

纪念应崇福院士诞辰 100 周年

基于相位调控的超高透射声学超表面及其应用*

田野 左淑毓 程营 刘晓峻†

(南京大学物理学院 南京 210093)

摘要 声学超表面可以灵活有效地对声波进行调控, 实现多种新颖的现象和功能, 在诸多声波调控领域有潜在的应用前景。该文引入了一种镀膜型迷宫结构单元, 可以提供全范围 ($0 \sim 2\pi$) 的突变相位, 具有高效的透射率 ($\sim 100\%$) 和较好的鲁棒性。基于相位调控, 可利用镀膜型迷宫结构单元构建出超高透射超表面, 实现异常声折射、声聚焦、声束沿任意凸轨迹弯曲传播以及声成像等应用。

关键词 超表面, 声波调控, 相位调控, 迷宫结构, 高透射

中图法分类号: O42 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2018)05-0691-10

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.05.013

Phase-controlled acoustic metasurface with high efficiency and its applications

TIAN Ye ZUO Shuyu CHENG Ying LIU Xiaojun

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract Acoustic metasurfaces can control sound waves flexibly and effectively, and realize a variety of novel phenomena and functions, which makes it show a great application prospect in many acoustic wave control fields. In the paper, authors introduce a coated labyrinthine structure (CLS), which can provide a full phase-controlled range ($0 \sim 2\pi$) and a high transmittance ($\sim 100\%$), and features a good robustness. Based on the CLS units authors construct the phase-controlled acoustic metasurfaces with high efficiency. Based on the constructed metasurfaces, authors realize the applications of phase control such as acoustic anomalous refraction, acoustic focusing, acoustic beam bending along any convex trajectory, and acoustic imaging.

Key words Metasurface, Acoustic control, Phase control, Labyrinthine structure, High transmission

2018-05-30 收稿; 2018-07-13 定稿

*国家自然科学基金项目 (11674172, 11574148, 11474162)

作者简介: 田野 (1990-), 男, 黑龙江黑河人, 博士研究生, 研究方向: 声学人工材料。

† 通讯作者 E-mail: liuxiaojun@nju.edu.cn

1 引言

作为低维化的声学超材料^[1],声学超表面近年来逐渐得到了人们的广泛关注^[2]。声学超表面一般是由多种微结构单元按特殊序列排列在一起形成的具有亚波长厚度的平面型超材料体系,它可以灵活有效地对声波进行调控,实现多种新颖的声学现象和功能。相对于体积型声学超材料,声学超表面具有结构简单、紧凑、效率高、体积小、易加工等特点。目前声学超表面研究主要集中在反射调控、透射调控以及吸声等三个领域^[2]。对于透射超表面,目前已经实现了异常折射、负折射、体波向表面波转换、声束自弯曲、超稀疏隔声、生成螺旋声场、多路复用信号传输、声成像、模拟数学运算、非对称传输、全向通风声屏障等诸多功能和应用^[3-16],在医疗、通信、检测、军事乃至国计民生的各方面均具有广阔的应用前景。

随着广义折射定律理论的提出^[17]及其向声学领域的拓展^[18-19],相位调控已成为声学超表面研究的重要手段。因为结构相对简单、易加工等特点,迷宫结构单元可实现透射声学超表面的相位调控^[3-4,11]。然而,由于该类单元与背景介质阻抗失配,很难实现声学超表面的高效透射。因此,该类声学超表面大多采取弱化设计,即只保证超表面所需要的相位梯度分布,而忽略其透射效率的损失,从而导致声能的利用率低且实现的声学效果差。另一方面,通过共振结构实现的相位调控型透射声学超表面^[7,9-10,13-15]虽然在其共振频率处有较高的效率,但其对结构参数非常敏感,鲁棒性差。因此,找到一种高效透射同时又具有较好鲁棒性的相位调控型透射超表面单元就成了解决上述问题的关键。

本文引入了一种镀膜型迷宫结构单元,在拥有较好鲁棒性的同时极大地提高了相位调控型超表面的透射效率。基于传统的单层迷宫结构,在其两侧各加上一层同样由迷宫结构组成的声学“增透膜”,可构成高效透射的镀膜型迷宫结构单元。镀膜型迷宫结构单元可以提供全范围($0 \sim 2\pi$)的突变相位,同时具有高效的透射率($\sim 100\%$)。基于广义折射定律,由二维镀膜型迷宫结构单元构建的高效透射型超表面实现了异常声折射、声聚焦及声束沿任意凸轨迹弯曲传播等相位调控的应用。基于迭代

角谱法,进一步设计了三维镀膜型迷宫结构单元并构建了高透射超表面实现了声成像。

2 相位调控型声学超表面的离散化

理想超表面的参数应该是连续变化或可无限划分的,但在实际应用中不易实现,故需要将其参数离散化以利于实际操作。对于二维声学超表面,可将总长度为 L 的超表面离散成 N 段,每一段的宽度均为 L/N ;对于三维声学超表面,可将总面积为 $L \times H$ 的超表面离散成 $N \times M$ 块,每一块的面积均为 $(L/N) \times (H/M)$ 。然后将由超表面提供的 $0 \sim 2\pi$ 连续变化的突变相位离散成 U 种,每种突变相位之间均具有 $2\pi/U$ 的相位差。如将 $0 \sim 2\pi$ 离散成5等份,则应有突变相位分别为 $0, 2\pi/5, 4\pi/5, 6\pi/5, 8\pi/5$ 的五种单元。对于二维声学超表面,位于 $x = nL/N$ (n 为整数)处单元提供的突变相位 $\Phi'(nL/N)$ 应尽量接近于该位置的理想突变相位 $\Phi(nL/N)$,其定量关系可由式(1)表示:

$$\Phi'(nL/N) = \frac{2\pi}{U} \left\lfloor \frac{\Phi(nL/N)}{2\pi/U} + \frac{1}{2} \right\rfloor, \quad (1)$$

其中,运算符 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。同理,对于三维声学超表面,位于 $(x, y) = (nL/N, mH/M)$ (n, m 均为整数)处单元提供的突变相位 $\Phi'(nL/N, mH/M)$ 应尽量接近于该位置的理想突变相位 $\Phi(nL/N, mH/M)$,其定量关系如下:

$$\begin{aligned} & \Phi'(nL/N, mH/M) \\ &= \frac{2\pi}{U} \left\lfloor \frac{\Phi(nL/N, mH/M)}{2\pi/U} + \frac{1}{2} \right\rfloor. \end{aligned} \quad (2)$$

3 超高透射相位调控型声学超表面单元的实现

3.1 理想的相位调控单元

图1为理想的相位调控单元示意图,两边的黑色虚线为周期性边界, p_i, p_r, p_t 分别为入射声波、反射声波、透射声波,将其置于背景介质之中,当声波透过后会产生一个突变相位,但是声波的振幅不会改变(即透射率为100%)。设其可以调节突变相位的参数为 α ,则其提供的突变相位可表示为 $\varphi(\alpha)$ 。其透射系数 $TC(\alpha) (= p_t/p_i)$ 应满足

$$TC(\alpha) = e^{i\varphi(\alpha)}. \quad (3)$$

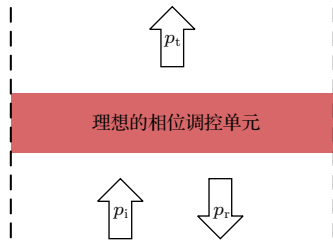


图1 理想的相位调控单元示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the ideal phase-controlled unit

3.2 迷宫结构的一种简化模型

图2所示的迷宫结构单元可以看作由一个宽为 w_c 、长为 $(l_c + d_c + w_c)n_c + d_c$ 的二维波导折叠而成，其中 n_c 为通道数，如图2中单元的通道数 $n_c = 4$ 。整个系统就相当于在宽 a_c 的粗波导中插入了一个宽 w_c 的细波导，其等效阻抗 Z 和等效声速 c 可用式(4)描述：

$$\begin{cases} Z = \frac{a_c \cdot \rho_0 c_0}{w_c + A}, \\ c = \frac{t_c \cdot c_0}{(l_c + d_c + w_c)n_c + d_c + B}, \end{cases} \quad (4)$$

其中， ρ_0 和 c_0 分别为背景介质的密度及声速， A 和 B 是为抵消因通道卷曲后产生的误差而引入的修正因子。利用数值仿真通过等效参数反演法可求得具体参数 (Z 、 c)，再与利用式(4)求得的参数进行比较，便可求得修正因子的取值，一般情况下此值甚小。这个简化模型有助于更加快捷简单地对迷宫结构单元进行设计，即用本模型先对目标参数进行粗算，再通过数值仿真的方式在粗算结果附近进行精细计算，便可以得到参数理想的迷宫结构单元。

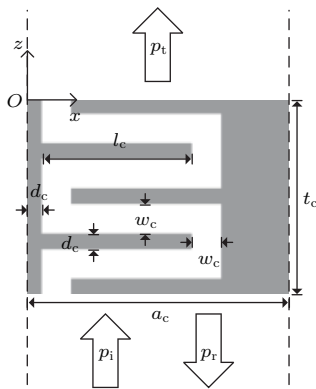


图2 传统单层迷宫结构单元的结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the traditional single-layer labyrinthine structure unit

3.3 镀膜型迷宫结构单元

声波透过如图3(a)所示的三层结构时，当材料的声学参数满足式(5)：

$$\begin{cases} L = \lambda_1/4, \\ Z_1 = \sqrt{Z_0 Z_2}, \end{cases} \quad (5)$$

声波会出现完全透射^[20]，其原理与光学中的增透膜原理类似，式(5)中 Z_j 和 λ_j 分别表示相应材料 M_j 的特性阻抗以及声波在其中的波长。每一层材料所需的参数均可由迷宫结构等效获得。由此，可以设计出如图3(b)所示的镀膜型迷宫结构单元，其由三层迷宫结构组成，从上到下分别对应于图3(a)中的 M_1 、 M_2 和 M_1 ，其中 l_2 为可变量，用于改变透射相位，其他参数固定不变。背景介质是空气，取 20 °C 时空气的参数值，即其声速 $c_0 = 343.2$ m/s、密度 $\rho_0 = 1.2$ kg/m³。

以下介绍具体设计过程。设置超表面的“晶格常数”，即镀膜型迷宫结构单元的宽度 $a = 0.5\lambda_0$ 。将其中间层的几何尺寸设置为 $d = 0.01\lambda_0$ 、 $w_2 = 0.01\lambda_0$ 、 $n_2 = 2$ 。利用数值仿真并通过等效参数反演法可求得中间层迷宫结构的修正因子 A_2 和 B_2 分别为 $4.135 \times 10^{-5}\lambda_0$ 和 $3.978 \times 10^{-3}\lambda_0$ 。通过计算式(4)和式(5)，便可得到镀膜层的几何参数应该满足： $l_1 = 0.1538\lambda_0$ 、 $w_1 = 0.065\lambda_0$ 、 $n_1 = 1$ ，此时单元的厚度 $t = 0.22\lambda_0$ 。同样可得其修正因子 A_1 和 B_1 分别为 $5.857 \times 10^{-3}\lambda_0$ 和 $1.120 \times 10^{-2}\lambda_0$ 。通过数值仿真，可得到镀膜型迷宫结构单元提供的突变相位及其透射率随中间层齿长 l_2 的变化，如图3(c)所示。由于相位相对变化不影响实际效果，为简化设计，规定当 $l_2 = 0$ 时其突变相位为0。可以发现，随着 l_2 的变化，相位基本呈线性变化，其鲁棒性比相位呈阶梯式时缓时急变化的传统单层迷宫结构单元有很大提升。同时，在整个 l_2 变化区间内，其透射率均可达到或接近100%。由图3(c)可以得到其透射系数 $TC_1(l_2)$ 应满足的近似公式：

$$TC_1(l_2) \approx e^{-4i\pi l_2/\lambda_0}, \quad (6)$$

可以发现式(6)与式(3)相符合。基于此，便可设计出可以提供 $0 \sim 2\pi$ 范围突变相位的超高透射超表面单元，并用于声波的高效相位调控。以离散化的镀膜型迷宫结构单元系列来设计超高透射相位调控超表面。将一个相位周期 ($0 \sim 2\pi$) 离散成10等份，

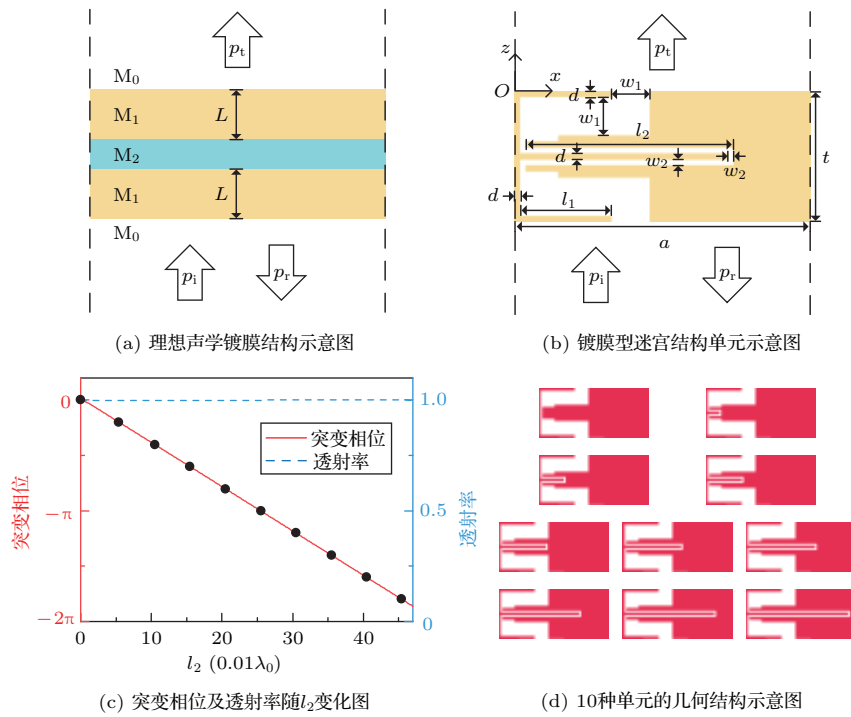


图3 镀膜型迷宫结构单元设计

Fig. 3 Design of CLS units

由于迷宫结构单元相位的改变来源于路径延迟，导致的突变相位为负值，相应的突变相位分别应为0、 $-\pi/5$ 、 $-2\pi/5$ 、 $-3\pi/5$ 、 $-4\pi/5$ 、 $-\pi$ 、 $-6\pi/5$ 、 $-7\pi/5$ 、 $-8\pi/5$ 及 $-9\pi/5$ 。由图3(c)中可以找到对应10种单元的 l_2 值，以黑色圆点表示，分别为0、 $0.054\lambda_0$ 、 $0.105\lambda_0$ 、 $0.155\lambda_0$ 、 $0.205\lambda_0$ 、 $0.255\lambda_0$ 、 $0.305\lambda_0$ 、 $0.355\lambda_0$ 、 $0.405\lambda_0$ 及 $0.454\lambda_0$ 。图3(d)从左到右从上到下按顺序给出了这10种单元的结构图。

4 基于广义折射定律的二维声场调控

4.1 基于广义折射定律的声学超表面理论模型

由广义折射定律^[18-19]可知，当声波以入射角 θ_i 从声速为 c_i 的介质通过声学超表面透射至声速为 c_t 的介质时，其折射角 θ_t 满足式(7)：

$$k_t \sin \theta_t - k_i \sin \theta_i = d\Phi(x)/dx, \quad (7)$$

其中， $k_i = 2\pi f/c_i$ 、 $k_t = 2\pi f/c_t$ 为超表面两侧的波数， $d\Phi(x)/dx$ 为超表面提供的突变相位分布。故只要超表面提供合适的突变相位梯度 $d\Phi(x)/dx$ ，则折射波方向可以任意调节。对式(7)积分，可得

$$\Phi(x) = \int [k_t \sin \theta_t(x) - k_i \sin \theta_i(x)] dx, \quad (8)$$

如此便可根据需要的折射角、入射角以及超表面两侧的波数得到超表面上突变相位的分布。考虑超表面两侧为同一均匀介质($k_i = k_t = k_0$)且正入射($\theta_i = 0$)这一简化条件，式(8)可简化为

$$\Phi(x) = k_0 \int \sin \theta_t(x) dx. \quad (9)$$

4.2 二维相位调控声学超表面的构建

基于广义折射定律，二维声学超表面的构建过程如下：

- (1) 按照需要实现的功能确定折射角分布 $\theta_t(x)$ ；
- (2) 由式(9)得到超表面的突变相位分布 $\Phi(x)$ ；
- (3) 对理想的连续超表面按照式(1)进行离散；
- (4) 利用图3(d)所示的10种镀膜型迷宫结构单元构建出相应功能的透射型声学超表面。

4.3 应用实例

4.3.1 异常声折射

首先讨论利用透射型声学超表面实现异常声折射。图4(a)为基于超表面的异常声折射原理示意图。其中，灰色粗线表示声学超表面，绿色箭头及蓝色箭头分别表示法向入射波及折射波。当声波入射到两边为同一均匀介质的界面之后，按照传统的折

射定律 $\sin \theta_t / c_t = \sin \theta_i / c_i$, 不应该发生折射。但是, 当界面处存在特定突变相位梯度分布的超表面时, 折射声束不再沿着入射方向传播, 而是发生一个偏折 ($\theta_{t1} = \theta_1$), 此即为异常声折射现象。根据式(9)可以求得图4(a)所示情况下, 超表面的突变相位分布 $\Phi_1(x)$ 应满足:

$$\Phi_1(x) = k_0 \sin \theta_1 x + C_1, \quad (10)$$

其中, C_1 为积分时得到的任意常数, 其取值不影响超表面的效果。以 $\theta_1 = 20^\circ, C_1 = 0$ 为例, 图4(b)中黑色线绘制了根据式(10)得到的理想超表面提供的突变相位沿 x 方向的分布, 图中红点则代表超表面根据式(1)离散后各个位置处单元提供的突变相位的分布。根据图4(b)所示分布, 可用镀膜型迷宫结构单元构建出相应的超表面。基于有限元数值仿真方法, 可计算出当平面高斯声束垂直入射至此超表面时的声压场分布, 如图4(c)所示, 其工作频率为 3432 Hz, 波长为 0.1 m。从图4(c)中可以发现明显的异常声折射现象, 超表面上方区域的透射声波依然维持平面高斯形状, 且振幅没有明显衰减, 但传

播方向与入射方向相比发生了明显的偏转, 与理论预测方向(黑色箭头)吻合, 表明所设计的透射型超表面能够实现高效的异常声折射。

在理论研究中, 忽略了损耗的影响。在实际应用中, 可能会因某些因素导致损耗的产生, 对超表面性能产生影响。通过有限元数值仿真方法可以对损耗可能产生的影响进行研究。当一束频率为 3432 Hz 的平面高斯声束垂直入射至异常声折射超表面时, 在无损耗、正常的热粘滞损耗以及因加工粗糙等可能原因引起的高损耗(仿真时设置镀膜型迷宫结构单元通道内空气的粘滞系数为正常值的 10 倍)等三种情况下, 仿真的声压场分布如图 5 所示。可以发现, 无论损耗存在与否、大小如何, 超表面始终能够实现明显的异常声折射现象, 只是透射声束的幅度随损耗的增加而减小。即损耗只影响超表面的效率, 而不会影响超表面的功能。这是因为损耗的存在, 只会减小声波的振幅, 对声波相位的影响很小, 而超表面的功能主要由相位分布决定。故后文中均只讨论理想的无损情况。

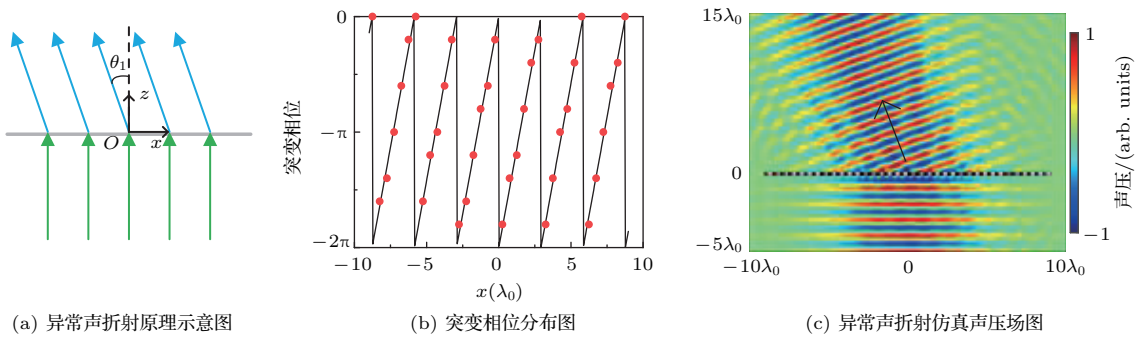


图4 基于超表面的异常声折射

Fig. 4 Acoustic anomalous refraction based on metasurface

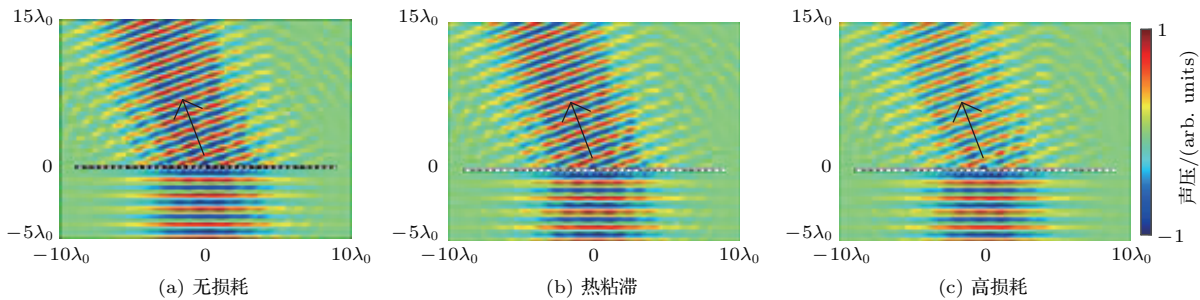


图5 无损耗、热粘滞、高损耗情况下异常声折射仿真声压场图

Fig. 5 Simulated pressure fields of acoustic anomalous refraction with non-loss, thermal viscous loss and high loss

4.3.2 声聚焦

图6(a)为基于超表面的声聚焦原理示意图。其中,灰色粗线表示声学超表面,绿色箭头及蓝色箭头分别表示入射波及折射波。为了实现声聚焦,只需使得所有透射声线均经过焦点即可。假设焦点位置坐标为 (x_0, z_0) ,为了汇聚声能量至焦点,透射声束的折射角 $\theta_{t2}(x)$ 应满足:

$$\sin \theta_{t2}(x) = \frac{x - x_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + z_0^2}}. \quad (11)$$

将式(11)代入式(9)则可得到产生声聚焦的理想声学超表面的突变相位分布 $\Phi_2(x)$ 为

$$\Phi_2(x) = k_0 \sqrt{(x - x_0)^2 + z_0^2} + C_2, \quad (12)$$

其中, C_2 为积分得到的任意常数。以 $(x_0, z_0) = (0, 5\lambda_0)$ 、 $C_2 = 0$ 为例,图6(b)中黑色线绘制了根据

式(12)得到的理想超表面的突变相位沿 x 方向的分布,图中红点代表超表面根据式(1)离散后各个位置处单元的突变相位的分布。为验证所设计的超表面的声聚焦效果,我们基于有限元数值仿真方法计算了超表面的声场分布,其工作频率为3432 Hz,波长为0.1 m。当平面声束垂直入射至超表面时,其声能量场分布如图6(c)所示,红色方框中心即为理论上的焦点位置,可以发现超表面上方区域的透射声波聚集在焦点处。根据互易原理,当处于焦点位置处的点源发射出同频率的柱面波入射至此超表面时,其透射波应为平面波。其声压场分布如图6(d)所示,可以发现柱面波入射波在透过超表面以后,被转换成了平面波,实现了柱面波向平面波的波形转换。因此,该超表面也可认为是具有亚波长厚度的平板聚焦声透镜。

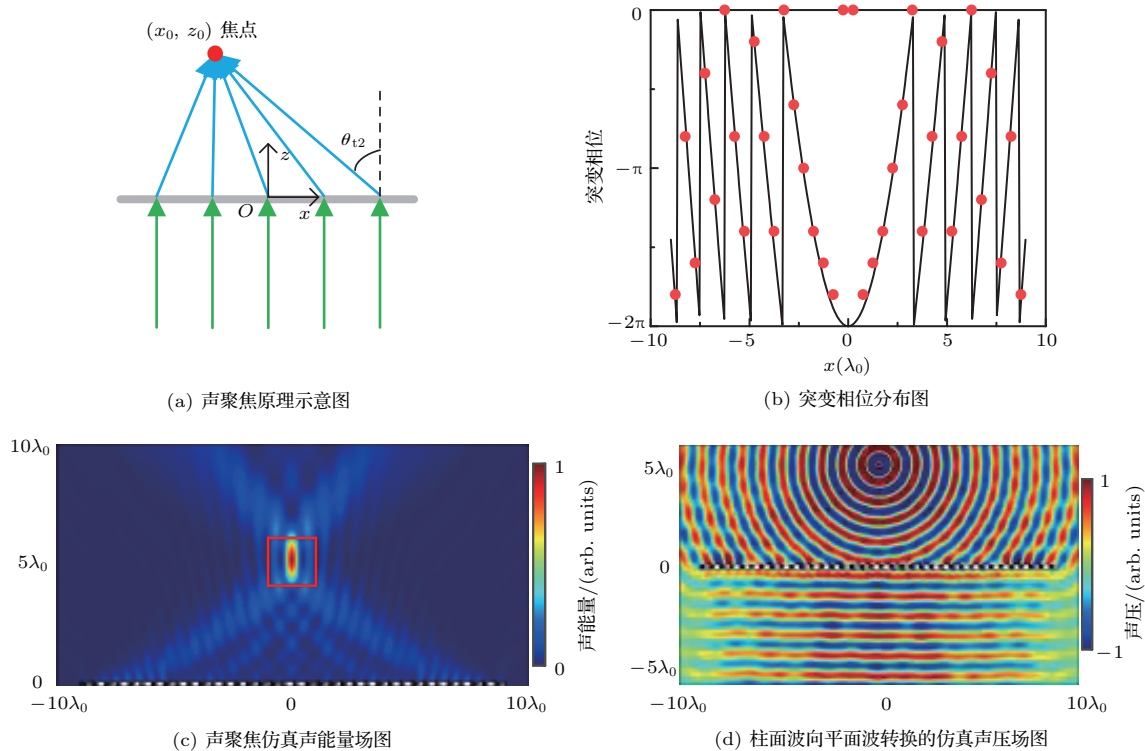


图6 基于超表面的声聚焦

Fig. 6 Acoustic focusing based on metasurface

4.3.3 声束沿任意凸轨迹弯曲传播

沿着弯曲的路径引导声波对于诸如医学超声成像、超声治疗、声学悬浮、非接触式声操控以及声学隐形等应用有着至关重要的作用。通过超表面实现声束沿任意凸轨迹弯曲传播的原理示意图如图7(a)所示,其最早是由Greenfield等^[21]于光学领

域提出。图中灰色粗线表示声学超表面,绿色箭头线表示垂直入射波,橙色实线表示想要实现的声束弯曲轨迹。为了得到此传播轨迹,折射波应沿着蓝色箭头线传播。设其轨迹曲线为

$$x_1 = f(z), \quad (13)$$

则曲线上任一点 $[z, f(z)]$ 的切线与 x 轴交点的横坐标应满足：

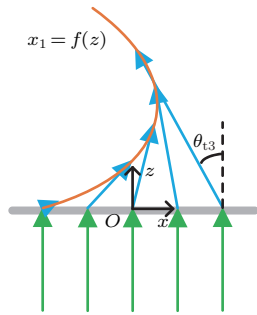
$$x = f(z) - z f'(z), \quad (14)$$

其中, $f'(z) = \tan \theta_{t3}(x)$ 。将其带入式(9), 可得

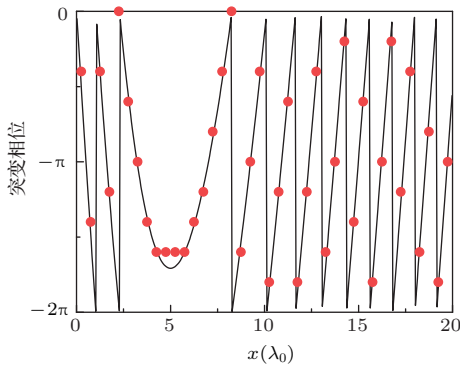
$$\Phi_3(x) = k_0 \int \frac{f'(z)}{\sqrt{1 + f'^2(z)}} dx, \quad (15)$$

再求出式(14)的反函数 $z = g(x)$, 将其带入式(15), 可得到产生声聚焦的理想声学超表面的突变相位分布 $\Phi_3(x)$ 为

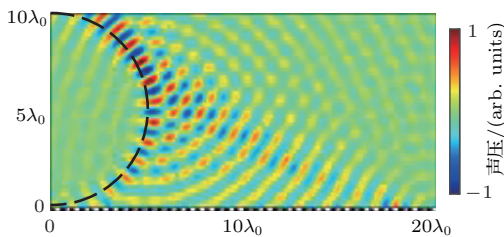
$$\Phi_3(x) = k_0 \int \frac{f'[g(x)]}{\sqrt{1 + f'^2[g(x)]}} dx. \quad (16)$$



(a) 声束沿任意凸轨迹弯曲传播原理示意图



(b) 突变相位分布图



(c) 声束沿半圆轨迹弯曲传播的仿真声压场图

图7 超表面实现声束沿任意凸轨迹弯曲传播

Fig. 7 Acoustic beam bending along any convex trajectory based on metasurface

以轨迹为原点在 $(0, r)$ 、半径为 r 的右半圆为例, 其轨迹曲线满足 $x_1 = \sqrt{r^2 - (z - r)^2}$, 根据上面提到的计算过程可以得出其相位分布为

$$\Phi_3(x) = k_0 \left(x - 2r \arctan \frac{x}{r} \right) + C_3, \quad (17)$$

其中, C_3 为任意常数。当 $r = 5\lambda_0, C_3 = 0$ 时, 图7(b)中黑色线绘制了根据式(17)得到的理想超表面的突变相位沿 x 方向的分布, 图中红点代表超表面根据式(1)离散后各个位置处单元提供的突变相位分布。基于有限元数值仿真方法, 当工作频率为 3432 Hz 的平面声束垂直入射至此可产生弯曲声束的超表面时, 其声能量场分布如图7(c)所示, 其中黑色虚线为需要的半圆形理论声束轨迹。从图中可以看到, 声束绕过半圆型区域, 沿着既定轨迹发生了弯曲传播。

5 基于迭代角谱法的三维声场调控

迭代角谱法^[22]属于Gerchberg-Saxton算法^[23]和迭代傅里叶变换算法^[24-28]的改进算法, 其可用于实现超表面成像。迭代角谱法通过不断调整超表面和目标图像的相位、振幅等参数, 仅几十次迭代后便可收敛, 并计算出超表面上应满足的相位分布。迭代角谱法具有适应性强、收敛快且收敛一致性好的特点。

5.1 迭代角谱法

迭代角谱法的流程如下：

(1) 计算像平面声场的角谱(第一次迭代时可设置像平面上的声场分布为目标图像的声场分布 $p_{\text{im}}(x, y)$);

(2) 将像平面声场的角谱反向传播至超表面;

(3) 通过超表面上的声场角谱计算超表面上的复声压分布;

(4) 重置超表面上复声压的振幅全部为1, 保留其相位分布不变;

(5) 计算此时超表面上声场的角谱;

(6) 将超表面上声场的角谱正向传播至像平面;

(7) 通过传播到像平面的角谱计算像平面上的复声压分布;

(8) 对本次所成的像与上次成像作对比, 观察效果是否一致判断收敛情况;

(9) 如果成像结果收敛, 则记录此时超表面上声场的相位分布 $[\Phi(x, y)]$ 并结束迭代; 否则根据目

标图像重置第(7)步计算的复声压的振幅,并保留其相位分布不变;

(10) 回到第(1)步。

一般情况下,经过几十次的迭代,其结果便可收敛,得到超表面的相位分布 $\Phi(x, y)$, 按照此分布构建超表面可实现三维声成像。

5.2 三维相位调控声学超表面的构建

要实现三维声场调控,需要将二维镀膜型迷宫结构单元向 y 方向拉伸长度 $(a - 2d)$, 并在两端盖上厚度为 d 的盖子,使其在 y 方向上整体长度为 a , 便可得到突变相位分别为 $0, -\pi/5, -2\pi/5, -3\pi/5, -4\pi/5, -\pi, -6\pi/5, -7\pi/5, -8\pi/5, -9\pi/5$ 的10种三维镀膜型迷宫结构单元,其尺寸为 $0.5\lambda_0 \times 0.5\lambda_0 \times 0.22\lambda_0$, 可用于构建三维声学超表面。图8为三维镀膜型迷宫结构单元的示意图,图中所示单元的突变相位为 $-7\pi/5$ 。

通过迭代角谱法实现超表面的构建过程如下:

(1) 按照目标图像确定像平面上理想的声场分布 $p_{im}(x, y)$;

(2) 由迭代角谱法得到超表面上的突变相位分布 $\Phi(x, y)$;

(3) 对理想的连续超表面按照式(2)进行离散;
(4) 利用10种三维结构单元构建出相应的透射型声学超表面。

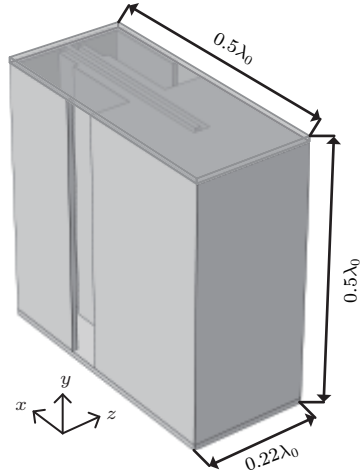


图8 三维镀膜型迷宫结构单元示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the three-dimensional CLS unit

5.3 应用实例

图9(a)为基于迭代角谱法的相位调控声成像系统示意图,入射声波为平面波,成像超表面包含

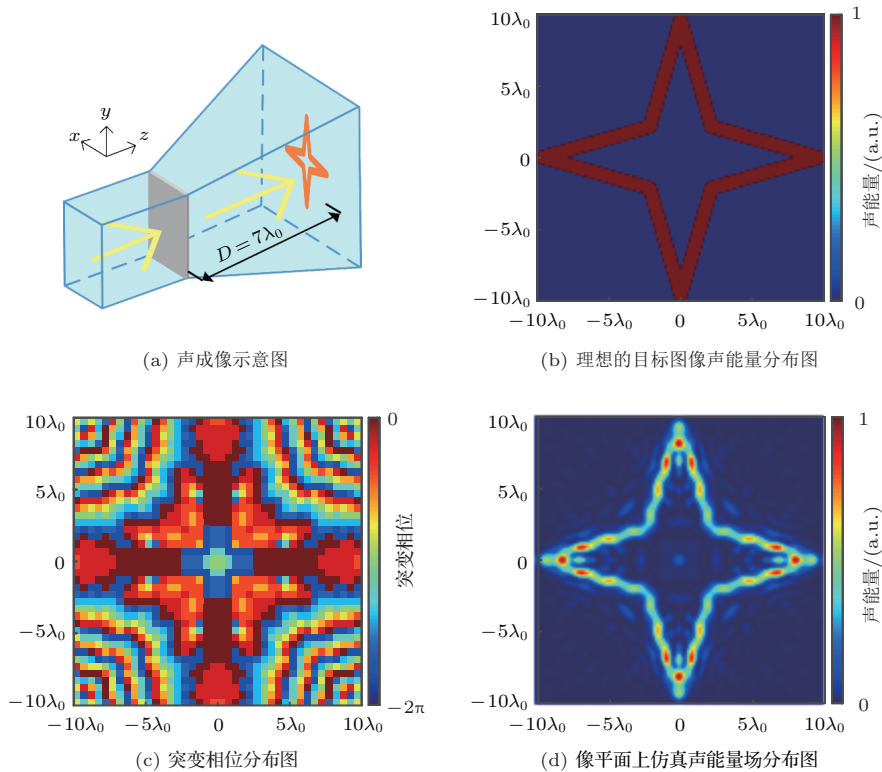


图9 基于三维相位调控型超表面的声成像

Fig. 9 Acoustic imaging based on metasurface

40 × 40个单元, 整体几何形状是边长为20λ₀的正方形, 像平面到超表面的距离D为7个波长(D = 7λ₀)。目标图像区域为边长20λ₀的正方形区域, 区域内包含一个四角星图案, 其声能量场分布如图9(b)所示, 其声场分布 $p_{\text{im}}(x, y)$ 可表示为

$$p_{\text{im}}(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in \text{四角星区域}, \\ 0, & (x, y) \notin \text{四角星区域}. \end{cases} \quad (18)$$

根据式(18), 通过迭代角谱法经过30个迭代周期后根据式(2)进行离散可以计算出超表面的突变相位分布, 如图9(c)所示, 按照此图构建超表面可实现声成像。以工作频率为3432 Hz、波长为0.1 m为例, 平面声波垂直入射至按照图9(c)构建的超表面, 基于有限元数值仿真方法, 可计算出其像平面上声能量场的分布如图9(d)所示, 可以观察到较满意的成像效果。

6 结论

本文通过镀膜型迷宫结构单元的引入极大地提高了相位调控型超表面的透射效率。基于传统的单层简单迷宫结构, 在其两侧各加上一层同样由迷宫结构组成的“增透膜”, 可构成高效透射的镀膜型迷宫结构单元, 其透射率相比于传统单层迷宫结构大大提高。镀膜型迷宫结构单元具有极高的透射率(~100%), 并且通过改变中间层的齿长可以提供全范围(0 ~ 2π)的突变相位。镀膜型迷宫结构的相位随着齿长几乎呈线性变化, 具有较强的鲁棒性。基于广义折射定律, 由10种二维镀膜型迷宫结构单元构建的高效透射型超表面分别实现了异常声折射、声聚焦及声束沿任意凸轨迹弯曲传播等相位调控的应用。基于迭代角谱法, 由10种三维镀膜型迷宫结构单元构建的高效透射型超表面则通过调控相位实现了声成像。超表面的调控灵活性和高效透射特性在声波调控领域具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Cummer S A, Christensen J, Alù A. Controlling sound with acoustic metamaterials[J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2016, 1(3): 16001.
- [2] 李勇. 声学超构表面[J]. *物理*, 2017, 46(11): 721-730.
Li Yong. Acoustic metasurfaces[J]. *Physics*, 2017, 46(11): 721-730.
- [3] Tang K, Qiu C, Ke M, et al. Anomalous refraction of airborne sound through ultrathin metasurfaces[J]. *Sci. Rep.*, 2014, 4: 6517.
- [4] Xie Y, Wang W, Chen H, et al. Wavefront modulation and subwavelength diffractive acoustics with an acoustic metasurface[J]. *Nat. Commun.*, 2014, 5: 5553.
- [5] Mei J, Wu Y. Controllable transmission and total reflection through an impedance-matched acoustic metasurface[J]. *New J. Phys.*, 2014, 16(12): 123007.
- [6] Yuan B G, Cheng Y, Liu X J. Conversion of sound radiation pattern via gradient acoustic metasurface with space-coiling structure[J]. *Appl. Phys. Express*, 2015, 8(2): 027301.
- [7] Li Y, Jiang X, Liang B, et al. Metascreen-based acoustic passive phased array[J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2015, 4(2): 024003.
- [8] Cheng Y, Zhou C, Yuan B G, et al. Ultra-sparse metasurface for high reflection of low-frequency sound based on artificial mie resonances[J]. *Nat. Mater.*, 2015, 14(10): 1013.
- [9] Jiang X, Li Y, Liang B, et al. Convert acoustic resonances to orbital angular momentum[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 117(3): 034301.
- [10] Jiang X, Liang B, Cheng J C, et al. Twisted acoustics: metasurface-enabled multiplexing and demultiplexing[J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(18): 1800257.
- [11] Xie Y B, Shen C, Wang W Q, et al. Acoustic holographic rendering with two-dimensional metamaterial-based passive phased array[J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6: 35437.
- [12] Zuo S Y, Wei Q, Cheng Y, et al. Mathematical operations for acoustic signals based on layered labyrinthine metasurfaces[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, 110(1): 011904.
- [13] Xie B Y, Tang K, Cheng H, et al. Coding acoustic metasurfaces[J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(6): 1603507.
- [14] Xie B Y, Cheng H, Tang K, et al. Multiband asymmetric transmission of airborne sound by coded metasurfaces[J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2017, 7(2): 024010.
- [15] Li Y, Shen C, Xie Y B, et al. Tunable asymmetric transmission via lossy acoustic metasurfaces[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2017, 119(3): 035501.
- [16] Zhang H L, Zhu Y F, Liang B, et al. Omnidirectional ventilated acoustic barrier[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, 111(20): 203502.
- [17] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [18] Li Y, Liang B, Gu Z M, et al. Reflected wavefront manipulation based on ultrathin planar acoustic metasurfaces[J]. *Sci. Rep.*, 2013, 3: 2546.
- [19] Li Y, Jiang X, Li R Q, et al. Experimental realization of full control of reflected waves with subwavelength acoustic metasurfaces[J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2014, 2(6): 064002.
- [20] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2012.
- [21] Greenfield E, Segev M, Walasik W, et al. Accelerating light beams along arbitrary convex trajectories[J]. *Phys.*

- Rev. Lett., 2011, 106(21): 213902.
- [22] Mellin S D, Nordin G P. Limits of scalar diffraction theory and an iterative angular spectrum algorithm for finite aperture diffractive optical element design[J]. Opt. Express, 2001, 8(13): 705–722.
- [23] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. Optik, 1972, 35(2): 237–250.
- [24] St-Hilaire P. Phase profiles for holographic stereograms[J]. Opt. Eng., 1995, 34(1): 83–90.
- [25] Gallagher N C, Liu B. Method for computing kinoforms that reduces image reconstruction error[J]. Appl. Opt., 1973, 12(10): 2328–2335.
- [26] Fienup J R. Iterative method applied to image reconstruction and to computer-generated holograms[J]. Opt. Eng., 1980, 19(3): 297–305.
- [27] Wyrowski F, Bryngdahl O. Iterative fourier-transform algorithm applied to computer holography[J]. J. Opt. Soc. Am. A., 1988, 5(7): 1058–1065.
- [28] Wyrowski F, Bryngdahl O. Digital holography as part of diffractive optics[J]. Rep. Prog. Phys., 1991, 54(12): 1481–1571.

◇ 声学新闻和动态 ◇

声学场景和事件的检测及分类

随着计算机听觉场景分析领域的发展,声学场景和事件的检测、分类得到了越来越多的关注。DCASE大赛(The Challenge on Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events)自2013年起举办,每届都会设置若干个专门针对声学场景和事件的检测、分类的任务,并发布了相关的音频文件库和基线系统,以期促进该领域的发展。

最近,来自芬兰坦佩雷理工大学、伦敦玛丽王后大学、法国南特中央理工大学以及英国萨里大学的研究学者们在IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing杂志上发表的Detection and classification of acoustic scenes and events: outcome of the DCASE 2016 challenge一文,针对2016年DCASE大赛的各项参赛作品的设计和性能进行了详细分析,研究发现深度学习的方法已经逐渐取代基于高斯混合模型和支持向量机的传统分类方法,成为了最热门的分类方法。而特征表示方法这些年来并没有很大的变化,主流做法仍然基于梅尔频率。本赛事的部分资料是公开的,因此对于后续的相关研究很有价值。

DCASE 2016大赛包括声学场景分类,合成音频、现实场景中的声学事件检测,以及音频标注四大项目。其中声学场景分类是一种宽泛的分类方式,目的是把来自不同声源或者位置的声音进行区分。目前广泛使用的特征有梅尔频率倒谱系数MFCC、声学事件直方图或基于时频学习的梯度直方图等。而在建模方面,除了经典的统计学模型如隐马尔科夫模型HMM、高斯混合模型GMM、支持向量机SVM以外,深度学习的方法得到越来越广泛的关注。

声学事件分类与检测则更为细致,目的是把来自相同声源的声音或者是经过相同物理过程产生的声音划为一类进行区分。在早期的研究中,人们把分类和检测混为一谈,关注点一般集中在单个孤立声音上。简单的声学场景中每个音频段只包含一个声学事件,且其中的各类声音没有混叠。目前声学事件分类检测一般是以梅尔刻度的谱特征为基础,

采用经典的HMM、非负矩阵分解NMF,或基于深度学习的方法如卷积神经网络CNN以及长短期记忆LSTM等方法进行研究。

声学场景分类和事件检测的另一大研究热点是室内声学事件的标注。我们可以给一个声音片段标注上一个或者多个标签,而不需要去详细定位事件的具体分类。这种标记方式不涉及声学事件的开始和持续时间,因此也被称为弱标记。该手段被广泛应用于音乐信号的分析处理中,但是在环境音频的标注方面尚未得到深入的研究。目前的研究方法主要有GMM,结合多示例学习的SVM,无监督特征学习以及CNN。相比于环境声信号、语音和音乐信号,室内音频信号的获取更为困难。针对这个问题,DCASE大赛专门录制了特定场景的音频数据库,虽然数据量还不是特别大,但涵盖了日常生活的大部分方面,可用于作为交叉训练和验证模型的样本。通过公开数据库,确定普适性的评价标准和过程,并设定基线工具,有利于实现不同算法的独立评估。

2013年,DCASE首届大赛只设置了声学场景分类和声学时间检测两大方向,2016年扩展为四个方向,加入更为细致的声学事件分类与检测,提出的任务更加贴近日常生活,引起更多的关注和参与度。2017年,大赛又根据该领域的最新发展及关注热点,增加了稀有事件检测和无人驾驶中的大规模弱监督声学事件检测。通过比赛任务的设置、样本库的录制以及对参赛作品的评测,可以更好地把握该方向的发展。DCASE大赛也促进了相关领域的会议增加声音分类的相关主题并提供更多的样本库,极大地推进了该方向的进步。

(余紫莹 编译自: Mesaros A, Heittola T, Benetos E, et al. Detection and classification of acoustic scenes and events: outcome of the DCASE 2016 challenge[J]. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing, 2018, 26(2): 379–393.)