

基于双面声学超表面的伪表面波隐身装置设计*

马驰凯¹⁾ 储志韩¹⁾ 范梓颢¹⁾ 周子翔¹⁾ 林甜甜¹⁾
黎程轩¹⁾ 李滢翔^{1)2)†} 杨雨^{1)‡}

1) (南京林业大学信息科学技术学院、人工智能学院, 南京 210037)

2) (南京大学近代声学教育部重点实验室, 南京 210093)

(2025年3月24日收到; 2025年5月30日收到修改稿)

设计了一种可支持伪表面波双面传输的声学超表面, 并构建了一类声隐身装置. 该超表面由双向开孔的亥姆霍兹共鸣器周期性排列构成, 能够在上下表面之间灵活传导伪表面波, 且结构整体厚度仅为工作波长的 $1/20$, 具有显著的亚波长特性. 本文理论推导了伪表面波模式的色散方程, 得到传播波矢与结构参数之间的依赖关系, 通过优化双面超表面的结构参数, 确保传导过程中的波矢匹配, 实现伪表面波在上下表面之间的高效耦合. 在此基础上, 本文构建了一种“声透明通道”, 通过在障碍物前后两侧铺设双面超表面, 使伪表面波能够传导至结构下表面并绕过障碍物, 实现声隐身效果. 经数值模拟和实验验证, 该装置对不同形状的大尺寸障碍物均表现出良好的鲁棒性, 并且具有一定的工作带宽. 本文提出的伪表面波隐身器件具有结构轻薄、灵活性高等显著优势, 为深亚波长尺度的伪表面波操控及声学器件设计提供了新的研究思路和技术路径.

关键词: 双面超表面, 伪表面波, 双面声调控, 声隐身

PACS: 43.20.+g, 43.35.+d

DOI: 10.7498/aps.74.20250379

CSTR: 32037.14.aps.74.20250379

1 引言

声学人工材料突破了传统声调控对波长和结构尺寸的限制^[1], 实现了例如声隐身^[2,3]、声准直^[4,5]、非对称传输^[6,7]等新奇效应, 对医学、通信以及工业检测等各个领域都具有重要研究意义. 近年来, 基于声学人工材料的新奇物态调控及器件研制成为研究热点, 相关成果推动了声场调控理论的发展, 加速了声学功能性器件的研制^[8,9]. 其中, 伪表面波作为一种特殊的表面态, 不仅能够实现沿人工结构表面的局域化传输, 还可利用人工结构实现对其振幅和相位的精确调控, 有望与高质量成像、粒

子操控、片上传输技术相兼容, 为声波界面态调控提供全新研究范式^[10-12]. 例如, Zheng等^[13]通过构建声学Luneburg透镜实现了基于伪表面波模式的完美声聚焦. Liu等^[14]通过设计梯度折射率超表面实现了伪表面波的亚波长聚焦和成像. Liu等^[15]提出了一种能够在自由空间中产生超越衍射极限的声涡旋表面态的新机制, 实现了伪表面波模式的高效激发及其传播相位的精准操控.

通过上述对伪表面波的研究工作可以看出, 伪表面波区别于熟知的声涡旋等三维声波模式, 其独特的亚波长特性为二维或更低维体系中的精准声波调控提供了全新的实现方式. 然而, 考虑到实际场景中普遍存在障碍物, 显著的散射效应将影响伪

* 国家自然科学基金(批准号: 12404530)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20240659)和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 020414380195)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hxli@njfu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: yang1996@njfu.edu.cn

表面波的传播性能,极大限制了其应用潜力.例如, Li 等^[16]在伪表面波体系中提出了一种二维波动体系内非周期声信号的空间复用方法.然而,在面向片上声传输的应用场景时,上述研究未充分考虑其他集成模块可能对信号传输造成的干扰效应.此外,现有伪表面波的调控机制主要局限于结构单侧,尚未实现结构两侧伪表面波的同时调控.

针对上述问题,本文提出了一种双面声学超表面的设计方法,能够在结构上下表面之间灵活传导伪表面波.具体地,本文经理论推导伪表面波模式的色散方程,得到传播波矢与结构参数之间的依赖关系.通过优化双面超表面的结构参数,实现伪表面波在界面传导过程中的波矢匹配,保证在上下表面间高效的传导能力.在此基础上,本文构建了一类隐身装置,并通过仿真和实验分别验证了伪表面波的避障传输效果,并进一步评估了对不同形状障碍物的鲁棒性.研究成果在提升伪表面波传输效率、增加调控自由度和优化空间利用率等方面具有显著优势,有望推动在片上声传输^[17,18]、微粒操控^[19,20]等领域的应用发展.

2 工作原理

本文设计的声隐身器件的工作原理如图 1 所示.结构由单面开孔(紫色部分)和双面开孔的亥姆霍兹共鸣器(橙色部分)组成.单面结构可实现伪表面波沿表面的局域化传输,双面结构可实现伪表面波在结构上下表面间的传导.通过改变双面超表面两侧的孔径大小(D_{1-1} , D_{2-1} 等,图 1 中黑色虚线框所示),伪表面波能够逐渐从上表面耦合至下表面.通过在障碍物前后铺设这种双向开孔结构,伪表面波在遇到障碍物前将被传导至下表面,在经过障碍物后又被传导回上表面,从而实现完美声隐

身的传输效果.

3 结构设计

本文提出的支持伪表面波传输的双面超表面由周期性排列的亥姆霍兹共鸣器组成,如图 2(a)所示.晶格常数 a 为 2 cm,结构的深度 h 为 0.5 cm,空腔的深度 t 为 0.3 cm,壁厚和开孔深度 l 均为 1 mm.结构待定的 3 个参数分别为:空腔的边长 w 以及上下表面开孔的孔径 D_1 和 D_2 ,通过改变开孔孔径的大小,能够增大伪表面波在上下表面之间的耦合强度.在此基础上调整空腔的边长 w ,能够保证结构间的波矢匹配,实现伪表面波在界面间的高效传导.

为实现伪表面波在上、下表面之间高效的耦合与传导,本文提出了一种基于梯度孔径调控的设计方法.在综合考量梯度变化的对称性、波矢匹配的约束与亥姆霍兹共鸣器的共振特性等条件之后,通过系统地调节上、下表面开孔的孔径尺寸,使其在伪表面波传播方向(x 方向)上呈现线性梯度变化特征,具体参数配置如下: $D_{1-1} = 0.16$ cm, $D_{2-1} = 0.04$ cm; $D_{1-2} = 0.12$ cm, $D_{2-2} = 0.08$ cm; $D_{1-3} = 0.08$ cm, $D_{2-3} = 0.12$ cm; $D_{1-4} = 0.04$ cm, $D_{2-4} = 0.16$ cm.当伪表面波沿超表面下侧绕过障碍物后,可通过反向铺设上述结构使得声波传导回上表面继续前向传播,如图 1 所示.然而,孔径的梯度变化会导致相邻结构单元间的阻抗失配问题,从而显著降低伪表面波的耦合效率.针对这一问题,本文通过推导色散方程建立了波矢 k_x 与关键结构参数(包括孔径尺寸 D 、内腔边长 w)之间的依赖关系.通过优化设计,实现了相邻结构单元间的阻抗匹配,确保了伪表面波的高效耦合传输.具体设计流程如下.

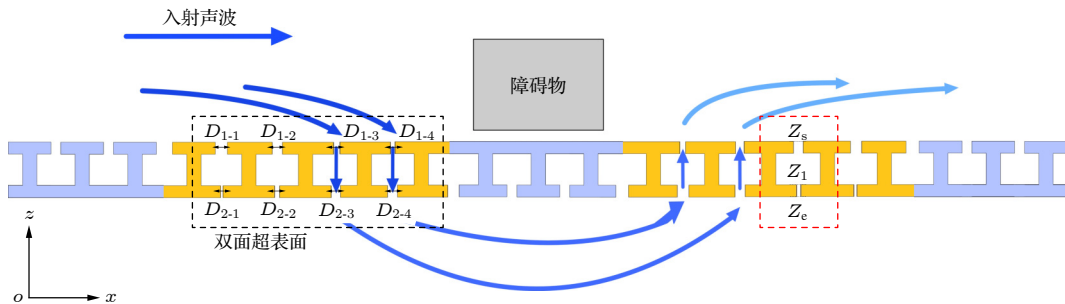


图 1 支持声伪表面波双面传输的声隐身装置

Fig. 1. A schematic diagram of acoustic stealth device for supporting dual-sided transmission of spoof surface acoustic waves.

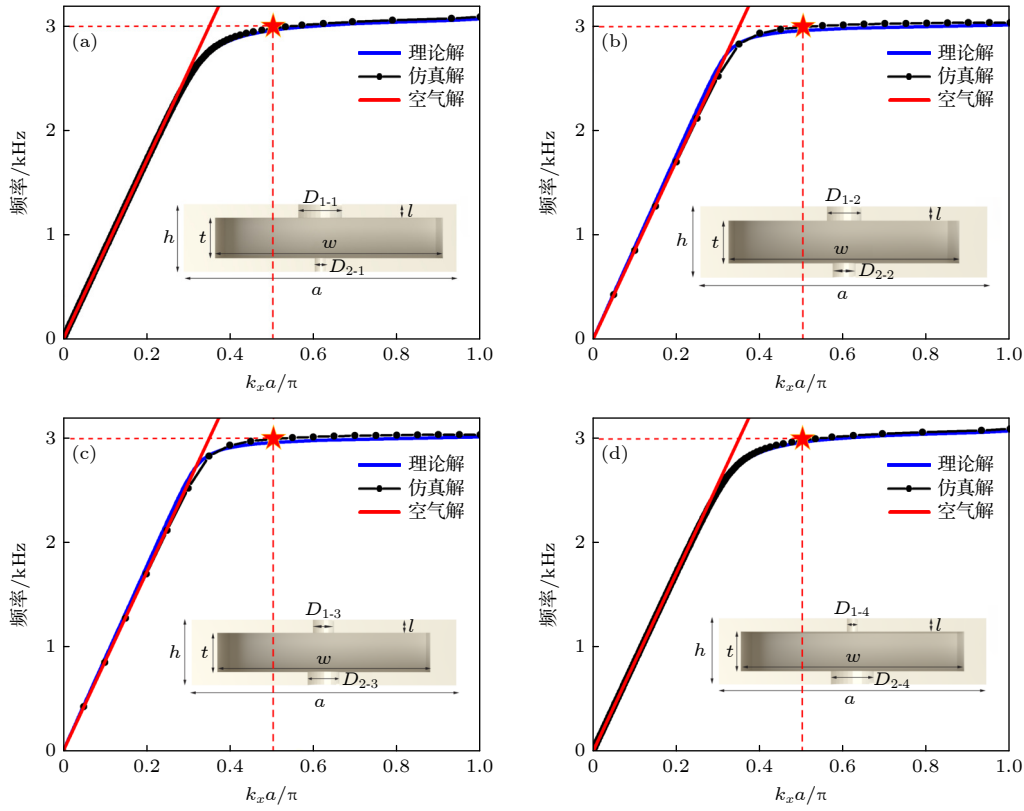


图2 不同内腔边长 w 和上下孔径 D_1 和 D_2 的双层超表面所承载伪表面波模式的色散曲线(右下角插图为4种双层超表面的结构单元示意图) (a) $w = 1.6703$ cm, $D_{1-1} = 0.16$ cm, $D_{2-1} = 0.04$ cm; (b) $w = 1.6092$ cm, $D_{1-2} = 0.12$ cm, $D_{2-2} = 0.08$ cm; (c) $w = 1.6092$ cm, $D_{1-3} = 0.08$ cm, $D_{2-3} = 0.12$ cm; (d) $w = 1.6703$ cm, $D_{1-4} = 0.04$ cm, $D_{2-4} = 0.16$ cm; 红星代表工作频率为 3000 Hz, 对应的传播波数为 $k_x = 78.54$ m^{-1}

Fig. 2. Dispersion curves of the spoof surface acoustic waves (SSAWs) supported by the double-layer metasurface with different inner cavity side length w and aperture diameters D_1 , D_2 : (a) $w = 1.6703$ cm, $D_{1-1} = 0.16$ cm, $D_{2-1} = 0.04$ cm; (b) $w = 1.6092$ cm, $D_{1-2} = 0.12$ cm, $D_{2-2} = 0.08$ cm; (c) $w = 1.6092$ cm, $D_{1-3} = 0.08$ cm, $D_{2-3} = 0.12$ cm; (d) $w = 1.6703$ cm, $D_{1-4} = 0.04$ cm, $D_{2-4} = 0.16$ cm. The red star indicates the operating frequency of 3000 Hz, corresponding to a propagation wavenumber of $k_x = 78.54$ m^{-1} .

假设伪表面波在超表面上传播是无损耗的, 并且与表面波不同的是, 伪表面波局域在空气域, 能量沿法向方向呈指数衰减趋势 ($\rho_0 = 1.21$ kg/m^3 , $c_0 = 343$ m/s). 基于上述假设, 考虑一束在双面超表面上传播的伪表面波, 其声压和法向振速可以表示为

$$p = p_0 e^{-|k_{\perp}|z} e^{i(k_x x - \omega_0 t)},$$

$$v_n = -\frac{1}{i\omega_0 \rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{i|k_{\perp}|}{\omega_0 \rho_0} p_0 e^{-|k_{\perp}|z} e^{i(k_x x - \omega_0 t)}, \quad (1)$$

其中, p 是声压, v_n 是伪表面波垂直于表面的法向振速, ρ_0 是背景媒质的质量密度, t 是时间, k_x 是沿 x 方向的传输波矢, k_{\perp} 是沿 z 方向的传输波矢, ω_0 是传播角频率, p_0 是声压振幅, i 是虚数单位. 考虑到结构单元的所有几何尺寸都远小于工作波长, 本文构建了集总参数法的计算模型, 通过阻抗转移法以求解上表面开孔处的声阻抗率(定义为

Z_s , 如图1中红色虚线框所示), 即:

$$Z_s = \frac{p}{S v_n} \Big|_{z=0} = \frac{i\omega_0 \rho_0}{a^2 |k_{\perp}|}. \quad (2)$$

其中, S 为超表面开孔的横截面积. 具体地, 本文设计的双面超表面结构可近似看作由两侧短管和中心腔体级联组成. 结构末端圆孔的声阻抗可近似表示为

$$Z_e \approx R_1 \left[\frac{1}{4} \left(\frac{k_0 D_2}{2} \right)^2 + i \left(\frac{0.61 k_0 D_2}{2} \right) \right], \quad (3)$$

其中, $R_1 = \rho_0 c_0 / [\pi (D_2/2)^2]$, $k_0 = \omega_0 / c_0$, $c_0 = 343$ m/s 为空气中的声速. 利用阻抗转移公式, 随即得到腔体背部处的表面声阻抗 Z_1 为

$$Z_1 = R_1 \frac{Z_e + iR_1 \tan(k_0 l)}{R_1 + iZ_e \tan(k_0 l)}. \quad (4)$$

在此基础上, 将 Z_1 作为中心共振腔的末端声阻抗, 通过阻抗转移即可得到双面超表面的表面声阻抗 Z_s 与结构参数之间的关系. 由于超表面仅

支持伪表面波传输, 即法向波矢满足关系 $|k_{\perp}| = \sqrt{k_x^2 - k_0^2}$, 可以写出等效折射率与结构参数之间的关系:

$$\frac{i\omega\rho_0}{\sqrt{k_x^2 - k_0^2}} = a^2 Z_s(a, D_1, D_2, w, h, t, l). \quad (5)$$

由(5)式可见, 结构单元的等效折射率由亥姆霍兹腔的7个结构参数决定. 将既定的结构参数代入(5)式, 可以得到4组双面超表面的具体结构参数, 如表1所列. 其对应的色散曲线如图2所示, 不难看出在工作频率3000 Hz, 4种结构对应的传播波数都近似等于 78.54 m^{-1} , 这种波矢匹配特性保证了伪表面波在上下表面间传导时的高效耦合.

表1 双面超表面单元的结构参数

Table 1. Structure parameters of the unit of the double-sided acoustic metasurface.

结构	边长 w/cm	孔径 D_1/cm	孔径 D_2/cm	高度 h/cm	周期 a/cm	深度 t/cm
1	1.67	0.16	0.04	0.5	2	0.3
2	1.61	0.12	0.08	0.5	2	0.3
3	1.61	0.08	0.12	0.5	2	0.3
4	1.67	0.04	0.16	0.5	2	0.3

4 仿真结果分析

在设计得到结构单元的基础上, 本文结合有限元仿真方法构建了单列双面超表面, 通过数值计算对比有无障碍物情况下的声波透射情况, 如图3所示. 选取工作频率 $f = 3000 \text{ Hz}$, 该频率略低于结构单元的共振频率, 能够降低局域共振导致的热黏滞问题对传输效率的影响. 超表面和障碍物的密度 ρ 与声速 v 均设置为 1190 kg/m^3 和 2730 m/s . 仿真区域的高度 H (z 方向) 和宽度 t (y 方向) 分别为 2 cm 与 0.5 cm , 前后两侧平面 ($x-z$ 平面) 设置为周期性边界, 左侧平面 ($y-z$ 平面) 设置为入射压力场以模拟伪表面波的入射, 其他边界设置为平面波辐射以模拟自由空间. 如图3(a)所示, 本文对比了有无双面超表面铺设情况下障碍物对伪表面波的散射情况. 可以看出, 未铺设双面超表面时, 声波在遇到障碍物后产生了明显的散射, 导致在障碍物后方形成明显的影区. 而在构建了双面超表面后, 伪表面波能够传导至超表面下侧进而绕过障碍

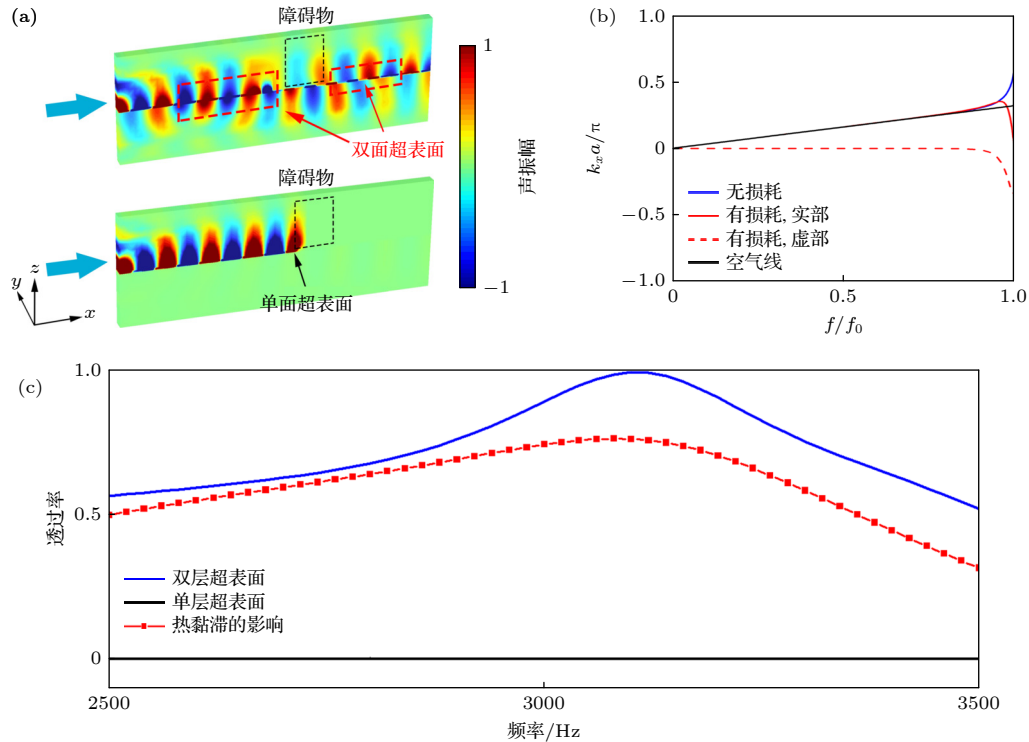


图3 有无双层超表面下的声压场分 (a) 双层/单层共振人工单元上下两侧的声场分布结果; (b) 存在热黏性损耗下伪表面波的色散关系计算结果; (c) 有无双层超表面情况下的伪表面波透射率对比图黏滞

Fig. 3. Sound pressure distributions of the spoo surface acoustic waves with/without the double-sided metasurface: (a) Sound field distribution of the upper and lower sides of the double-layer/single-layer artificial units; (b) dispersion relation of spoo surface acoustic waves in the presence of the thermal and viscous losses; (c) comparison diagram of spoo surface acoustic wave transmission with and without double-layer metasurface.

物继续向前传播,显著减少了声散射,从而形成了一个声波全透传输通道.为定量评估双面超表面的导波性能,本文进一步计算了伪表面波的透射谱,如图3(b)所示.在2500—3500 Hz的目标频带内,基于本文设计的双面超表面结构能够实现大于0.5的透射率,明显优于没有铺设双面超表面下的透射率,表明基于本文提出的结构能够在一定频率范围内保证伪表面波在不同表面间的耦合和传导.考虑到热黏滞效应可能对伪表面波传导产生影响,本文计算了不同开孔孔径的亥姆霍兹共鸣器的色散曲线:

$$-\frac{i\omega\rho_0}{a^2\sqrt{k_x^2-k_0^2}}=\left[Z_{h1}+\frac{Z_c(Z_{h2}+Z_e)}{Z_c+(Z_{h2}+Z_e)}\right], \quad (6)$$

式中上孔、下孔、空腔和下孔末端的声阻抗分别为

$$\begin{aligned} Z_{h1} &= \frac{\rho_0 c_0}{\pi(D_1/2)^2} \frac{2i\sin(k_{c1}l/2)}{\sqrt{[\gamma-(\gamma-1)\Psi_{h1}]\Psi_{v1}}}, \\ Z_{h2} &= \frac{\rho_0 c_0}{\pi(D_2/2)^2} \frac{2i\sin(k_{c2}l/2)}{\sqrt{[\gamma-(\gamma-1)\Psi_{h2}]\Psi_{v2}}}, \\ Z_c &= \frac{\rho_0 c_0^2}{i\omega t w^2}, \\ Z_e &= \frac{\rho_0 c_0}{\pi(D_2/2)^2} \left[\frac{1}{4} \left(\frac{k_0 D_2}{2} \right)^2 + i \left(\frac{0.61 k_0 D_2}{2} \right) \right], \end{aligned} \quad (7)$$

其中, k_x 是伪表面波的传播波数, k_0 是自由空间中声波的传播波数, ω 是角频率, $\rho_0 = 1.21 \text{ kg/m}^3$ 是空气的密度, $c_0 = 343 \text{ m/s}$ 是空气的声速, Ψ_{h1}/Ψ_{h2} 为上/下开孔的热修正因子, Ψ_{v1}/Ψ_{v2} 为上/下开孔的黏滞修正因子, $\gamma = 1.4$ 是定压比热和定容比热

的比值, k_{c1} 和 k_{c2} 分别为结构两侧短管中的复波数.本文在图3(b)中绘制了色散曲线,其对应最小孔径 $D = 0.04 \text{ cm}$ 的双面结构所支持伪表面波模式的色散曲线.同时,本文利用有限元仿真对存在热黏滞情况下伪表面波的传输效率进行了计算,可以看到传播效率相比于无黏滞情况下均有一定程度的下降,特别是当工作频率靠近结构共振频率时,热黏滞问题将严重阻碍伪表面波的传播.但是本研究设置工作频率略偏离共振频率,因而仍旧能够保持较高的传导率,如图3(c)所示.仿真结果表明热黏滞效应影响下,伪表面波在3000 Hz左右的透过率仍大于0.8,说明热黏滞问题对本研究的影响不大.

此外,本文进一步研究了不同形状障碍物对声隐身的影响,通过在伪表面波传输路径上放置正方形和菱形散射体,验证该隐身器件对障碍物形状的鲁棒性,如图4所示.长方体的体积 $V = 14 \text{ cm} \times 14 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} = 1960 \text{ cm}^3$, 菱形散射体的体积是长方体体积的一半.入射伪表面波的频率 $f = 3000 \text{ Hz}$.两种散射体的高度都远大于声波波长,以实现散射体前后声波的完全阻隔.仿真中选取有限个周期的结构排布,超表面结构的长度 l (x 方向) 为80 cm, 宽度 w (y 方向) 为14 cm.超表面和障碍物的材料与上一个案例一致.伪表面波由右下侧边界入射, x - z 两侧平面设置为硬声场边界,其他边界均设置为完美匹配层以模拟开放空间,使伪表面波传播时不受边界衍射效应的干扰,确保隐身效

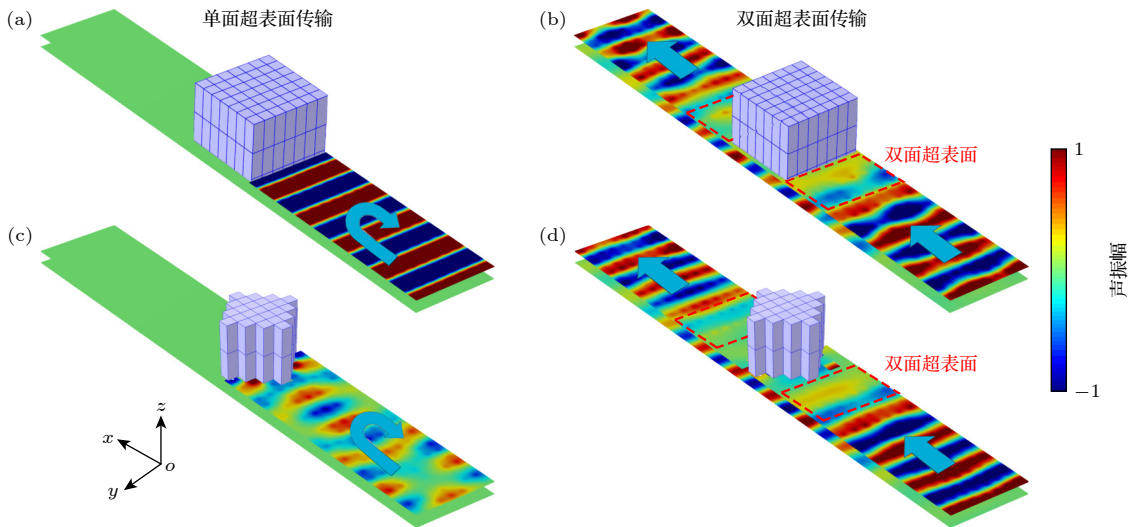


图4 基于双面超表面的声隐身装置

Fig. 4. Acoustic stealth device based on the double-sided metasurface.

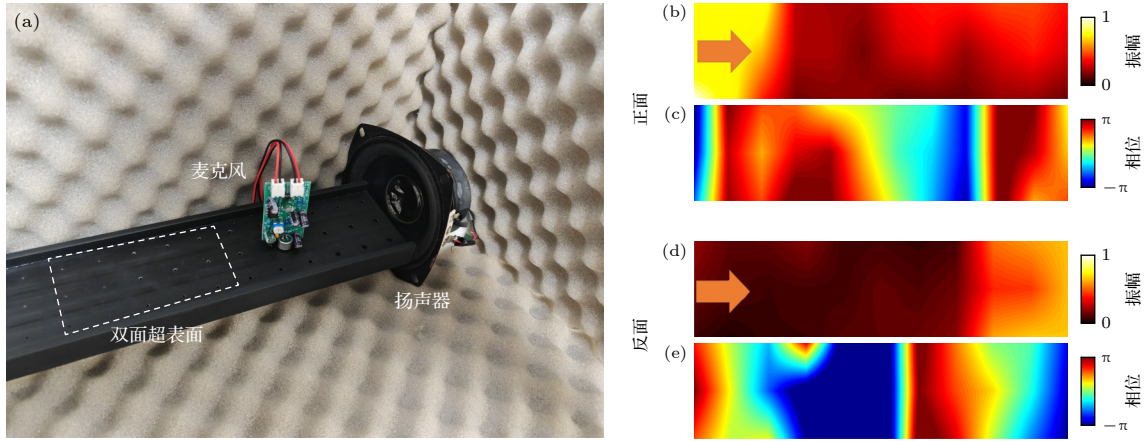


图 5 (a) 实验装置图; (b) 超表面正面声振幅测量结果; (c) 超表面正面声相位测量结果; (d) 超表面反面声振幅测量结果; (e) 超表面反面声相位测量结果

Fig. 5. (a) Experimental setup and device model; (b) measured acoustic amplitude distribution on the front side of the metasurface; (c) measured acoustic phase distribution on the front side of the metasurface; (d) measured acoustic amplitude distribution on the back side of the metasurface; (e) measured acoustic phase distribution on the back side of the metasurface.

果的实现是由伪表面波的上下耦合传输主导,而非边界效应. 图中红色虚线区域为双面超表面铺设区域,其他区域为单面超表面覆盖区域. 不难看出,无论障碍物的形状如何,在构建了隐身结构后,伪表面波能够沿超表面底部继续向前传播,显著减少了声波的散射,从而实现障碍物的隐身效果. 需要补充说明的是,本研究构建的双面超表面仅适用于可听声频段,针对更高频段的声波调控需求,后续拟通过深亚波长结构优化设计,探索超声频段 (> 20 kHz) 伪表面波调控的物理机理与实现路径,相关技术突破有望为微纳声学器件集成及片上声通信系统开发提供新的设计思路.

5 实验验证

在此基础之上,本文通过实验验证双面超表面的隐身特性. 图 5 为实验装置图和测量结果图. 该双面超表面由 3D 打印加工得到,固体材料选择丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (ABS),其可以被认为声学刚性的. 测试周围填充有海绵吸声材料,以模拟完美声吸收边界. 测试时传输路径上放置了一矩形障碍物. 4 英寸扬声器连接到信号发生器上,稳定发出频率为 3000 Hz、输入电压为 6 V 的声波信号,以模拟由超表面右侧上端入射的平面波,如图 5(a) 所示.

实验中利用双探头法测试伪表面波的振幅和相位. 通过逐点扫描上下表面各孔径的声信号得到实验结果,扫场点间隔为 2 cm,如图 5(b) 所示. 由

振幅图不难看出,在结构上表面,伪表面波因逐渐耦合到下表面而在传播方向上呈现逐渐衰减趋势,而下表面的声能量随着传播距离增大而逐渐增大,不会因障碍物的存在而产生显著的声散射,声隐身特性得到验证. 实验测得的耦合效率约为 60%,其值偏低主要归因于开放边界引起的声能耗散. 另外,我们分别测量了伪表面波在两侧表面的传播相位,可以看到大致都以平面波模式传输,体现出结构良好的导波特性的. 需要说明的是,考虑到实验空间的限制,目前的结构长度仅能实现伪表面波的单次传导. 随着结构长度的变长,应该能够实现伪表面波在上下表面间的多次传导效果.

6 结论

本文设计并实现了一种基于双面声学超表面的声隐身器件,通过理论分析、数值仿真和实验测量验证了该器件能够实现伪表面波避障传输的功能. 结构由双面开孔的亥姆霍兹共鸣器周期排列构成,本文经理论推导色散方程得到波矢与结构参数之间的依赖关系,可通过精确调控结构参数实现伪表面波在上下表面间的高效耦合传导. 此外,所设计的双面超表面结构在复杂几何形状障碍物条件下仍保持稳定的避障传输性能,展现出良好的鲁棒性和环境适应性. 本文的研究成果为伪表面波调控提供了新的研究思路和方法,后续研究将进一步评估双面人工结构对超声频段声波的适用性^[21,22],探索与现有片上声传输技术兼容的可能性,预期成果

有望突破衍射极限的高分辨率成像^[23-25]和高容量通信^[26,27]带来技术革新。

参考文献

- [1] Li H X, Liang B, Cheng J C 2022 *Sci. Sin. -Phys. Mech. Astron.* **52** 244302 (in Chinese) [李瀚翔, 梁彬, 程建春 2022 中国科学: 物理学 力学 天文学 **52** 244302]
- [2] Li H X, Rosendo-LÓPEZ M A, Zhu Y F, Fan X D, Torrent D, Liang B, Cheng J C, Christensen J 2019 *Research* **2019** 8345683
- [3] Lasri O, Sirota L 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 032201
- [4] Hu J, Liang B, Qiu X J 2019 *Appl. Phys. Express* **12** 27002
- [5] Hu J, Wang H Z 2020 *Appl. Acoust.* **39** 799 (in Chinese) [胡洁, 王昊泽 2020 应用声学 **39** 799]
- [6] Chen Z X, Peng Y G, Li H X, Liu J J, Ding Y J, Liang B, Zhu X F, Lu Y Q, Cheng J C, Ahl A 2021 *Sci. Adv.* **7** eabj1198
- [7] Gu Z M, Fang X S, Liu T, Gao H, Liang S J, Li Y, Liang B, Cheng J C, Zhu J 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 113501
- [8] Wu K, Tan Y, Liu J J, Liang B, Cheng J C 2025 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **68** 254304
- [9] Jia Y R, Liu Y M, Hu B L, Xiong W, Bai Y C, Cheng Y, Wu D J, Liu X J, Christensen J 2022 *Adv. Mater.* **34** 2202026
- [10] Xie P X, Sheng Z Q, Huang Z X, Hu P, Wu H W 2023 *Appl. Phys. Lett.* **122** 222202
- [11] Yue Z C, Zhang Z W, Wang H X, Xiong W, Cheng Y, Liu X J 2022 *New J. Phys.* **24** 053009
- [12] Wu H W, Quan J Q, Yin Y Q, Sheng Z Q 2020 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53** 455101
- [13] Zheng Y, Liang S J, Fan H Y, An S W, Gu Z M, Gao H, Liu T, Zhu J 2022 *JASA Express Lett.* **2** 024004
- [14] Liu T, Chen F, Liang S J, Gao H, Zhu J 2019 *Phys. Rev. Appl.* **11** 034061
- [15] Liu J J, Liang B, Cheng J C 2021 *Phys. Rev. Appl.* **15** 014015
- [16] Li H X, Liu J J, Chen Z X, Wu K, Liang B, Yang J, Cheng J C, Christensen J 2023 *Nat. Commun.* **14** 7633
- [17] Hirsch T M F, Mauranyapin N P, Romero E, Jin X, Harris G, Baker C G, Bowen W P 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 013504
- [18] Dai H Q, Liu L B, Xia B Z, Yu D J 2021 *Phys. Rev. Appl.* **15** 064032
- [19] Zhu Z J, Hu N, Wu J Y, Li W X, Zhao J B, Wang M F, Zeng F Z, Dai H J, Zheng Y J 2022 *Front. Phys.* **10** 1068833
- [20] Dong E Q, Cao P Z, Zhang J H, Zhang S, Fang N X, Zhang Y 2023 *Natl. Sci. Rev.* **10** nwac246
- [21] Xu S Z, Xie S M, Wu D, Chi Z H, Huang L 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 050701 (in Chinese) [胥守振, 谢实梦, 吴丹, 迟子惠, 黄林 2022 物理学报 **71** 050701]
- [22] Wu W H, Yang P F, Zhai W, Wei B B 2019 *Chin. Phys. Lett.* **36** 084302
- [23] Li P Q, Li Z L, Zhou W, Wang S W, Meng L, Peng Y G, Chen Z, Zheng H R, Zhu X F 2022 *Adv. Funct. Mater.* **32** 2203109
- [24] Zeng L S, Lin Z B, Li Z L, Yang Y, Hu Y, Chen Z, Peng Y G, Ma T, Zheng H R, Zhu X F 2025 *Adv. Mater.* **37** 202420229
- [25] Yang X, Zhang Z H, Xu M W, Li S X, Zhang Y H, Zhu X F, Ouyang X P, Ahl A 2024 *Nat. Commun.* **15** 4346
- [26] Zhao C Y, Wu K, Liu J J, Liang B, Cheng J C 2025 *Phys. Rev. Appl.* **23** 034053
- [27] Chen A, Xia Y F, Chen Z X, Su H J, Liu J J, Yang J, Zhu X F, Liang B, Cheng J C 2025 *Adv. Funct. Mater.* **35** 202425833

Design of acoustic cloaking for spoof surface waves based on double-sided acoustic metasurface*

MA Chikai¹⁾ CHU Zhihan¹⁾ FAN Zihao¹⁾ ZHOU Zixiang¹⁾
 LIN Tiantian¹⁾ LI Chengxuan¹⁾ LI Haoxiang^{1)2)†} YANG Yu^{1)‡}

1) (College of Information Science and Technology & College of Artificial Intelligence,

Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

2) (Key Laboratory of Modern Acoustics, MOE, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

(Received 24 March 2025; revised manuscript received 30 May 2025)

Abstract

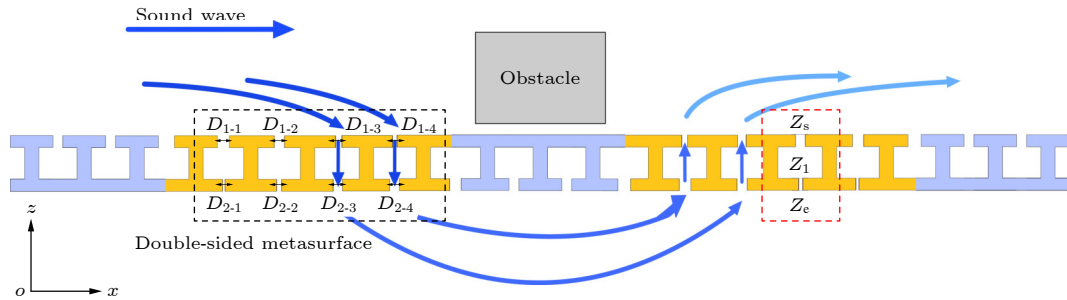
In recent years, people have increased their efforts to use spoof surface acoustic waves (SSAWs) to achieve subwavelength-scale modulation. However, obstacles on the transmission path often cause strong scattering of

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12404530), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20240659), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 020414380195).

† Corresponding author. E-mail: hxli@njfu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: yang1996@njfu.edu.cn

SSAWs, which limits their practical applications in communications and other fields. In this paper, we propose a new type of acoustic metasurface that supports the SSAWs' propagation on both sides and design an acoustic stealth device based on such a metasurface. This metasurface is composed of periodically arranged Helmholtz resonators with bidirectional apertures, whose unique structure enables SSAWs to achieve interlayer transitions between the top surface and bottom surface. Remarkably, the total thickness of the structure is only 1/20 of the incident wavelength, exhibiting obvious subwavelength characteristics. We theoretically calculate the dispersion curve of SSAWs, and establish the dependency relationship between the propagation wave vector and the structural parameters. By optimizing the structural parameters of the double-sided metasurface, the wave vector matching during propagation is ensured, thereby achieving efficient transitions with minimal losses between the top and bottom surfaces. We construct a "sound-transparent path" through numerical simulations, allowing waves to bypass obstacles without scattering, and demonstrate that thermoviscous effects exert a negligible influence on transmission efficiency. Furthermore, an experiment is carried out to validate this metasurface's dual-sided wave-manipulation capability, which demonstrates that the SSAWs maintain their wavefronts during interfacial propagation, showing excellent robustness against large-sized obstacles. The proposed stealth device possesses notable advantages, including a lightweight structure and high flexibility, providing new research perspectives and technical pathways for manipulating SSAWs and designing acoustic devices on a deep subwavelength scale.



Keywords: double-sided metasurface, spoof surface acoustic wave, dual-sided acoustic manipulation, acoustic cloaking

PACS: 43.20.+g, 43.35.+d

DOI: 10.7498/aps.74.20250379

CSTR: 32037.14.aps.74.20250379

基于双面声学超表面的伪表面波隐身装置设计

马驰凯 储志韩 范梓颢 周子翔 林甜甜 黎程轩 李澔翔 杨雨

Design of acoustic cloaking for spoof surface waves based on double-sided acoustic metasurface

MA Chikai CHU Zhihan FAN Zihao ZHOU Zixiang LIN Tiantian LI Chengxuan LI Haoxiang
YANG Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 154301 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250379

CSTR: 32037.14.aps.74.20250379

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250379>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于亥姆霍兹共振的超薄弧形声学超表面地毯斗篷

Ultrathin acoustic metasurface carpet cloaking based on Helmholtz resonances

物理学报. 2024, 73(6): 064301 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231706>

声表面波-自旋波耦合及磁声非互易性器件

Surface acoustic wave-spin wave coupling and magneto-acoustic nonreciprocal devices

物理学报. 2024, 73(15): 158501 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240462>

基于非对称吸声器的发动机声学超表面声衬

Metasurface acoustic liner of engine based on asymmetric absorber

物理学报. 2023, 72(5): 054301 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222011>

基于反射超表面的偏馈式涡旋波产生装置

Offset-fed vortex wave generator based on reflective metasurface

物理学报. 2021, 70(19): 198401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210681>

相干控制的布洛赫表面波偏振转换

Coherent control of polarization transformation of Bloch surface waves

物理学报. 2023, 72(21): 214201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231050>

球形复合柱表面波声子晶体的带隙特性仿真

Numerical simulation study on band gap characteristics of surface phononic crystal with spherical composite column

物理学报. 2021, 70(14): 144301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210165>