



基于PT对称的声波超前/延迟线

张海啸^{1*}, 夏一宁¹, 廖丹薇², 刘昕昀², 刘小利¹, 张含³, 鲍或^{1*}

1. 常州工学院电气信息工程学院, 常州 213032;

2. 南京大学物理学院, 近代声学教育部重点实验室, 南京 210093;

3. 常州大学微电子与控制工程学院, 常州 213001

* 联系人, E-mail: zhanghx@nju.edu.cn; baoyu@czust.edu.cn

2023-09-20 收稿, 2023-10-30 修回, 2023-11-06 接受, 2023-11-07 网络版发表

国家自然科学基金(62001060, 11904035)、江苏省自然科学基金(BK20220616)、江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师项目、江苏省高等学校自然科学研究项目(23KJD140001, 22KJB140001)和常州市科技计划(CJ20220256)资助

摘要 低损耗、长带宽、时间可控的声波延迟线在音频、射频、声表面波信号处理等领域具有非常广泛的应用, 然而设计满足上述三点特性的声延迟线是一项极具挑战性的工作. 近年来, 量子力学中的宇称时间(parity-time, PT)对称概念被引入到声学系统中, 其散射矩阵在特殊点处的实数本征值揭示了声波在此类系统中可实现宽带的无损传输, 且传输相位可调. 本文设计了一种由一对PT对称的导纳超表面及夹在中间的等效声学介质组成的声学系统, 通过设置导纳超表面参数调节其工作机制, 从而实现了两类互补的特殊点. 其中防反射层模式下的特殊点导致了一种声波延迟线的形成, 而相干完美吸收-激“声”模式下的特殊点则用于设计一种罕见的声波超前线. 由于此声学损耗-增益超表面在自然界中是不存在的, 本文利用可主动控制的电热声碳纳米管薄膜来模拟它. 仿真结果表明, PT对称系统是实现低损耗、长带宽且时间可控的声波超前/延迟线的优良载体, 其应用可扩展至包括光学、力学、弹性波等诸多波动领域.

关键词 PT对称声学, 声学超表面, 碳纳米管薄膜, 声波超前/延迟线

声波延迟线是一类重要的声学器件, 在音频^[1,2]、射频^[3,4]以及声表面波传感^[5-7]等领域具有非常广泛的应用. 目前声波延迟线的设计还存在以下挑战和机遇: 首先是要尽量降低插入损耗^[8], 保证声能量的传输效率; 其次是设计具有宽带特性的声延迟线^[9], 以扩展其应用场景; 最后是设计延迟时间可调的声延迟线^[10]. 在降低损耗方面, 最近利用声学拓扑边界态无背向散射且缺陷免疫特性设计的拓扑声学延迟线得到了广泛的关注^[11], 但这种方法极大地增加了声传输材料的体积, 不利于声延迟线的小型化. 另外, 在四分之一波长谐振腔周期结构中, 腔体局域杂化共振产生的强色散会导致所谓的慢声现象^[12], 亦可用于声延迟线的设计. 近期

报道的拓扑单向波导中的慢光效应, 即周期性地加载适当定制的谐振终端, 由此产生的边缘态色散可以多次缠绕在布里渊区周围, 维持拓扑鲁棒的慢光^[11]. 此现象也为产生类似的慢声进而设计声波延迟线提供了可能性. 但上述两种方法均依赖于设计腔体的耦合谐振, 一方面很难克服其工作带宽较窄的问题. 另一方面, 受限于真实物理系统的因果律, 与声延迟线作用相反的声超前线在被动体系下是无法实现的. 因此, 如何克服此类困难并成功设计声超前线也是声波时间调控器件研究中亟待解决的热点问题.

近年来, 源于量子力学中的PT对称概念被引入到声学系统中, 其宇称作用算符 P 和时间作用算符 T 分别

引用格式: 张海啸, 夏一宁, 廖丹薇, 等. 基于PT对称的声波超前/延迟线. 科学通报, 2024, 69: 1794–1802

Zhang H X, Xia Y N, Liao D W, et al. Acoustic advance/delay line based on PT symmetry (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 1794–1802, doi: 10.1360/TB-2023-0993

定义为 $P\psi(\mathbf{r}, t) = \psi(-\mathbf{r}, t)$, $T\psi(\mathbf{r}, t) = \psi^*(\mathbf{r}, -t)$. 其中 ψ 为粒子波函数时空分布, $\mathbf{r}$ 为粒子空间位置坐标矢量, t 为时间. 对应声学系统的实现有赖于PT对称的声学材料, 包括合理空间分布的声学增益和损耗. 作为PT对称在经典波系统中的映射, 声学领域中近来涌现出了大量新的理论及物理现象^[12], 例如声单向透明^[13~15]、声隐身传感器^[16,17]、声学杂质屏蔽^[18]、反PT对称^[19]、连续^[20]和离散^[21]的等幅声波传输等. 此外, PT对称的概念被进一步引入到声学超表面中, 在深亚波长尺度上呈现出许多令人兴奋的现象, 如超表面隐身^[22]和负折射^[23]. 值得一提的是, 上述结论大多来源于PT对称系统散射矩阵的特殊点(exceptional point, EP)以及该处的对称-破缺相变, 并且上述原型中声学增益的实现多依赖于带反馈复杂电路的构建, 这无疑限制了器件的推广和应用.

最近, 一类以碳纳米管(carbon nanotube, CNT)薄膜和石墨烯为代表的、具有极高热声转换效率材料的出现, 为实现可控的空气^[24]及水下^[25]声学增益提供了可能性. 其工程应用包括电-热-声扬声器^[26,27]、光-热-声扬声器^[28,29]以及触摸屏^[30]等. 此类二维材料具有极薄的厚度(10 μm 量级), 声波穿过时表现为声透明材料, 这与典型的机电扬声器具有固有的强反射不同. 此外, CNT薄膜具有与导纳超表面一致的内在声学边界条件, 具有任意可控参数的优势进一步使其成为非厄米声学超表面的有效候选材料. 将CNT薄膜作为声学增益, 已经在诸如非厄米拓扑耳语回廊^[31]、时空调制超表面中的混合模频分复用器^[32]以及一维SSH(Su-Schrieffer-Heeger)声子晶体中的反PT对称^[33]等工作中得到应用.

本文构建了由一对损耗和增益导纳超表面及中间等效声学介质组成的PT对称声学系统, 并通过设置超表面导纳改变其工作机制, 从而实现了两类互补的散射EP点. 第一种我们称之为相干完美吸收-激“声”(coherent perfect absorber-laser, CPA-Laser)模式, 此时系统反射系数为0, 透射系数为1, 表明声能量在系统中进行无损传输, 此时透射相位为正, 故系统可被设计为之前报道较少的声超前线. 第二种为防反射层(antireflection coatings, ARCs)模式, 此时声能量亦可进行无损传输, 且透射相位为负, 对应的器件为声延迟线. 随后, 我们利用CNT薄膜完美模拟了声学导纳超表面, 并研究了当双边指数衰减包络信号分别经过两种模式系统时, 输出信号与原始信号的时域差别. 仿真结果表明, CPA-Laser模式和ARCs模式PT对称系统可分别完美实现声

超前线和声延迟线, 且超前/延迟时间由等效介质宽度和CNT薄膜参数共同控制. 此外, 等效介质的声学参数亦会对PT对称系统的时间控制效果产生影响.

与已有的声学延迟线设计方法相比, 我们的策略可实现几乎无损的声能量传输, 适用于有限带宽的声信号, 且延迟时间可调. 进一步地, 由于声学增益超表面的引入打破了被动物理系统的因果律, 由此实现了之前很少报道的声波超前线. 我们的设计方法为利用PT对称实现无损、宽带且时间可调的声波超前/延迟线提供了新的思路, 且这种方法可推广至包括光学、力学、弹性波等诸多波动领域.

1 频域相位调制实现时域信号的超前/延迟

本文选取的参考信号为双边指数衰减包络信号 $y(t) = e^{-\sigma|t|}\sin(2\pi f_0 t)$, 其时域波形图如图1(a)所示, 其中信号衰减速率 $\sigma = 40\pi \text{ s}^{-1}$, 中心频率 $f_0 = 1000 \text{ Hz}$. 对此信号做频谱分析可得其双边幅度谱为(补充材料S1)

$$|Y(f)| = \frac{\sigma}{4\pi^2(f+f_0)^2 + \sigma^2} + \frac{\sigma}{4\pi^2(f-f_0)^2 + \sigma^2}, \quad (1)$$

其包含两个相同的独立频带, 且每个频带半高宽为 $\Delta f = \sigma/\pi$, 其曲线如图1(b)所示. 原信号相位谱可表示为 $\varphi(f) = -\pi/2\text{sgn}(f)$, 其曲线如图1(c)所示. 保持信号幅度谱不变, 调控相位谱即可实现信号在时域上的超前/延迟. 图1(e)中, 信号相位谱改写为 $\varphi_a(f) = \varphi(f) + 2\pi f\tau$, 其中 $\tau = 0.1 \text{ ms}$. 将图1(b)和(e)进行傅里叶逆变换即可得到原信号的超前信号 $y_a(t) = y(t + \tau)$ (图1(d)). 类似地, 若相位谱改写为 $\varphi_d(f) = \varphi(f) - 2\pi f\tau$ (图1(g)), 将图1(b)和(g)进行傅里叶逆变换可得到延迟信号 $y_d(t) = y(t - \tau)$, 如图1(f)所示.

在实际物理系统中设计具有此功能的声移相器是本文的核心工作. 此移相器不仅在信号工作频段内具有单位传输系数, 而且相位谱与频率成正比例函数, 斜率的正负号分别对应于将原信号进行超前/延迟操作. 接下来我们将介绍一种基于PT对称的声移相器, 可满足上述设计要求.

2 基于PT对称的声移相器

我们设计的器件结构如图2(a)所示, 它由一对损耗(左, 蓝色)和增益(右, 红色)导纳超表面组成, 中间是相对质量密度 $\rho = 4$ 、相对体积模量 $\kappa = 1$ 、厚度为 d 的等效声学介质板. 通过设计互补超表面导纳值 $\pm|Y_s|$, 我们

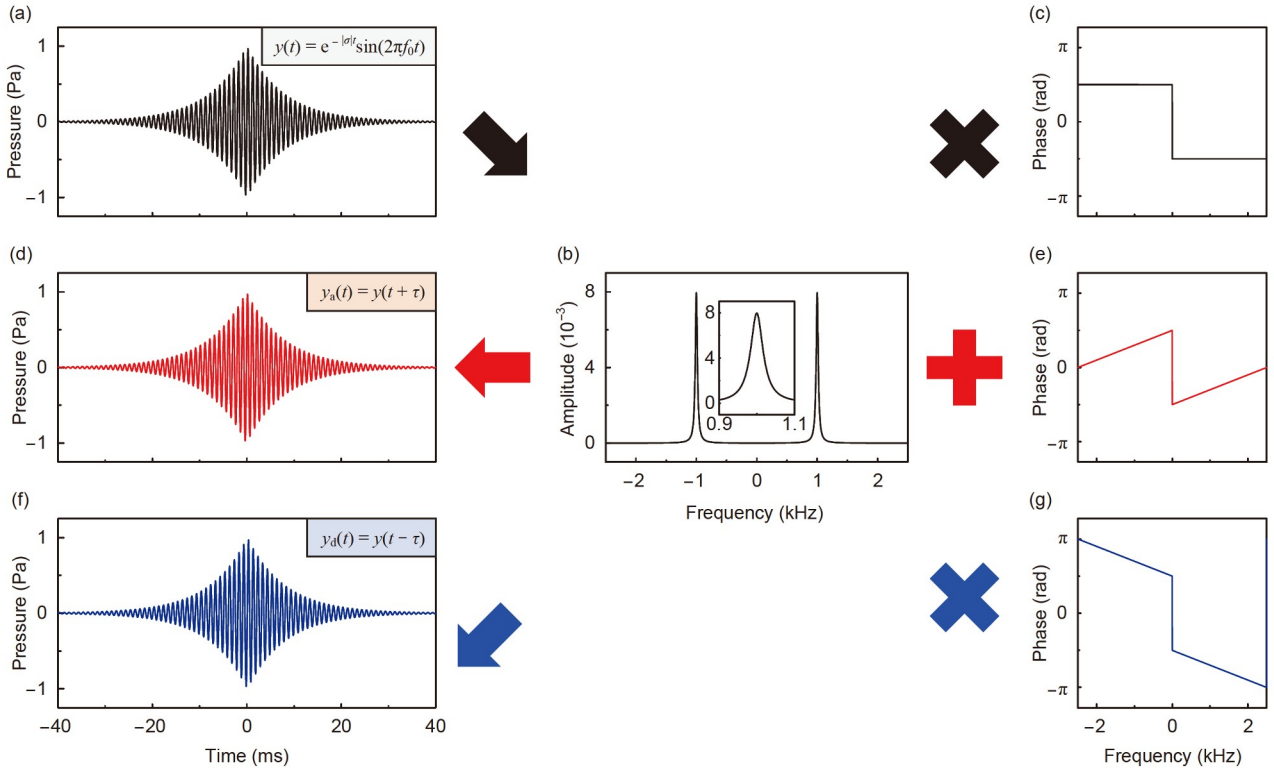


图 1 利用频域相位调制实现声信号的时域超前/延迟. (a) 参考信号 $y(t) = e^{-\sigma|t|} \sin(2\pi f_0 t)$ 时域图, 其中信号衰减速率 $\sigma = 40\pi \text{ s}^{-1}$, 中心频率 $f_0 = 1000 \text{ Hz}$. (b) 信号幅度谱, 插图为 f_0 附近的放大图. (c) 原信号相位谱 $\varphi(f) = -\pi/2 \text{sgn}(f)$. (e) 和 (g) 表示分别将 (c) 中的相位谱变为 $\varphi_a(f) = \varphi(f) + 2\pi f \tau$ 和 $\varphi_d(f) = \varphi(f) - 2\pi f \tau$ ($\tau = 0.1 \text{ ms}$). (d) 将 (b) 和 (e) 进行傅里叶逆变换可得到原信号的超前信号 $y_a(t) = y(t + \tau)$. (f) 类似地, 将 (b) 和 (g) 进行傅里叶逆变换可得到原信号的延迟信号 $y_d(t) = y(t - \tau)$

Figure 1 Realization of the advance/delay of acoustic signals in time domain by phase regulation in frequency domain. (a) Time domain diagram of the reference signal $y(t) = e^{-\sigma|t|} \sin(2\pi f_0 t)$, where the signal attenuation rate $\sigma = 40\pi \text{ s}^{-1}$ and the center frequency $f_0 = 1000 \text{ Hz}$, respectively. (b) Amplitude spectra of the signal, and the inset is a zoomed-in diagram near f_0 . (c) Phase spectra of the original signal with $\varphi(f) = -\pi/2 \text{sgn}(f)$. (e), (g) The adapted phase diagrams with $\varphi_a(f) = \varphi(f) + 2\pi f \tau$ and $\varphi_d(f) = \varphi(f) - 2\pi f \tau$ ($\tau = 0.1 \text{ ms}$), respectively. (d) The signal obtained from the inverse Fourier transform of (b) and (e), which is ahead of the original signal with $y_a(t) = y(t + \tau)$. (f) Similar to (d), the signal obtained from the inverse Fourier transform of (b) and (g) is behind the original signal with $y_d(t) = y(t - \tau)$

确定了一个典型的声学PT对称系统, 其散射矩阵可以写成 $\mathbf{S} = [t_b \ r_R; r_L \ t_b]$, 其中 r_L 和 r_R 分别表示系统的左右反射系数, 由于系统是互易的, 故双向透射系数为 t_b . 根据系统的PT对称特性 $\mathbf{S}^* = \mathbf{S}^{-1}$ [13], 可以直接得到系统的广义能量转换关系, 即 $(R_L R_R)^{1/2} = |T - 1|$, 其中 $R_L \equiv |r_L|^2$, $R_R \equiv |r_R|^2$ 和 $T \equiv |t_b|^2$ 分别表示系统左入射、右入射和双向透射的能量比. 进一步地, 散射矩阵本征值可表示为 $u_{1,2} = t_b \pm (r_L r_R)^{1/2} = t_b \{1 \pm j[(1 - T)/T]^{1/2}\}$. 当 $T < 1$ ($T > 1$) 时, 特征值是单位模(非单位模)的, 分别对应于系统的PT对称和PT对称破缺态. 系统相变发生在 $T = 1$ 时, 我们称之为EP点, 此时有 $R_L R_R = 0$, 预示着至少一侧的能量反射比为0, 即声波在此入射情况下达到完美传输.

为了获得 $T = 1$ 的散射EP点, 超表面导纳应满足

$Y_S = Y_0 \pm Y$ (补充材料S2), 其中 $Y = (\rho\kappa)^{-1/2} Y_0$ 为中间等效介质的声导纳, Y_0 为空气导纳. 值得注意的是, 超表面条件中的“ $\pm$ ”表明存在两种类型的EP点, 分别对应于超表面两类互补但不同的物理机制. 当符号为“+”时, 损耗-增益超表面表现为一对CPA-Laser, 即声能量先被损耗超表面吸收, 再由增益超表面重放, 故声波在等效介质中的能流方向与在自由空间中相反; 当符号为“-”时, 超表面表现为一对ARCs, 即声波在等效介质中的能流方向与在自由空间中一致(补充材料S3). 同时, 这两种能流模式也对应着系统两种互补的透射系数.

图2(b)给出的是系统的相图, 白色和灰色区域分别表示系统的对称相和破缺相, 可以看出系统相变点处在 $Y_S = 1.5Y_0$ 和 $Y_S = 0.5Y_0$ 上, 且此EP点与等效介质厚度

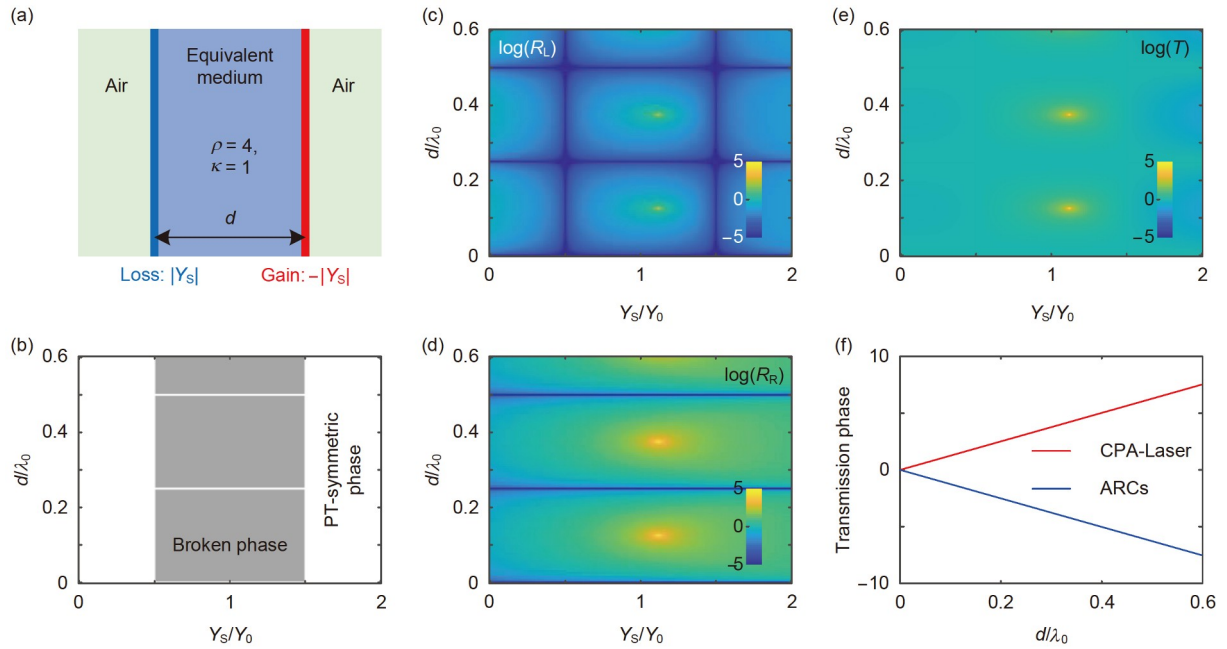


图 2 基于PT对称导纳超表面的声移相器。(a) 系统由一对PT对称且导纳分别为 $\pm|Y_S|$ 的超表面及夹在中间、宽度为 d 的等效声学介质组成, 声学介质的相对质量密度及体积模量分别为 $\rho = 4$, $\kappa = 1$ 。(b) 系统相图, 其中白色和灰色区域分别表示系统的PT对称相和破缺相。PT对称系统的左侧(c)和右侧(d)反射比以及双向透射比(e), 其自变量为 Y_S/Y_0 和 d/λ_0 。(f) 红线和蓝线分别表示 $Y_S = 1.5Y_0$ 和 $Y_S = 0.5Y_0$ 时系统透射相位关于 d/λ_0 的演化情况, 分别对应系统的CPA-Laser及ARCs模式

Figure 2 Acoustic phase shifter based on PT-symmetric admittance metasurfaces. (a) Illustration of the acoustic system composed of an equivalent medium with relative mass density $\rho = 4$, bulk modulus $k = 1$ and width d sandwiched by a pair of PT-symmetric metasurfaces with admittance $\pm|Y_S|$. (b) Phase diagram of the system. The white and gray regions denote the PT-symmetric and broken phases, respectively. Left (c), right (d) reflectance and bidirectional transmittance (e) with Y_S/Y_0 and d/λ_0 . (f) The red and blue lines denote the evolution of the transmission phase with $Y_S = 1.5Y_0$ and $Y_S = 0.5Y_0$ as a function of d/λ_0 , respectively, corresponding to the CPA-Laser and ARCs modes of the system

d 无关。图2(c)~(e)分别是系统的左侧、右侧及双向透射能量比。当 $Y = (\rho\kappa)^{-1/2}Y_0 = 0.5Y_0$ 时, $Y_S = 1.5Y_0$ 为CPA-Laser模式下的超表面导纳, $Y_S = 0.5Y_0$ 为ARCs模式下的超表面导纳, 两者均大于0, 故此时系统只存在左侧反射为0的EP点, 而不存在右侧反射为0的EP点。进一步地, EP点处的声波透射系数 $t_b = \exp(\pm ja)$, 其中 $a = kd = 2k_0d$, k 和 k_0 分别是介质板和空气中的波数。透射系数强度为1, 相位随 d/λ_0 的变化情况如图2(f)所示, 其中 λ_0 为 f_0 对应的波长, 结果表明其透射相位与声波频率成正比, 且正负斜率分别对应EP点处的CPA-Laser和ARCs模式。根据第1节的结论, 此PT对称声移相器可用于设计低损耗、长带宽的声波超前/延迟线。

此外, 我们注意到, 图2(b)中的PT破缺相中的白色水平线和图2(c), (d)中的蓝色水平线处于相同的位置, 这是由中间介质的Fabry-Perot共振引起的, 故与 Y_S 无关。其达成条件可以简单表示为 $d = m\pi/k_0(\rho)^{1/2} = m\lambda_0/4$, 其中 m 为正整数。在这种情况下, 左右反射系数均为0, 而透射系数为1, 如图2(c)~(e)所示。

此外, 我们还考察了当 $\rho = 0.04$, $\kappa = 1$ 时, 此PT对称移相器用于设计声波超前/延迟线的可能性。值得指出的是, 此时中间介质导纳 $Y = 5Y_0$, CPA-Laser模式下 $Y_S = 6Y_0$, 对应左侧透射共振EP点; ARCs模式下 $Y_S = -4Y_0$, 对应右侧透射共振EP点, 此模式在 $\rho > 1$ 时是不存在的。两种模式下的透射强度及相位响应仍满足声移相器设计要求, 详见补充材料S4。

3 利用CNT薄膜模拟PT对称的导纳超表面

上述声移相器是使用一对超薄的PT对称导纳超表面来实现的。然而, 这种理想的超表面在自然界中是不存在的, 即使是通过构建复杂的吸收/放大电路也很难实现。本文提出了一种利用CNT薄膜的电-热-声耦合效应来实现这种声学超表面的方法, 完成目标声移相器的设计。基于此, 我们分别给出了PT对称导纳超表面条件下和受控CNT薄膜条件下的全场仿真, 并与完美透射情况进行了比较。系统的CNT薄膜模型及参数选择详见补充材料S5和S6。本部分仿真取声信号频率为

$f_0 = 1000$ Hz, 左右侧空气柱长度 $l = \lambda_0 = 34.3$ cm, 中间等效介质厚度为 $d = 1.715$ cm, 仿真结果如图3所示。

图3(a)为完美透射情况, 其透射系数幅值为1, 相位为0. 导纳超表面条件下, 超表面被等效成一层极薄 ($d_s = 0.01$ cm) 的等效介质, 其等效体积模量 $\kappa_s = j2f_0 d_s / Y_s^{[34]}$, 等效质量密度 ρ_0 与空气相同. 由此, 超表面条件下 CPA-Laser 及 ARCs 模式的全场仿真结果如图3(b)和(c)的上图所示. 不难看出, 与完美透射相比, 透射波在两种模式下分别超前和滞后了 $\pi/5$. CNT 薄膜条件下的主动控制参数可写成

$$N_1 = -\frac{Y_0 \pm Y}{2Y_0}, N_2 = \frac{Y_0 \pm Y}{2Y_0} e^{\pm j\alpha}, \quad (2)$$

其中 $N_{1,2} = n_{1,2} \Phi_{1,2}$, $n_{1,2}$ 表示膜1和膜2相对于声源的声压幅值比, 而 $\Phi_{1,2}$ 表示膜1和膜2相对于声源的初始相位差. 类似地, 参数中的“ $\pm$ ”分别表示系统的 CPA-Laser 及

ARCs 模式. 图3(b)和(c)的下图分别是 CNT 薄膜条件下系统的 CPA-Laser 及 ARCs 模式的全场仿真结果, 其 CNT 薄膜主动控制参数分别为 $N_1 = -0.75$, $N_2 = 0.75 \exp(j\pi/5)$ 和 $N_1 = -0.25$, $N_2 = 0.25 \exp(-j\pi/5)$. 不出意外地, 不论是声场分布, 还是能流走向, 受控 CNT 薄膜可以完全模拟导纳超表面。

我们同样考察了 $\rho = 0.04$, $\kappa = 1$ 时的情况, 此时取中间介质厚度 $d = 17.15$ cm. 相应地, CNT 薄膜的主动控制参数在 CPA-Laser 及 ARCs 模式下分别为 $N_1 = -3$, $N_2 = 3 \exp(j\pi/5)$ 和 $N_1 = 2$, $N_2 = -2 \exp(j\pi/5)$, 其声场仍与导纳超表面条件下的声场一致. 具体仿真结果详见补充材料 S7.

4 基于 PT 对称的声波超前/延迟线

基于上述仿真结果, 我们进一步检验了此移相器是否可用作声学超前/延迟线. 图4(a)给出了双边指数衰减包络信号 $y(t-t_0) = \exp[-\sigma(t-t_0)] \sin[2\pi f_0(t-t_0)]$ 通过完美透射、CPA-Laser 模式和 ARCs 模式移相器后的时域图, 其中 $t_0 = 48$ ms, 系统左右两侧分别存在一段 $l = \lambda_0 = 34.3$ cm 的空气柱. 其 50 ms 附近的放大图如图4(b)所示, 可以看出 CPA-Laser 模式下, 传输信号比原始信号(完美透射信号)超前 0.1 ms, 而 ARCs 模式下传输信号比原始信号延迟 0.1 ms. 需要指出的是, 尽管输入信号拥有 40 Hz 的半高宽, CNT 薄膜参数仍取中心频率 f_0 对应的控制参数。

为了进一步验证结果的准确性, 我们在图4(c)中给出了三种信号的幅度谱. 很明显, CPA-Laser 模式下传输信号幅度谱与原始信号幅度谱几乎完全重合, 而 ARCs 模式下传输信号幅度谱与原始信号幅度谱只是略有差异, 也几乎完全重合. 此外, 图4(d)给出的是信号中不同频率分量经过 CPA-Laser 和 ARCs 模式 PT 对称系统后输出信号与原始信号相应频率分量的时间差. 显然在 CPA-Laser 模式下, 输出信号各频率分量相比于原始信号各频率分量超前时间为 0.1 ms, 且其在频率上几乎是平坦的; 而在 ARCs 模式下, 其相应的延迟时间为 0.1 ms, 在频率上也几乎是平坦的. 这也充分说明了此 PT 对称声波超前/延迟线的设计可靠性。

为了实现目标器件对超前/延迟时间的控制, 将中间等效介质厚度调整为 $d = 3.43$ cm, 此时 CPA-Laser 和 ARCs 模式下 CNT 薄膜的控制参数分别变为 $N_1 = -0.75$, $N_2 = 0.75 \exp(j2\pi/5)$ 和 $N_1 = -0.25$, $N_2 = 0.25 \exp(j2\pi/5)$, 仿真结果时域图如图4(e)所示. 从其 50 ms 附近的放大

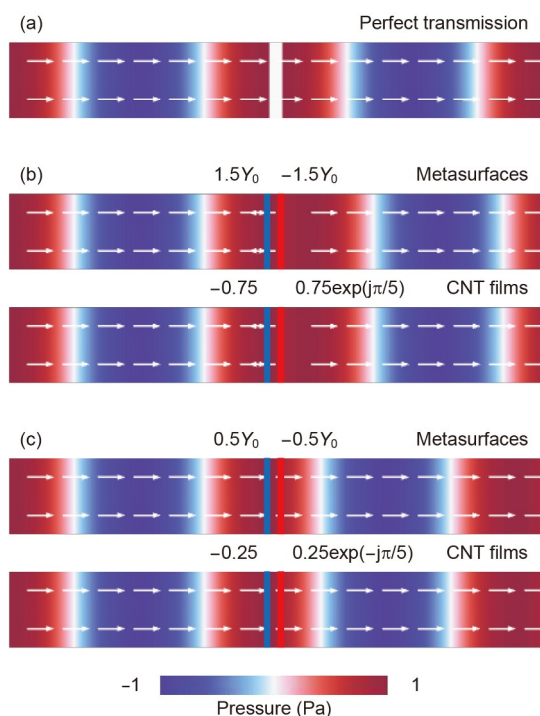


图 3 利用 CNT 薄膜模拟 PT 对称的导纳超表面 ($f_0 = 1000$ Hz). (a) 介质板参数为 $\rho = 4$, $\kappa = 1$ 时的完美透射(无障碍传输)声压场图. (b) 上下子图分别是 CPA-Laser 模式下利用导纳超表面及 CNT 薄膜得到的系统声压场图. (c) ARCs 模式下的声压场图. 白色箭头表示能流方向
Figure 3 Simulation of the PT-symmetric admittance metasurfaces using CNT films at $f_0 = 1000$ Hz. (a) Perfect transmitted (obstacle-free propagation) pressure distribution when the medium parameters are $\rho = 4$, $\kappa = 1$. (b) The top and bottom maps are the pressure distributions obtained by using admittance metasurfaces and CNT films in CPA-Laser mode, respectively. (c) Similar to (b) but in ARCs mode. The white arrows indicate the direction of energy flow

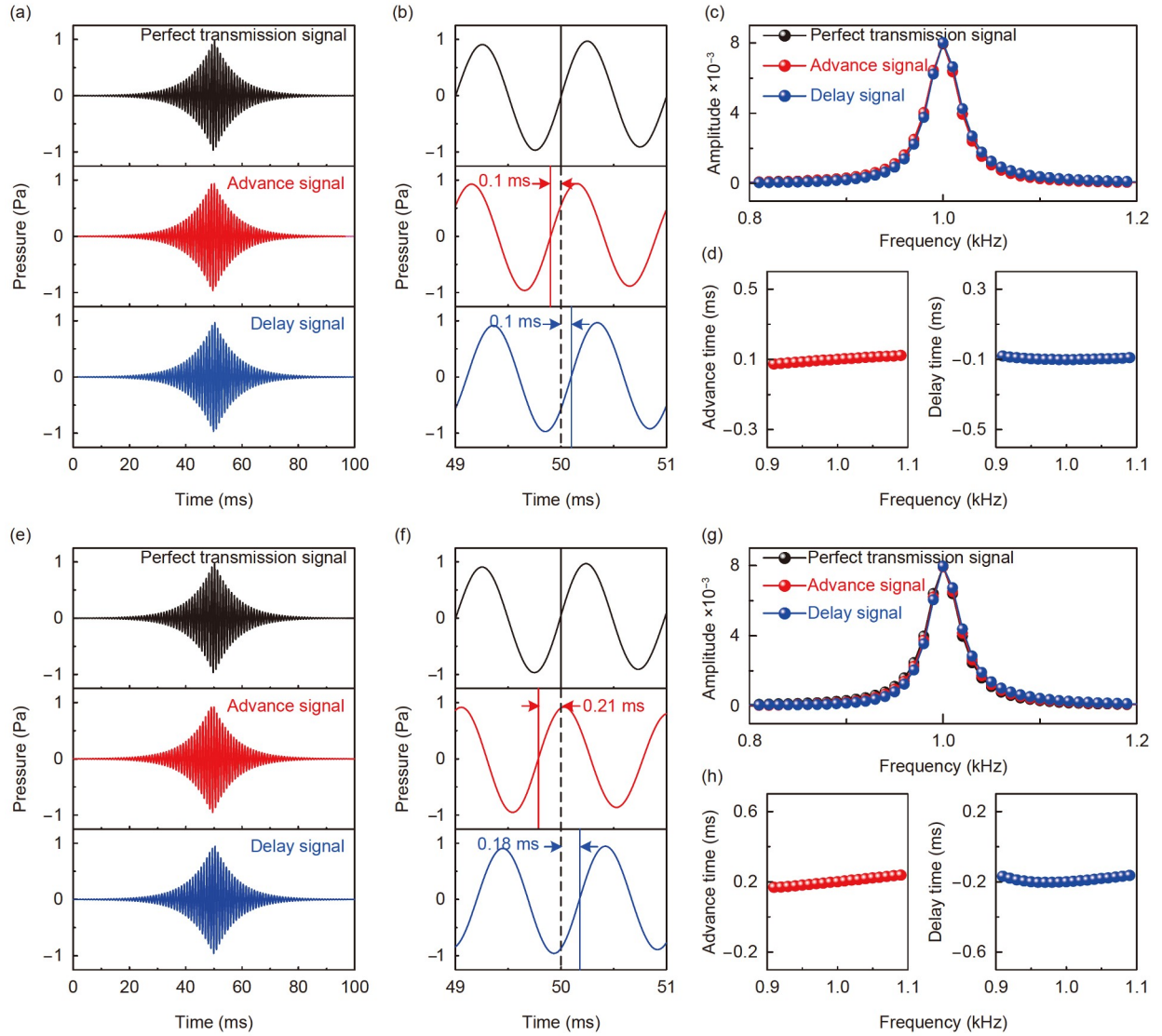


图 4 基于PT对称的声波超前/延迟线。(a) 信号经过完美透射(上)、CPA-Laser模式超前线(中)、ARCs模式延迟线(下)后的时域波形。(b) 上述三种信号在50 ms 附近(黑色竖直线)对应的放大图。(c) 黑、红、蓝三种点划线分别表示三种信号的幅度谱。(d) CPA-Laser 模式下(左)信号频带宽度内的超前时间和对应ARCs模式下(右)的延迟时间。(a)~(d)中超前/延迟时间为0.1 ms。(e)~(h)与(a)~(d)相同,但超前/延迟时间为0.2 ms

Figure 4 Acoustic advance/delay line based on PT symmetry. (a) The time domains of the signals are obtained after perfect transmission (top), CPA-Laser mode advance line (middle), and ARCs mode delay line (bottom). (b) Zoom-in of the above three signals corresponding to each other near 50 ms (black vertical lines). (c) Black, red, and blue dot lines represent the amplitude spectra of the above three signals, respectively. (d) Advance time (left) within the signal band in CPA-Laser mode and delay time (right) in ARCs mode. In (a)~(d), the advance/delay time is 0.1 ms. (e)~(h) Same as (a)~(d) with advance/delay time 0.2 ms

图4(f)中可以看出, CPA-Laser模式下, 传输信号比原始信号超前0.21 ms, 而ARCs模式下, 传输信号比原始信号延迟0.18 ms. 频域分析结果也支持了上述结论, 其中图4(g)中, 三种信号的幅度谱几乎完全重合; 图4(h)中, CPA-Laser模式下频带范围内各频点超前时间略大于0.2 ms, 而ARCs模式下各频点延迟时间略小于0.2 ms, 与时域分析结果一致. 导致这种结果的原因可能是, 当

中间介质厚度增加时, 声波在介质内无法在远小于声波中心频率周期的时间内达到稳态, 使结果出现偏差.

类似地, 当中间介质参数 $\rho = 0.04$, $\kappa = 1$ 时, 取 $d = 15.17$ cm, 则CPA-Laser模式下信号超前时间为0.12 ms, 而ARCs模式下信号延迟时间为0.09 ms. 频带范围内的超前/延迟时间分布也证实了此时声波超前/延迟线的运行效果与设计目标略有差距, 这可能是由中间介质

宽度过长引起的. 取 $d = 34.3$ cm, 此时CNT薄膜的主动控制参数在CPA-Laser及ARCs模式下分别为 $N_1 = -3$, $N_2 = 3\exp(j2\pi/5)$ 和 $N_1 = 2$, $N_2 = -2\exp(j2\pi/5)$. 此时, CPA-Laser模式下信号超前时间为0.2 ms, ARCs模式下信号延迟时间亦为0.2 ms, 这可能是由于入射声波在介质内发生了透射共振, 详见补充材料S8.

不失一般性, 我们还研究了当入射信号为高斯包络信号时器件的工作性能. 不出意外地, 此基于PT对称的声波超前/延迟线仍能保持良好的工作状态, 详见补充材料S9. 为了验证本策略在实际应用中的可能性, 中间理想等效介质被替换成实际的结构, 虽然此时无法直接通过改变介质宽度来控制超前/延迟时间, 我们仍然能通过实际结构及薄膜参数的灵活调控实现预设的超前/延迟时间, 详见补充材料S10.

5 总结

本文构建了由一对PT对称的声学超表面及夹在中

间的等效介质组成的声学系统, 并通过调控超表面导纳推导出了两类互补的散射EP点. 当超表面作为一对CPA-Laser工作时, 系统在EP点展现了零反射及单位透射, 且透射相位超前的散射特性; 当其作为一对ARCs工作时, 系统在EP点则展现了零反射及单位透射, 且透射相位滞后的散射特性. 由于自然界中声学增益超表面的缺失, 我们利用主动控制的CNT薄膜来完美模拟PT对称的导纳超表面. 进一步地, 当双边指数衰减包络信号经过CPA-Laser模式移相器时, 系统表现为一类声学超前线; 而信号经过ARCs模式移相器时, 系统表现为一类声学延迟线. 仿真结果表明, 本文设计的PT对称系统在EP点处的单位透射特性由CNT薄膜参数决定, 而超前/延迟时间由中介介质的宽度和CNT薄膜参数共同控制. 我们的策略为利用PT对称设计无损、宽带且时间可调的声波超前/延迟线提供了新的思路, 且这种方法可推广至包括光学、力学、弹性波等诸多波动领域.

参考文献

- Zhang Z, Tian Y, Cheng Y, et al. Topological acoustic delay line. *Phys Rev Appl*, 2018, 9: 034032
- Malléjac M, Sheng P, Tournat V, et al. Slow-sound-based delay-line acoustic metamaterial. *Phys Rev Appl*, 2022, 17: 044035
- Lu R C, Manzanque T, Yang Y S, et al. A radio frequency nonreciprocal network based on switched acoustic delay lines. *IEEE Trans Microwave Theor Technol*, 2019, 67: 1516–1530
- Li M H, Lu R C, Manzanque T, et al. Low phase noise RF oscillators based on thin-film lithium niobate acoustic delay lines. *J Microelectromech Syst*, 2020, 29: 129–131
- Anisimkin V I, Penza M, Valentini A, et al. Detection of combustible gases by means of a ZnO-on-Si surface acoustic wave (SAW) delay line. *Sens Actuat B-Chem*, 1995, 23: 197–201
- Topaltzikis D, Wielunski M, Hörner A L, et al. Detection of X-rays by a surface acoustic delay line in contact with a diamond crystal. *Appl Phys Lett*, 2021, 118: 133501
- Jesus R C O, Carvalho E A N, Tamarin O, et al. Equivalent circuit models for SAW delay line sensors. *IEEE Sens J*, 2022, 22: 11810–11818
- Shao S, Luo Z F, Lu Y, et al. Low loss $\text{Al}_{0.7}\text{Sc}_{0.3}\text{N}$ thin film acoustic delay lines. *IEEE Electron Device Lett*, 2022, 43: 647–650
- Manzanque T, Lu R C, Yang Y S, et al. Low-loss and wideband acoustic delay lines. *IEEE Trans Microwave Theor Technol*, 2019, 67: 1379–1391
- Yin R C, Yu S Y, He C, et al. Bulk acoustic wave delay line in acoustic superlattice. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 092905
- Mann S A, Alù A. Broadband topological slow light through brillouin zone winding. *Phys Rev Lett*, 2021, 127: 123601
- Gu Z M, Guo J M, Zhu J. Progress on the novel states in non-Hermitian topological acoustics (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 3428–3436 [顾仲明, 郭佳敏, 祝捷. 非厄米拓扑声学中新奇物态的研究进展. 科学通报, 2023, 68: 3428–3436]
- Zhu X, Ramezani H, Shi C, et al. PT-symmetric acoustics. *Phys Rev X*, 2014, 4: 031042
- Aurégan Y, Pagneux V. PT-symmetric scattering in flow duct acoustics. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 174301
- Zhang H X, Xiong W, Cheng Y, et al. One-dimensional PT-symmetric acoustic heterostructure. *Chin Phys B*, 2022, 31: 124301
- Fleury R, Sounas D, Alù A. An invisible acoustic sensor based on parity-time symmetry. *Nat Commun*, 2015, 6: 5905
- Fleury R, Sounas D L, Alu A. Parity-time symmetry in acoustics: Theory, devices, and potential applications. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2016, 22: 121–129
- Zhang H X, Zhang Y W, Liu X L, et al. Acoustic impurity shielding induced by a pair of metasurfaces respecting PT symmetry. *Phys Rev B*, 2022, 106: 094101
- Hu T, Wei Q, Zhu X F, et al. Acoustic anti-parity-time symmetric structure enabling equivalent lasing and coherent perfect absorption. *Phys Rev B*, 2021, 104: 134110

- 20 Rivet E, Brandstötter A, Makris K G, et al. Constant-pressure sound waves in non-Hermitian disordered media. *Nat Phys*, 2018, 14: 942–947
- 21 Zhang H, Zhang Y, Liu X, et al. Step-wise constant-amplitude waves in non-Hermitian disordered media. *AIP Adv*, 2022, 12: 065217
- 22 Li H, Rosendo-López M, Zhu Y, et al. Ultrathin acoustic parity-time symmetric metasurface cloak. *Research*, 2019, 2019: 8345683
- 23 Lan J, Zhang X W, Wang L W, et al. Bidirectional acoustic negative refraction based on a pair of metasurfaces with both local and global PT-symmetries. *Sci Rep*, 2020, 10: 10794
- 24 Xiao L, Chen Z, Feng C, et al. Flexible, stretchable, transparent carbon nanotube thin film loudspeakers. *Nano Lett*, 2008, 8: 4539–4545
- 25 Aliev A E, Lima M D, Fang S L, et al. Underwater sound generation using carbon nanotube projectors. *Nano Lett*, 2010, 10: 2374–2380
- 26 Suk J W, Kirk K, Hao Y, et al. Thermoacoustic sound generation from monolayer graphene for transparent and flexible sound sources. *Adv Mater*, 2012, 24: 6342–6347
- 27 Barnard A R, Jenkins D M, Brungart T A, et al. Feasibility of a high-powered carbon nanotube thin-film loudspeaker. *J Acoust Soc Am*, 2013, 134: EL276–EL281
- 28 Tian Y C, Tian H, Wu Y L, et al. Coherent generation of photo-thermo-acoustic wave from graphene sheets. *Sci Rep*, 2015, 5: 10582
- 29 Tao L Q, Liu Y, Ju Z Y, et al. A flexible 360-degree thermal sound source based on laser induced graphene. *Nanomaterials*, 2016, 6: 112
- 30 Jiang K L, Wang J P, Li Q Q, et al. Superaligned carbon nanotube arrays, films, and yarns: A road to applications. *Adv Mater*, 2011, 23: 1154–1161
- 31 Hu B, Zhang Z, Zhang H, et al. Non-Hermitian topological whispering gallery. *Nature*, 2021, 597: 655–659
- 32 Jia Y R, Liu Y M, Hu B L, et al. Orbital angular momentum multiplexing in space-time thermoacoustic metasurfaces. *Adv Mater*, 2022, 34: 2202026
- 33 Hu B, Zhang Z, Yue Z, et al. Anti-parity-time symmetry in a Su-schrieffer-heeger sonic lattice. *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 066601
- 34 Luo J, Li J, Lai Y. Electromagnetic impurity-immunity induced by parity-time symmetry. *Phys Rev X*, 2018, 8: 031035

补充材料

- S1 双边指数衰减包络信号的时域演化
- S2 基于传递矩阵的系统散射矩阵推导
- S3 两类EP点处超表面模式的命名
- S4 基于PT对称的声移相器($\rho = 0.04, \kappa = 1$)
- S5 利用CNT薄膜实现两类互补的EP点
- S6 系统仿真CNT薄膜参数的选取
- S7 利用CNT薄膜模拟PT对称的导纳超表面($\rho = 0.04, \kappa = 1$)
- S8 基于PT对称的声波超前/延迟线($\rho = 0.04, \kappa = 1$)
- S9 高斯包络信号入射下基于PT对称的声波超前/延迟线
- S10 基于PT对称的声波超前/延迟线的实验设计
- 图S1 声场分析示意图
- 图S2 基于PT对称的声移相器
- 图S3 利用CNT薄膜实现目标EP点原理图
- 图S4 利用CNT薄膜模拟PT对称的导纳超表面
- 图S5 基于PT对称的声波超前/延迟线(介质等效参数为 $\rho = 0.04, \kappa = 1$)
- 图S6 高斯包络信号入射下基于PT对称的声波超前/延迟线
- 图S7 中间介质为实际结构时利用CNT薄膜模拟导纳超表面($f_0 = 1000$ Hz)
- 图S8 中间介质为实际结构时的声波超前/延迟线

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “基于PT对称的声波超前/延迟线”

Acoustic advance/delay line based on PT symmetry

Haixiao Zhang^{1*}, Yining Xia¹, Danwei Liao², Xinyun Liu², Xiaoli Liu¹, Han Zhang³ & Yu Bao^{1*}¹ School of Electrical and Information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China;² School of Physics, MOE Key Laboratory of Modern Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093, China;³ School of Microelectronics and Control Engineering, Changzhou University, Changzhou 213001, China* Corresponding authors, E-mail zhanghx@nju.edu.cn; baoyu@czust.edu.cn

As a kind of essential acoustic engineering device, acoustic delay lines are widely used in the fields of audio, radio frequency and surface acoustic wave signal processing. Their main design goals include low insertion loss, wide operating bandwidth, and controllable delay time. In the audio band, topological acoustic delay lines designed using topological boundary states with no backscattering and defect immunity can solve the problem of low loss and time control, however the operating band is narrow and the device volume is excessive. In addition, recently reported slow optical effects in topological unidirectional waveguides also open the possibility of using slow acoustic effects for the design of acoustic delay lines. On the other hand, due to the causal law of real physical systems, acoustic advance lines with opposite effects to acoustic delay lines cannot be realized in passive systems. How to overcome such difficulties and successfully design acoustic advance lines is also a hot issue to be addressed in the study of acoustic time control devices.

In this paper, we construct a PT-symmetric acoustic system consisting of a pair of loss and gain admittance metasurfaces and an intermediate acoustically equivalent medium, and tune its operation mechanism by setting the metasurface admittances such that two complementary scattered EP points are realized. The first is called the coherent perfect absorption-laser (CPA-Laser) mode, where the reflection coefficient of the system is 0 and the transmission coefficient is 1, indicating that the sound energy is transmitted lossless in the system, and the transmission phase is positive, so the system can be designed as the previously reported acoustic advance line. The second is the antireflections (ARCs) mode, in which the sound energy can be transmitted lossless, the transmission phase is negative, and the corresponding device is the acoustic delay line. We then use the carbon nanotube (CNT) films to fully model the acoustic admittance metasurfaces, and study the time-domain difference between the output signal and the original signal as the two-sided exponential attenuation envelope signal passes through both modes. The simulation results show that both the CPA-Laser mode and the ARCs mode PT-symmetric systems can perfectly implement the acoustic advance and delay lines, respectively, with the advance/delay time is controlled by the equivalent medium width and CNT film parameters.

In general, we have innovatively implemented PT-symmetric acoustic advance/delay lines in this work, which have negligible transmission loss, are suitable for bandwidth acoustic signals, and the advance/delay time is adjustable. Our design approach provides a novel idea for realizing lossless, wide-band and time-adjustable acoustic advance/delay lines using PT symmetry, and we believe that this approach can be extended to various wave fields including optics, mechanics, elastic waves, etc.

PT-symmetric acoustics, acoustic metasurface, CNT film, acoustic advance/delay linedoi: [10.1360/TB-2023-0993](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0993)