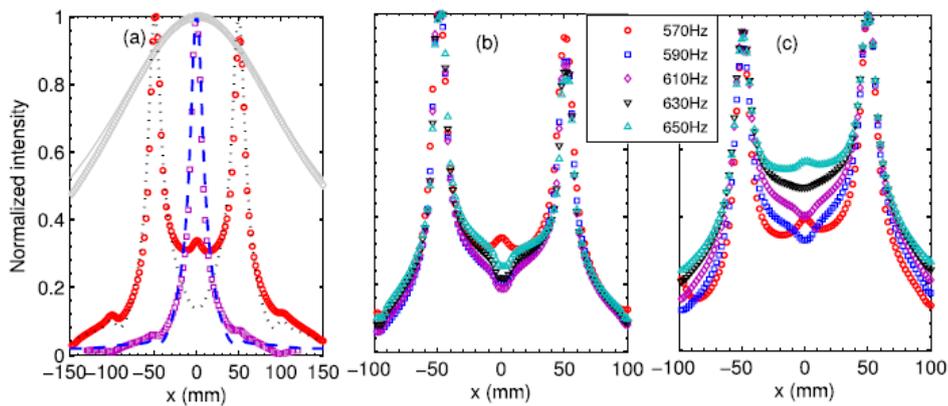


图 5 多局域共振耦合拓宽超透镜成像的带宽

**2. 工作条件 (包括已具备的实验条件, 尚缺少的实验条件和拟解决的途径, 包括利用国家实验室、国家重点实验室和部门重点实验室等研究基地的计划与落实情况);**

本项目的依托单位中国海洋大学, 实验室拥有用于项目研究所需要的全套仪器: RESON 公司 VP2000 前置电压放大器/滤波器, RESON 公司 TC2115 发射换能器, B&k 公司 3560PULSE 系统, B&k 8103 标准水听器, INSTRUMENT 公司 L2、L6 功率放大器, Precision Filters 公司 PF-1U 滤波放大器, Agilen 公司 33220A 函数/任意波形发生器, 斯坦福公司 SR560 前置放大器, NF 株式会社 NF3628 程控滤波器。具备完成本项目的实验条件。

**3. 正在承担的与本项目相关的科研项目情况 (申请人和项目组主要参与者正在承担的与本项目相关的科研项目情况, 包括国家自然科学基金的项目和国家其他科技计划项目, 要注明项目的名称和编号、经费来源、起止年月、与本项目的关系及负责的内容等);**

无

**4. 完成国家自然科学基金项目情况 (对申请人负责的前一个已完结科学基金项目 (项目名称及批准号) 完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系加以详细说明。另附该已完结项目研究工作总结摘要 (限 500 字) 和相关成果的详细目录)**

## 4.1 已经结题科学基金项目完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系

申请人负责的前一个已经结题科学基金项目“多层穿孔板之间耦合共振所致的若干重要声学现象”（批准号：11204282），执行时间为2013/01-2015/12，现已按计划完成了各项研究内容、提交了结题报告。

项目的后续研究主要是将我们所设计的声学结构用于水气界面的阻抗匹配，实行水气界面的声学透明现象。水气界面通常可以被近似为绝对软界面，使得入射声波的能量几乎被完全反射。事实上，水气界面并不是完美的软界面，这使得声波可以穿透该界面。有研究表明空气中的高功率的噪声源可以在水下被水听器探测，或者用于对海洋进行遥感。近年来，Godin指出对于低频声而言，水气界面存在着异常透明的声学现象，这种声增强传输的现象源于不均波的激发，特别是当水下的一个单极子声源足够接近水气界面时，该现象尤为明显，并得到了相应的实验验证。需要指出的是，虽然当水下的单极子声源接近水面时，辐射到空气中的声能量远远大于辐射到水中的声能量，但是总的辐射功率仅仅是一个水中的单极子声源辐射到无界空间功率的1.1%。因此如何实现水气界面高功率的声传输仍然是一个值得关注的声学问题，比如：如何实现空气中的物体在水中成像或者水中的物体在空气中成像？基于上述的研究意义，我们开展了相关的理论和实验研究。

本项目的提出是受到青年基金研究内容的启发，但是二者的研究目标以及研究内容不存在重复。此外，本项目的提出也是申请者尝试将物理声学的研究成果向海洋声学中推广的开始。虽然水和空气都是流体媒质，但是二者的声阻抗特性却相差很大，导致很多现象在空气比较容易实现，而在水中却相对较难，这也是为什么本项目要提出多局域共振耦合这种新的物理机制来实现水下目标声散射截面降低的原因所在。

## 4.2 结题摘要

本项目主要通过对局域单元进行控制，实现了角度无关的声学透明现象以及基于Helmholtz共鸣器的声学超透镜。对于角度无关的声学透明现象，主要通过格林函数理论并结合声传输线概念，设计一种新型的声学结构用于实现角度无关的声学透明现象。从理论、实验以及仿真这三方面对其性能进行研究，实现

了声学的无指向共振传输,即在某一声学频段,实现0度至90度声波完全透射。前人的研究采用半波长共振,当声波的波长与晶格常数相当时,透射表现为明显的角度依赖性;当声波波长远大于晶格常数时,透射虽然表现为无指向性传输,但是其实现的结构就非常的厚。在这里我们采用局部调控阻抗的方法,一方面避免了衰减波的干扰,另一方面通过局域共振引起声辐射波的干涉来实现声的全透射。声学超透镜提供了一种克服亚波长成像极限的方法,但是其可工作的频段宽度较窄。我们提出了一种基于Helmholtz共鸣器的超构材料来拓宽超分辨的带宽,并通过实验来证实双缝亚波长成像的效果。结果表明,超分辨可以在570Hz至650Hz实现。区别于基于FP共振机制的亚波长成像,这里形成亚波长成像的机制是Fano共振,由于相邻共鸣器之间的强烈耦合导致声传输在相对较宽的频率范围内得到了增强。

### 4.3 成果目录

Xishan Yang, Jing Yin, **Gaokun Yu\***, Linhui Peng, and Ning Wang, Acoustic superlens using Helmholtz-resonator-based metamaterials, **Appl. phys. Lett.**, 107, 193505 (2015).

Lehua Qi, **Gaokun Yu\***, Xinlong Wang, Guibo Wang, and Ning Wang, Interference-induced angle-independent acoustical transparency, **J. Appl. Phys.**, 116, 234506 (2014).

**Gaokun Yu\***, Linhui Peng, Range of validity of the Rayleigh hypothesis for sound wave scattering from a periodic seafloor, **IEEE J. Ocean. Eng.**, 39, pp 779-787, (2014).

Qipeng Feng, Zhenyu Huang, **Gaokun Yu\*** and Xiangbin Meng, Acoustic attenuation performance through a constricted duct improved by an annular resonator, **J. Acoust. Soc. Am.**, 134, EL345 (2013).

Yong Li, **Gaokun Yu**, Bin Liang\*, Xinye Zou, Guangyun Li, Su Cheng and Jianchun Cheng\*, Three-dimensional ultrathin planar lenses by acoustic metamaterials, **Sci. Rep.**, 4, 6830 (2014).

### （三）其他需要说明的问题

1. 申请人同年申请不同类型的国家自然科学基金项目情况（列明同年申请的其他项目的项目类型、项目名称信息，并说明与本项目之间的区别与联系）。

无

2. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在同年申请或者参与申请国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，申请或参与申请的其他项目的项目类型、项目名称、单位名称、上述人员在该项目中是申请人还是参与者，并说明单位不一致原因。

无

3. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在与正在承担的国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，正在承担项目的批准号、项目类型、项目名称、单位名称、起止年月，并说明单位不一致原因。

无

4. 其他。

无