

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413046

基于声学超材料的串扰抑制与多通道 Lamb 波通信*

华佳东¹, 崔春¹, 林京¹, 张晗²

(1 北京航空航天大学可靠性与系统工程学院 北京 100191; 2. 中国计量科学研究院 北京 100029)

摘要: 传感器阵列常用于机械设备的状态监测,但在密闭金属外壳中,传统无线通信受电磁屏蔽限制难以实现有效传输。超声波因能够穿透金属结构,作为信息载体传输信息具有重要的应用前景。多通道同步传输可以提高通信效率,但信号串扰是亟待解决的难题。为此,提出一种基于声学超材料的通道串扰抑制技术,通过 Lamb 波频散曲线的带隙效应来阻止声波在通道间的传播。通过数值模拟设计超材料结构并确定带隙范围,然后通过实验验证串扰抑制的有效性。研究实现了三通道独立通信,显著降低了跨通道串扰,同时保证了信号解码的高精度,能够满足封闭金属结构的通信需求。这一研究为解决多通道超声通信的串扰问题提供了一种新颖且有效的方法。

关键词: 超声 Lamb 波; 声学超材料; 多通道通信; 信号串扰抑制

中图分类号: TB34 TN92 TH140 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5

Crosstalk suppression and multi-channel Lamb wave communication based on acoustic metamaterials

Hua Jiadong¹, Cui Chun¹, Lin Jing¹, Zhang Han²

(1. School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: Sensor arrays are commonly used for condition monitoring in mechanical equipment. However, traditional wireless communication faces challenges in closed metal enclosures due to electromagnetic shielding, making effective transmission difficult. Ultrasonic waves, capable of penetrating metal structures, show significant potential as carriers for information transmission. While multi-channel synchronous transmission can enhance communication efficiency, signal crosstalk remains a pressing issue. To address this, this paper proposes a crosstalk suppression technique based on acoustic metamaterials. By utilizing the bandgap effect of Lamb wave dispersion curves, the method blocks the propagation of sound waves between channels. The metamaterial structure is designed through numerical simulation to determine the bandgap range, and experiments are conducted to verify the effectiveness of crosstalk suppression. The study successfully achieves independent communication across three channels, significantly reduces inter-channel crosstalk, and ensures high decoding accuracy, thereby meeting the communication requirements in closed metal structures. This research provides a novel and effective solution to the crosstalk issue in multi-channel ultrasonic communication.

Keywords: ultrasonic Lamb wave; acoustic metamaterial; multichannel communication; signal crosstalk suppression

0 引言

在结构健康监测 (structural health monitoring, SHM) 系统中实现数字数据通信有着重要意义。SHM 系统中,传感器节点布置在关键测量点,实时记录设备的温度、压

力、振动等状态信息,分析系统运行状态,进行健康预测^[1-4],该过程需从不同测点传输数据。在现代工业中,特别是航空航天^[5]、军工制造和生物制品等领域,对设备实时监测和数据传输的需求尤为突出。在这些领域中,会频繁使用密闭的金属壳体结构(如飞机机身、发动机外壳、潜艇壳体、真空容器等),这些结构通常由高强度的金

收稿日期:2024-07-12 Received Date: 2024-07-12

* 基金项目:可靠性与环境工程技术重点实验室基金(6142004220301)、国家自然科学基金(52175073,52405606)项目资助

属材料制成,用以承受外部大气压、振动和温湿度变化等严苛工况^[6-8]。此外,制造领域中的上述设备常处于极端环境下运行,且要求设备具备高可靠性、精确性及稳定性。为了确保设备的可靠性,必须对设备的健康状态进行实时监测,传感器往往安装在密闭金属结构内部的设备上。因此,需要一种能够穿透金属结构的通信方式,将内部设备的状态信息传输到外部监测系统中,且不破坏结构的完整性和密封性。传统的数据通信方式主要包括有线电缆通信和无线电磁通信;然而使用有线通信需要穿孔布线,会影响结构的完整性和封闭性,与箱体的高密闭性的需求相悖;电磁波无线通信则受限于金属结构的屏蔽效应^[9],难以穿透金属。除此之外,当数据无线传输应用于制造领域大功率设备时,会产生高电磁噪声区域,影响数据传输。因此两种方法均不可行。超声通信是无线通信技术之一,利用超声波作为信息载体并将金属结构作为声波传播介质,由于声波的强穿透性,可用于密闭金属的穿透式通信。

Lamb 波是板结构中传播的超声导波,可以在两个平行的自由表面(如板的上下表面)之间进行传播,传输距离长且衰减较小^[10],可以沿曲面传播^[11],并且不会受电磁干扰,对工作环境适应性强,可靠性高。因此,使用 Lamb 波进行超声通信具有广阔的应用前景。

许多研究人员已经对金属封闭屏障的单通道超声 Lamb 波通信方法进行了研究,证明了这一方法的可行性^[12-14]。虽然单通道超声通信方法已经取得了较多的研究成果,多通道同步传输以及通信效率的成倍提升仍是该领域的关键目标。然而,通道之间的信息相互串扰是多通道超声通信技术的主要难题,不同的发射传感器激发的超声 Lamb 波在传播过程中会相互叠加,造成通道串扰,导致传输信息的错误识别与解读^[15]。

为了解决多通道串扰问题,Lawry 等^[16]通过增加滤波器来降低数据传输模块所接收到的串扰电压,并使用频分复用(frequency division multiplexing, FDM)避免串扰频率及其谐波。Tzou 等^[17]使用具有互质周期的比特序列来分离不同信道的串扰效应,该方法可以确定来自多个信道的串扰分量,并减少在多通道系统中表征串扰效应所需的时间。Xiao 等^[18]对传统的多通道均衡方法进行改进,提出了一种多通道自适应均衡方法,该方法在解决多通道码间串扰问题的基础上可以进一步抑制多信道间的耦合串扰。综上,目前对于串扰问题的解决方案大多依靠复杂的数据处理算法^[19-20],信息解码过程较为繁琐,难以满足工程实际应用中的实时性要求。

为了进一步降低串扰和扩展多通道机械通信系统的设计空间,与数据处理策略不同,本文创新性地提出了一种基于声学超材料的通道串扰抑制技术,采用周期性声学超材料结构来改变金属屏障中的 Lamb 波传播特性。

超材料是具有弹性波带隙的人造周期性复合材料或结构^[21],具有一些特殊的物理特性,包括有效负参数、带隙、负折射率等。超材料扩展了现有材料的声学特性,其特殊的物理性质引起了大量研究人员的关注,并在工程应用中取得了巨大进展^[22]。近年来,超材料在超声 Lamb 波波场操纵方面得到了广泛的应用,例如:以非常规方式控制 Lamb 波的传输和反射^[23-26],以高转换效率实现 Lamb 波不同模态的转换^[27-30],增强 Lamb 波换能器的激发和传感效率^[31-32],以及实现声波能量的收集和吸收^[33-37]。

鉴于此,本文在多通道通信系统中引入周期性声学超材料结构来改变密闭金属屏障中的 Lamb 波传播特性,实现了超材料区域声波能量的有效抑制,进而减少相邻通道间 Lamb 波的相互串扰,并采用幅值调制方法对通信载波进行调制,对接收信号进行了基于稀疏分解的信息解码。相比于传统依赖复杂信号处理算法的解决方案,本文提出的方法从结构层面有效抑制了通道串扰,不仅避免了复杂的信号处理,而且简化了信号解码,提高了系统的实时性和通信效率。同时,本文设计了一种可调谐的超材料结构,通过调整晶胞的几何参数,可以实现不同频段的多通道通信。超材料晶胞的耦合粘贴是可逆的,不需要对金属结构进行永久性改动。因此,该技术在需要时可以移除或替换,不影响密闭金属结构的整体性能。此外,超材料的使用范围灵活,晶胞的几何设计可根据具体工程需求进行调整,以适应不同的金属结构和不同频率的通信要求。本文提出的方法可以在通道串扰抑制的情况下实现多通道同时传输信息以及解读信息,为多通道 Lamb 波通信提供了新的设计思路。

1 多通道通信系统理论研究

1.1 基于声学超材料的多通道 Lamb 波通信系统

论文提出的基于声学超材料的多通道 Lamb 波通信系统示意图如图 1 所示,以三通道为例,每个通道需要一组发射-接收传感器,传感器分别粘合在金属屏障的内外两侧。通过对发射传感器施加电压,产生弹性 Lamb 波, Lamb 波传播到对侧的接收传感器,从而产生输出电压。基于该图的通信流程如下:首先利用 ASK(amplitude shift keying, ASK)调幅技术将需要传递的二进制信息调制成适合超声传输的载波信号,然后利用 PZT 发射传感器在金属板上激发 Lamb 波, Lamb 波在结构中传播后被 PZT 接收传感器采集。最后,对接收 Lamb 波信号进行稀疏分解和信息解码,重构出发射二进制编码的每一位信息。该系统中,相邻通道之间都布置了一块超材料区域来阻碍 Lamb 波的传播,从而避免通道之间的信号串扰。

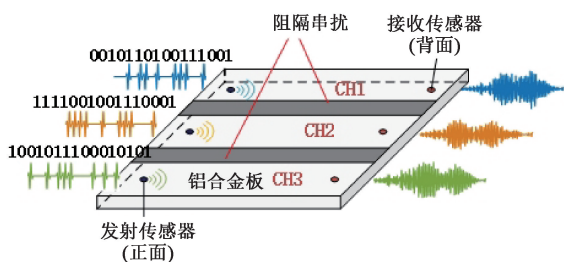


图 1 多通道 Lamb 波通信系统

Fig. 1 Schematic diagram of multichannel Lamb wave communication system

1.2 基于稀疏分解的通信系统解码

通信系统主要包括调制和解调。二进制幅移键控 (ASK)、频移键控 (frequency shift keying, FSK) 和相移键控 (phase shift keying, PSK) 是常见的调制策略。在多通道 Lamb 波通信系统中,由于 Lamb 波传播过程能量衰减减小,信道条件较为稳定。ASK 调制通过调节信号幅值来传递二进制信息,简化了调制和解调过程,尤其在硬件资源有限的条件下,能够实现高效的通信。同时,ASK 具有较低的计算复杂度^[38],调制产生的二进制信号具有明确的幅值稀疏特征,使其能够与稀疏分解的解码方法相互匹配。因此选用 ASK 调制方法,采用 Toneburst 信号进行调制。Toneburst 信号 $b(t)$ 、 N 位的二进制编码 $\mathbf{a}[N]$ 和调制结果可以表示为:

$$b(t) = \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi ft}{n_c}\right) \right] \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

$$\mathbf{a}[N] = [a_0, a_1, \dots, a_n, \dots, a_{N-1}] \quad a_n \in \{1, 0\} \quad (2)$$

$$s(t) = b(t) * \sum_{n=0}^{N-1} [a_n \delta(t - nn_c T)] \quad (3)$$

其中, Toneburst 是汉宁窗调制的 n 周期正弦波,中心频率 f ,周期 $T=1/f$;式(3)表明 ASK 调制为 Toneburst 信号与狄拉克函数的卷积运算,脉冲函数出现在编码 $a_n=1$ 的对应位置。

接下来,将多组调制结果同时输入多通道通信系统(图 1)的各个发射传感器,由于超材料区域的通道分割和串扰抑制,各通道接收传感器采集到的 Lamb 波信号仅来源于各自的激励源。以第 i 个通道为例,接收信号的时域和频域形式可表示为:

$$r_i(t) = s_i(t) * h_i(t) = [b(t) * h_i(t)] * \sum_{n=0}^{N-1} [a_n \delta(t - nn_c T)] \quad (4)$$

$$R_i(\omega) = S_i(\omega) H_i(\omega) \quad (5)$$

其中, $H_i(\omega)$ 为第 i 个通道声波传播系统的传递函数。

接收信号 $r(t)$ 是一系列波形成分 $b(t) * h_i(t)$ 的线

性叠加,波形成分的数量等于二进制编码 $\mathbf{a}[N]$ 中“1”的数量。波形的相互叠加导致直接的解码异常困难,为此,本文提出了基于稀疏分解的成分解耦和信息解码,利用稀疏算法将 $r(t)$ 分解为不同时间位置的 $b(t) * h_i(t)$,并根据各波形成分的出现时刻定位出编码“1”的出现位置,其余位置即为编码“0”。

实施稀疏分解算法的关键在于设计过完备字典,构成字典的原子需尽可能的逼近信号结构。基于信号 $r(t)$ 是 $b(t) * h_i(t)$ 线性叠加的特点,本文的原子设计为 $d(t) = b(t) * h_i(t)$,通过第 i 个通道单独发射 Toneburst 信号 $b(t)$ 并采集相对应的接收信号来获取 $d(t)$ 。进一步,通过 $d(t)$ 的等间距时间域平移来构建字典 $\mathbf{D}$,时移值 Δt 与发射数字信号“1”和“0”的时间间隔一致。因此,字典 $\mathbf{D}$ 可表示为:

$$\mathbf{D} = [d(t), d(t - \Delta t), d(t - 2\Delta t), \dots, d(t - N\Delta t)] \quad (6)$$

其中, N 代表发射二进制编码的位数。

采集各通道信号 $r(t)$ 并设计字典 $\mathbf{D}$ 后, i 通道的稀疏分解和信号解调可以表示为:

$$\min_{\mathbf{a}} \frac{1}{2} \|\mathbf{r} - \mathbf{D}\mathbf{a}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{a}\|_1 \quad (7)$$

其中, λ 为优化算法中的正则化参数, $\mathbf{a}$ 为待求解的系数。通过最优化算法求解出系数 $\mathbf{a}$ 后,设定阈值,小于阈值的系数视为 0,大于阈值的系数视为 1^[39]。通过该解调过程,将接收到的信号振幅变化转换回二进制数字信息。

2 数值计算与仿真分析

2.1 带隙超材料的设计

为了抑制多通道 Lamb 波通信中的串扰,本文首先基于带隙效应设计超材料的单元结构,并通过仿真计算出对应的带隙范围。基于局部共振 (local resonance, LR) 机制,当 Lamb 波频率接近谐振器的固有频率时,声波无法通过该结构,即 Lamb 波频散曲线不会分布在相应的频率范围,形成传播带隙。带隙效应能够阻止特定频率范围内的声波传播,因此通过合理设计超材料结构,可以有效减少通道间的声波干扰,从而实现多通道的独立通信。

将 3D 打印的超材料晶胞粘贴在金属结构上,以改变 Lamb 波的传播特性,达到减少信号串扰的效果。设计的核心目标是通过超材料晶胞的特定几何结构,抑制相邻通信通道间的声波相互干扰。设计的单元晶胞示意图如图 2(a) 所示,晶胞材料选用 PA6 加纤尼龙 (密度: 1 010 kg/m³, 杨氏模量: 6 585 MPa, 泊松比: 0.4), 其结构由基板 (厚度: h_1) 和圆柱 (直径: d , 高度: h) 构成,并粘贴

在厚度为 h_2 的金属结构(本文选用铝板)上。本文选用铝板的原因在于其广泛用于制备密闭金属屏障。图2(a)中的以下几何参数保持不变: $d = 5 \text{ mm}$ 、 $h_1 = 1 \text{ mm}$ 和 $h_2 = 2 \text{ mm}$, 本研究通过仅改变圆柱体高度 h 来定向调节 Lamb 波传播特性。

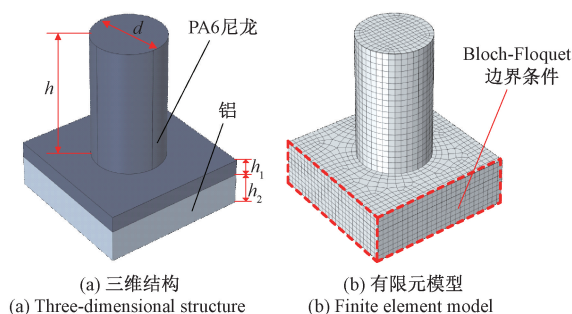


图2 超材料单元结构

Fig. 2 Metamaterial unit cell structure

为了建立圆柱体高度 h 与 Lamb 波传播特性之间的关系,本文使用 COMSOL Multiphysics 有限元软件进行有限元数值计算。图2(b)展示了晶胞的有限元模型及其 Bloch-Floquet 边界条件。利用 Bloch-Floquet 边界条件,可以通过单个周期性单元代表整个结构,进而计算出频率-波数曲线。仿真过程中,通过对图2(b)中布里渊区中的 ΓX 方向波矢进行参数化扫描,并计算各波数值处的特征频率,得到不同圆柱体高度下的频率-波数曲线。

图3展示了不同高度 h (7、8、9 mm) 的晶胞对应的带隙分布。当 $h = 7 \text{ mm}$ 时,带隙范围位于 $83 \sim 89 \text{ kHz}$; $h = 8 \text{ mm}$ 时,带隙位于 $73 \sim 80 \text{ kHz}$; $h = 9 \text{ mm}$ 时,带隙位于 $65 \sim 70 \text{ kHz}$ 。结果表明,超材料带隙的范围取决于两种材料的用量比或高度比,随着尼龙圆柱高度的增加,超材料的带隙向低频方向移动。因此,通过调节晶胞的高度 h ,可以定向调节带隙的频率范围,可以使带隙覆盖到通信载波的频率范围,达到最佳的阻挡效果。例如,当晶胞高度为 8 mm 时,带隙位于 $73 \sim 80 \text{ kHz}$,恰好能够阻断通信系统中使用的 78 kHz 载波频率,进而有效抑制串扰,提升多通道通信质量。

2.2 等效应力响应分析

对单元胞链进行瞬态动力学分析,可以验证带隙效应对应于超声波的抑制作用。选取 $h = 8 \text{ mm}$ 的单元晶体,构建了包含 10×1 个单元格阵列的链模型。图4(a)给出了铝条及超材料的模型结构。激发点设置在距离超材料结构 45 mm 处,用于产生不同频率的 Lamb 波信号。仿真过程中,只需要保证激发点和接收点位于超材料两侧,保障波形充分经过超材料区域即可,以便充分利用超材料全局区域的带隙效应。激发点的具体位置对于通信质量没有明显的影响。此外,在铝条的两端设置了低反射

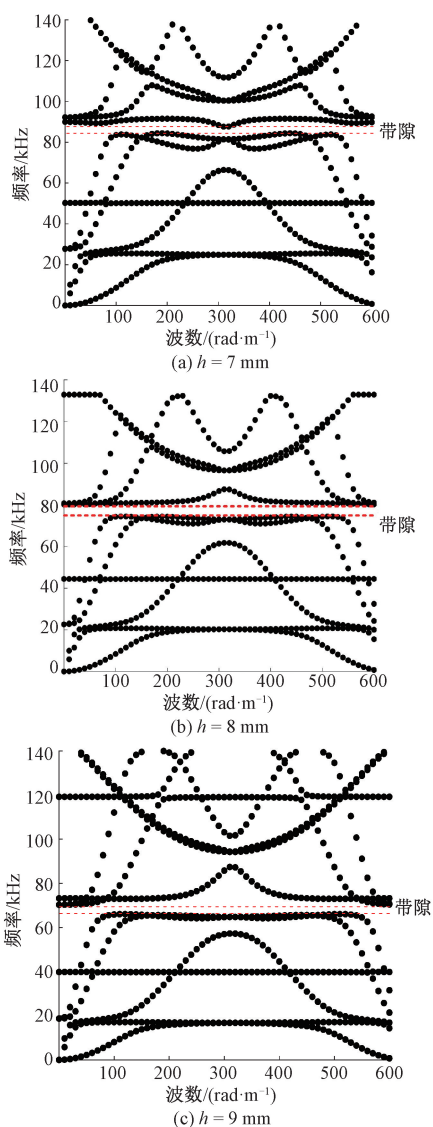


图3 不同高度晶胞的带隙分布

Fig. 3 Bandgap distribution map of unit cells with different heights

边界区域来吸收边界反射,以减少反射波的干扰。在激发点施加不同频率的正弦激励(频率 78 kHz 在带隙范围内,频率 50 和 100 kHz 在带隙范围外),观察传感接收点在不同激励频率下沿 z 方向的面内位移和等效应力响应。理论上,带隙范围内激励频率的声波不能通过超材料区域,铝条右侧不会产生振动响应。

图4(b)给出了模型结构在不同频率(50 、 78 、 100 kHz)下的等效应力响应结果。当使用 50 和 100 kHz 的弹性波激励时,铝条右端均出现了明显的应力响应;当使用 78 kHz 激励时,铝条右端并没有出现明显的振动。结果表明,带隙外的弹性波可以正常通过超材料区域继续传播,而带隙内的频率分量将被抑制和滤除。值得注意的是,频散曲线中给出的带隙效应

是用模态分析计算的,Bloch-Floquet 边界条件模拟了由无限个单元晶胞构成的超材料,在实际应用中难以满足。本文选择了多个单元胞,可以将有限单元胞结构的带隙效应推向并逼近无限超材料结构,但考虑到有限仿真计算量及实际应用的区域限制,因此折中选择了 10 个单元格。

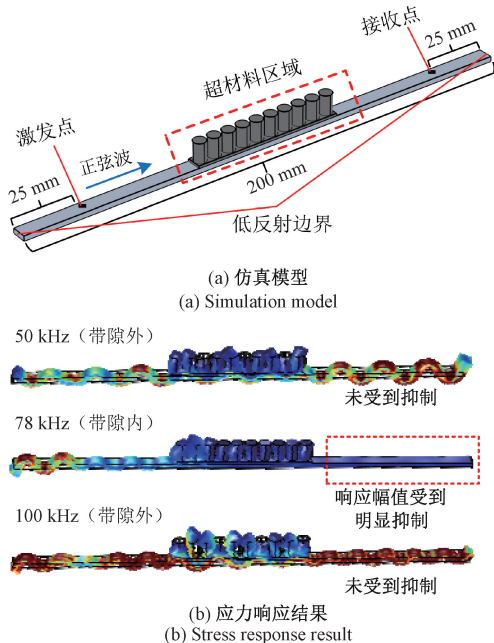


图 4 瞬态动力学分析仿真模型及应力结果

Fig. 4 Transient dynamics analysis simulation model and stress result

2.3 二维板结构的仿真验证

在超材料结构的带隙理论研究基础之上,进一步开展了二维板结构的仿真计算,研究超材料在不同区域对声波传播的影响,评估其对 Lamb 波能量的衰减效果。结构布局如图 5(a) 所示,其中 PZT#2 位于铝板的正面,上侧布置了超材料,下侧没有布置超材料,PZT#4 和 PZT#6 位于铝板的背面。仿真过程中,在 PZT#2 处施加 10 周期的 78 kHz 正弦 Lamb 波激励,Lamb 波传播后形成的波场分布如图 5(a) 所示。从图中可以看出,超材料下侧区域的波场正常向四周扩散传播,而上侧区域的 Lamb 波振动幅度受到了明显的抑制,表明声波能量经过超材料区域后发生了大幅衰减。进一步采集 PZT#4、PZT#6 处的波形进行定量分析,其时域信号如图 5(b) 所示,为了清晰对比,PZT#4 和 PZT#6 接收的波形分别用实线和虚线表示。通过对比可以看出 PZT#6 处的 Lamb 波波形最大幅值约为 PZT#4 处最大幅值的 4 倍,再次验证了超材料对于超声波能量的抑制效应。

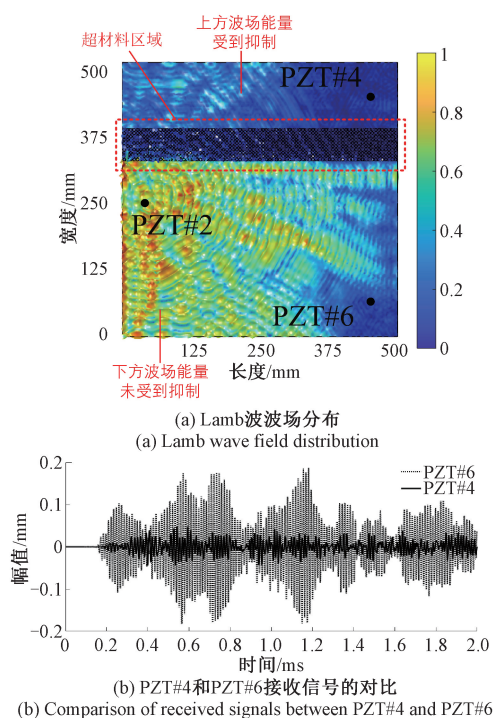


图 5 板结构有限元仿真结果

Fig. 5 Finite element simulation results of plate structure

3 试验研究

3.1 试验装置

图 6(a) 展示了本研究试验的传感器及超材料布局示意图。金属试件为两块 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的铝合金板,试件 1 表面用环氧树脂胶粘贴了两块 $200\text{ mm} \times 59\text{ mm}$ 的 PA6 尼龙超材料,试件 2 不粘贴超材料,仅用于结果对比。采用直径 8 mm、厚度 0.5 mm 的 6 个 PZT 传感器构成 3 对发射-接收组合。与 2.3 节的仿真一致,PZT#1、#2 和 #3 作为发射传感器,布置于铝板左侧,距离边缘 20 mm;PZT#4、#5 和 #6 作为接收传感器,布置于铝板右侧,距离边缘 20 mm;每组发射-接收 PZT 之间的距离为 160 mm。试验设计中,将发射和接收传感器分别布置于铝板的内外两侧以模拟穿透金属传播信号。试验设备包括 Tektronix AFG 31022 波形发生器、Aigtek ATA-4012 放大器和 Tektronix MDO3104 示波器,如图 6(b) 所示。

3.2 超材料的带隙特性验证

为验证超材料的带隙特性,采用起始频率为 0 kHz、终止频率 200 kHz、持续时间 1 ms 的线性调频信号作为激励,激励信号由 Tektronix AFG 31022 波形发生器产生并经 Aigtek ATA-4012 放大器放大,接收信号由 Tektronix MDO3104 示波器采集记录,采样频率为 5 MHz,记录信

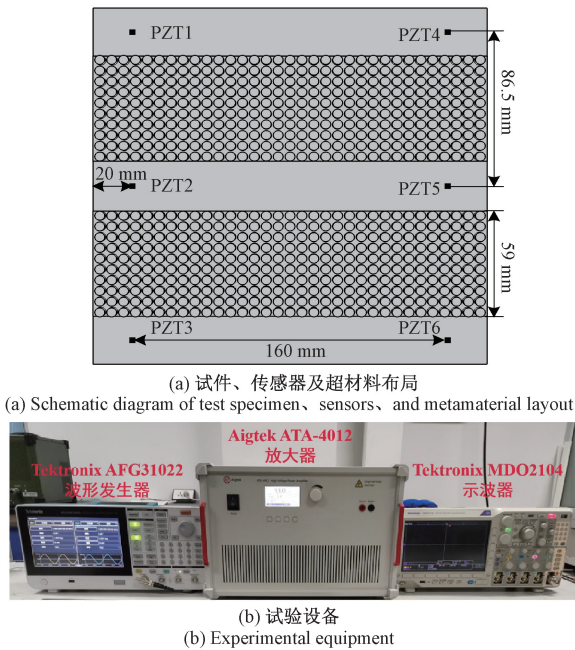


图6 试验布置
Fig. 6 Experimental setup

号长度为 10 000 个采样点。PZT#1、#2 和#3 依次发出激励信号,每次激励时 PZT#4、#5 和#6 均采集接收信号,共采集 9 组 Lamb 波信号,针对两块试件共采集了 18 组信号。接下来,对采集到的原始时域信号通过 Morlet 小波变换得到时频谱,进行时频分析,以验证超材料的带隙特性。

部分信号时频谱如图 7 所示,图 7 给出了含超材料试件中 PZT#1~PZT#4、PZT#2~PZT#4、PZT#3~PZT#4 以及 PZT#2~PZT#6 的 Lamb 波信号时频谱。从图 7(a)可以看出信号在 0~200 kHz 显示出较为完整的全频带能量分布,没有出现明显的中断或不连续,表明没有经过超材料区域的接收信号包含激励各频段的信息。而从图 7(b)~(d)可以明显看出时频谱在 60~80 kHz 范围出现了能量截断,与仿真计算出的带隙范围基本一致。此外,由于 PZT#3~PZT#4 传输路径经过了两个超材料区域,过滤掉的能量更多,因此图 7(c)的能量带隙比图 7(b)和(d)更为明显。

3.3 通道串扰抑制效果验证

为了进一步验证超材料对于通信效果的改进,实验分别在铝板试件 1 和试件 2 进行对比验证,其中试件 13 个通道之间布置了超材料,试件 2 未布置超材料。激励信号为 ASK 方式调制的由“0”和“1”组成的 32 位二进制随机编码。本文的随机编码如下:Signal1=[1 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 1],Signal2=[1 1 0 1 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 1 1 1 0 1 0 1 0 0

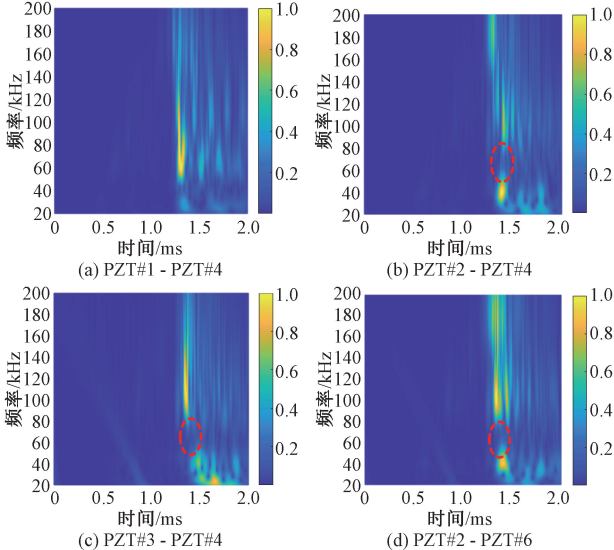


图7 接收 Lamb 波信号的小波变换时频谱

Fig. 7 Time-frequency spectrum of received Lamb wave signals using wavelet transform

1 1 0],Signal3=[1 0 1 0 1 1 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 1]。经过 ASK 调制后,编码“1”被调制为 78 kHz 3 周期汉宁窗正弦波,编码“0”的调制波形幅值为 0。试验过程中,将调制后的 Signal1、Signal2 和 Signal3 作为激励信号分别同时输入 PZT#1、PZT#2 和 PZT#3,同时 PZT#4、PZT#5 和 PZT#6 用于接收,实现 3 个独立通道同时传输信息。接下来,对接收信号开展稀疏分解,得到稀疏系数,归一化后系数值介于 0~1,设定阈值,小于阈值的系数视为 0,大于阈值的系数视为 1,实现二进制编码的解码。图 8 为试件 1 中 PZT#4 接收的原始信号及解码结果。图 9 展示了 3 个通道在布置/未布置

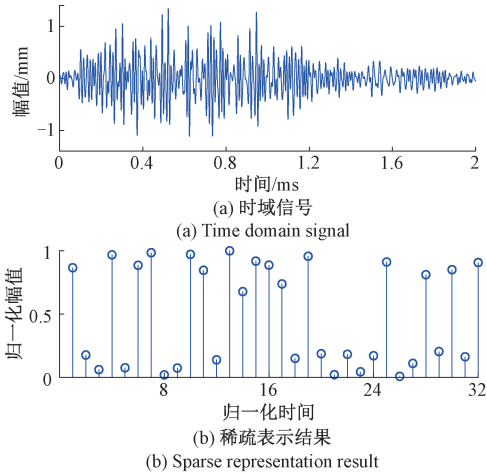


图8 通道 1(PZT#1~PZT#4)的接收时域信号及稀疏表示结果
Fig. 8 Received time domain signal and sparse representation result for channel 1 (PZT#1~PZT#4)

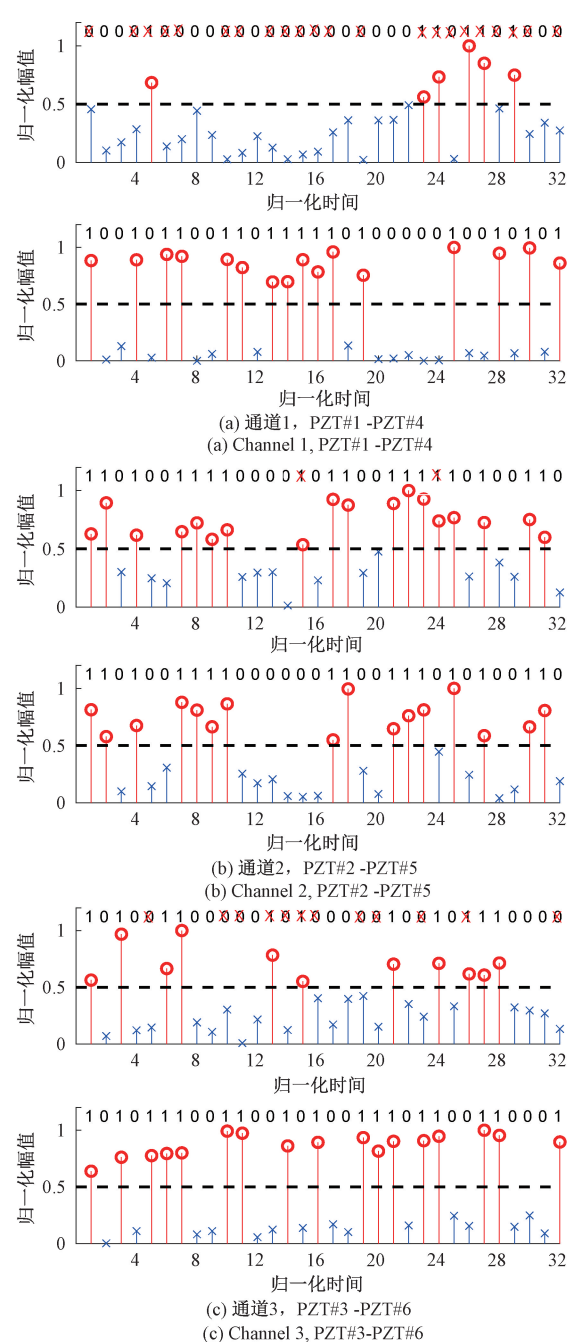


图 9 布置/未布置超材料试件的通信信号识别结果对比
Fig. 9 Comparison of communication signal recognition results with and without the metamaterial specimen in the setup

超材料情况下的解码结果对比。图 9 每组对比的上下图分别表示未布置/布置超材料对应的结果,可以看到,在未布置超材料的铝板上,通道间信号相互串扰,导致解码信息与输入信息存在较大误差,影响通信效果。反之,在布置了超材料的铝板上,通道 1、2 和 3 均能清晰区分编码“0”和“1”,与输入信息完全一致。通道 2 同时受到两个相邻通道信号干扰,在布置超材料情况下,依然能够实

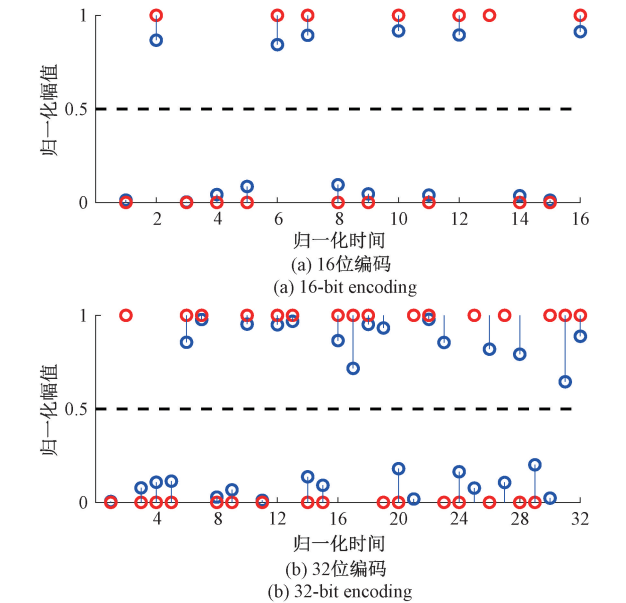
现信息的准确识别。
实验结果表明,在布置超材料结构的铝板上,3 个通道之间的信号串扰明显减少,信息传输准确率显著改善。反之,未布置超材料铝板上,由于缺乏阻隔通道间信号传播的机制,信号串扰较为严重,导致信息错码率较高。综上,声学超材料的带隙特性有效阻隔了激励频率范围内的 Lamb 波传播,避免了不同通道之间的信号相互干扰,从而保证了通信的解码精度,实现多通道同步、高效的信息传递。

4 分析讨论

4.1 编码长度对于解码准确率的影响分析

上述实验结果验证了论文提出的多通道通信系统的有效性和准确性。本节将进一步对不同位数的二进制通信信号进行解码结果的对比分析,探讨编码长度对于信息识别准确率的影响。以通道 1 为例进行分析,采用 ASK 方式进行编码,分别调制了 16 位和 64 位的二进制随机编码作为通信载波,均随机生成了 3 组编码,对应 3 个通道。将调制好的信号同时输入到 3 个通道中进行传输,并在输出端采集信号进行稀疏分解与信息解码。

解码结果的对比如图 10 所示,可以看到,较短的 16 位编码在识别准确率上表现出较高的优势,原因在于较短的编码长度使得信号混叠程度低,更容易辨别和解码。随着编码长度增加到 64 位,识别准确率略有下降,增加的编码位数导致出现更多的 Lamb 波形,波形之间相互叠加,增加了稀疏分解和信息解码的难度。



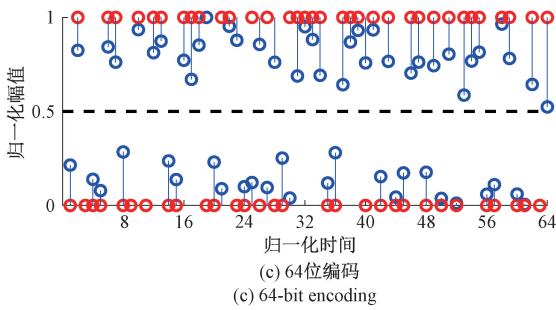


图 10 不同编码长度通信信号的解码识别结果
Fig. 10 Decoding and recognition results of communication signals with different encoding lengths

尽管如此,即使在 64 位编码的情况下,仍然能够找到一条分界线将“0”和“1”完全分开。表明即使在较多编码时,系统仍然具有较高的信息识别准确率。因此,虽然编码长度对于信息识别准确率有影响,但论文提出的多通道系统均表现出了可靠的信息识别能力。

4.2 不同形状结构的通信性能分析

为了探索论文设计的多通道通信系统在不同载体上的适用性,将前文中的平板换成铝合金管道,同时将超材料的尼龙材料换成树脂材料。其中,树脂材料参数为:杨氏模量 2 700 MPa,泊松比 0.42,密度 1 300 kg/m³。以铝管作为载体的通信系统如图 11 所示,将 3 块超材料长条间隔 120°粘贴在管道上,把管道等间距划分成 3 个通道。以通道 1 作为主要通道,通道 2 和 3 作为干扰通道,主要分析通道 1 在布置超材料前后的信号干扰情况及信息识别准确度。在 PZT#1 处施加随机生成的 16 位二进制编码信号, PZT#2 和 PZT#3 处施加同样类型的干扰信号 (Signal1=[1 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 1 1 1 1], Signal2=[1 1 0 1 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0], Signal3=[1 0 1 0 1 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0 1])。随后采集 PZT#4 处的接收信号进行分析处理。解码结果如图 12 所示,图 12(a)为未布置超材料对应的解码结果,图 12(b)为布置超材料后对应的解码结果。可以观察到,在未布置超材料的情况下,二进制信号的识别较为混乱,其中第 10、14、15 位出现了错误识别,而布置超材料之后,“0”和“1”之间有清晰的界限,能



图 11 管道多通道通信实验
Fig. 11 Schematic diagram of multichannel communication experiment in pipelines

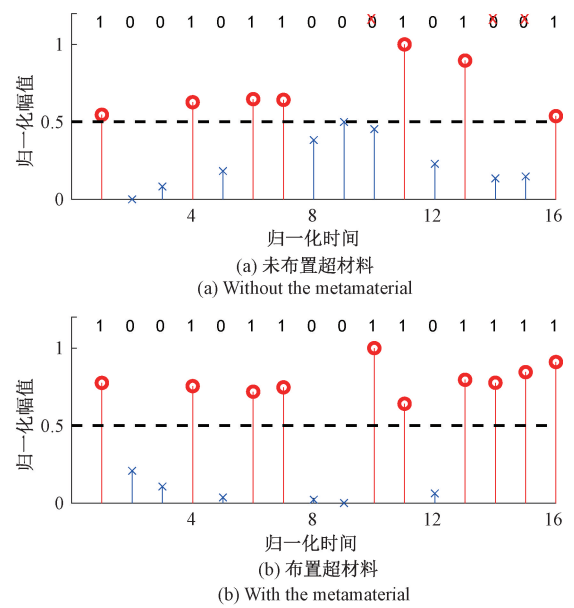


图 12 通道 1 在布置超材料前后信号解码结果对比
Fig. 12 Comparison of signal decoding results for channel 1 before and after deploying the metamaterial

够完全区分与识别。结果表明超材料对于通信信号的通道间串扰抑制作用在管道应用中同样有效。

4.3 不同材料结构的通信性能分析

为了进一步验证多通道通信系统在不同材料和不同结构工件上的适用性,将钛合金航空发动机风扇叶片结构也作为实验对象,如图 13 所示。

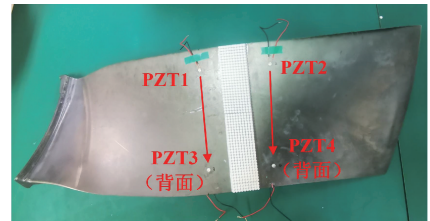


图 13 钛合金叶片多通道通信实验
Fig. 13 Schematic diagram of multichannel communication experiment in Titanium alloy

在实验中,使用航空发动机叶片作为通信载体,并在叶片表面粘贴树脂制成的超材料条带。叶片材料为钛合金(杨氏模量:109 GPa,泊松比:0.34,密度:4 500 kg/m³)。实验将树脂超材料条带横向布置在叶片结构的中间,将叶片分隔形成两个独立的通信通道。在 PZT#1 处施加随机生成的 16 位二进制编码信号,并在 PZT#2 处同时施加相同类型的干扰信号 (Signal1=[0 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0 0 1 0], Signal2=[1 1 1 0 0 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 1])。随后,采集位于钛合金叶片背面 PZT#3 处的接收信号,并进行解码分析,观察超材料对钛合金叶片通信系统的信

号干扰抑制效果。

图 14 展示了左侧通道在布置超材料前后的解码对比。实验结果表明,钛合金叶片上的通信信号解码精度在布置超材料前后有显著差异。未布置超材料时,接收到的信号存在较强的串扰,在 16 位的编码信号中出现了 4 位错误识别,准确率仅有 75%。而在布置超材料后,来自右侧通道的信号串扰显著降低,信号识别准确率达到 100%。与铝合金管道相比,钛合金叶片具有更复杂的形状和材料特性,实验证明了所提出的串扰抑制方法在复杂结构中的有效性,进一步证明了本文提出的串扰抑制技术在实际工程应用中的可行性。

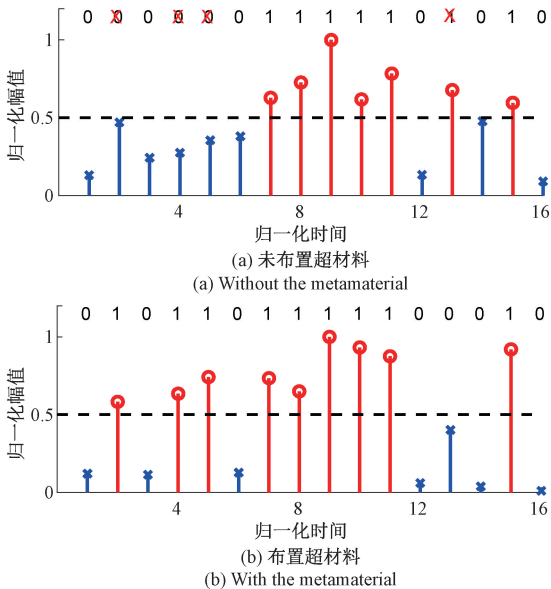


图 14 左侧通道在布置超材料前后信号解码结果对比
Fig. 14 Comparison of signal decoding results for left channel before and after deploying the metamaterial

5 结 论

通道间的信号串扰是制约多通道同步通信技术发展的主要瓶颈。为了解决信号串扰问题,传统方法大多依靠复杂的数据编码或信号处理算法,实施难度较高。基于此,本研究提出了基于超材料的多通道声学通信系统,成功实现了 3 个通道的独立通信。本文研究结论如下:

1) 所设计的超材料结构具有良好的带隙特性,能够有效阻碍带隙内的 Lamb 波通过,从而大幅度抑制了通道间的信号串扰,实现多通道的同步、准确通信。

2) 编码长度会影响信息传输的效率和精度。编码长度越长,传输效率越高,但信息解码的精度会降低;编码长度越短,信息解码精度越高,但传输效率较低。因此需要选择折中的信号长度,同时满足通信的效率和精度要求。

3) 所提出的串扰解决方案在不同的通信载体中都有着较好的效果,为不同的应用场景提供了技术支撑。

参考文献

[1] 房芳, 郑辉, 汪玉, 等. 机械结构健康监测综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(16): 269-292.
FANG F, ZHENG H, WANG Y, et al. Mechanical structural health monitoring: A review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(16): 269-292.

[2] 刘瑞兴, 段中兴, 李 博. 改进 DV-Hop 定位算法在钢结构建筑健康监测中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 38-49.
LIU R X, DUAN ZH X, LI B. Application of improved DV-Hop positioning algorithm in steel structure health monitoring[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 38-49.

[3] 郑禄军, 陈仁文, 李立早, 等. 机翼表面多参量一体化柔性传感器阵列[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(2): 130-138.
ZHENG L J, CHEN R W, LI L Z, et al. Multiparameter integrated flexible sensor array on wing surface[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(2): 130-138.

[4] 张 猛, 江 剑, 高 尚, 等. 基于空间滤波器的三明治装甲复合材料结构损伤监测研究[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(1): 119-125.
ZAHNG M, JIANG J, GAO SH, et al. Research on damage monitoring of sandwich armor composite structure based on spatial filter[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(1): 119-125.

[5] 马闻博, 孙衍山, 曾周末. 滑油磨粒大小的电容层析成像分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(12): 1984-1990.
MA W B, SUN Y SH, ZENG ZH M. Analysis of different size wear debris in oil by electrical capacitance tomography[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(12): 1984-1990.

[6] YANG D X, HU ZH, ZHAO H, et al. Through-metal-wall power delivery and data transmission for enclosed sensors: A review[J]. Sensors, 2015, 15(12): 31581-31605.

[7] IQBAL Z, KIM K, LEE H N. A cooperative wireless sensor network for indoor industrial monitoring[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(2): 482-491.

[8] ROMERO J M, PHAM A V, GARDNER C S, et al. Design and implementation of a wirelessly powered RFID system enclosed inside metal containers[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2023, 7: 573-

- 581.
- [9] TSENG F G, BEDAIR S S, RADICE J J, et al. Ultrasonic lamb waves for wireless power transfer[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2020, 67(3): 664-670.
- [10] DU D Y, HUA J D, CUI CH, et al. Energy focusing of broadband lamb wave by designing excitation waveforms and elastic metamaterials[J]. *Ultrasonics*, 2024, 139: 107294.
- [11] GORGIN R, LUO Y, WU ZH J. Environmental and operational conditions effects on lamb wave based structural health monitoring systems: A review[J]. *Ultrasonics*, 2020, 105: 106114.
- [12] BAHOUTH R, BENMEDDOUR F, MOULIN E, et al. Lamb wave wireless communication through healthy and damaged channels with symmetrical and asymmetrical steps and notches[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2022, 69(7): 2390-2399.
- [13] SUN Y SH, XU Y F, LI W, et al. A Lamb waves based ultrasonic system for the simultaneous data communication, defect inspection, and power transmission[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2021, 68(10): 3192-3203.
- [14] ABBASZADEH J, PASHCHENKO V, GEBHART M, et al. Detachable ultrasonic data communication through the metal plate with NFC technology[C]. 2022 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), IEEE, 2022: 1234-1237.
- [15] SUGINO C, OXANDALE S, ALLAM A, et al. Experimental validation of crosstalk minimization in metallic barriers with simultaneous ultrasonic power and data transfer[C]. 2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2021: 1-3.
- [16] LAWRY T J, WILT K R, ASHDOWN J D, et al. A high-performance ultrasonic system for the simultaneous transmission of data and power through solid metal barriers[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2013, 60(1): 194-203.
- [17] TZOU N L, BHATTA D, WANG X, et al. Concurrent multi-channel crosstalk jitter characterization using coprime period channel stimulus[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2016, 63(6): 859-870.
- [18] XIAO SH H, ZHANG M Y, LIU J, et al. A multi-channel adaptive equalization method[C]. 2021 4th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), 2021: 362-366.
- [19] 林京. 基于最大似然估计的小波阈值消噪技术及信号特征提取[J]. *仪器仪表学报*, 2005(9): 923-927.
- LIN J. Wavelet de-noising based on maximum likelihood estimation and its application for feature extraction[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005(9): 923-927.
- [20] 梅璐璐, 林京, 季桂花, 等. 基于相移小波的信号包络提取方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2007(6): 1122-1128.
- MEI L L, LIN J, JI G H, et al. Envelope extraction based on phase-shifting wavelet method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007(6): 1122-1128.
- [21] 于靖军, 谢岩, 裴旭. 负泊松比超材料研究进展[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(13): 1-14.
- YU J J, XIE Y, PEI X. State-of-art of metamaterials with negative poisson's ratio[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(13): 1-14.
- [22] JIN Y B, PENNEC Y, BONELLO B, et al. Physics of surface vibrational resonances: Pillared phononic crystals, metamaterials, and metasurfaces[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2021, 84(8): 086502.
- [23] JIANG Y Q, LIU Y L, KOU M Q, et al. Multi-parameter independent manipulation for flexural wave by notched metasurface[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 214: 106928.
- [24] SHEN Y ZH, XU Y L, LIU F, et al. Metasurface-guided flexural waves and their manipulations[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 257: 108538.
- [25] JIN Y B, WANG W, KHELIF A, et al. Elastic metasurfaces for deep and robust subwavelength focusing and imaging[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(2): 024005.
- [26] JANG S V, LEE S W, OH J H. Asymmetric elastic metasurface for wave manipulation between different media[J]. *Physical Review Applied*, 2023, 19(2): 024036.
- [27] TIAN Y R, SHEN Y F. Selective guided wave mode transmission enabled by elastic metamaterials[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 485: 115566.
- [28] LEE J, PARK J, PARK C W, et al. Uni-modal retroreflection in multi-modal elastic wave fields[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 232(7): 107655.
- [29] CAO L Y, ZHU Y F, XU Y L, et al. Elastic bound state

- in the continuum with perfect mode conversion[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2021, 154: 104502.
- [30] LEE S W, SEUNG H M, CHOI W, et al. Broad-angle refractive transmodal elastic metasurface[J]. Applied Physics Letters, 2020, 117(21): 213502.
- [31] KIM K, PARK C I, LEE H, et al. Near-zero effective impedance with finite phase velocity for sensing and actuation enhancement by resonator pairing[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 5255.
- [32] KIM H J, PARK C I, KIM K, et al. Meta-ring for enhancing emission efficiency of omnidirectional SH waves[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 251: 108354.
- [33] MA T X, LI ZH Y, ZHANG CH, et al. Energy harvesting of Rayleigh surface waves by a phononic crystal Luneburg lens[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 227: 107435.
- [34] LEE G, PARK J, CHOI W, et al. Multiband elastic wave energy localization for highly amplified piezoelectric energy harvesting using trampoline metamaterials[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 200: 110593.
- [35] CAO L Y, YANG ZH CH, XU Y L, et al. Flexural wave absorption by lossy gradient elastic metasurface[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2020, 143: 104052.
- [36] DENG J, GUASCH O, MAXIT L, et al. A metamaterial consisting of an acoustic black hole plate with local resonators for broadband vibration reduction[J]. Journal of Sound and Vibration, 2022, 526: 116803.
- [37] 王卫宾, 周永金. 用于复杂电磁环境的能量收集表面[J]. 电子测量技术, 2017, 40(9): 6-9.
WANG W B, ZHOU Y J. Energy harvesting surfaces in complex electromagnetic environments[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(9): 6-9.
- [38] HEIFETZ A, SHRIBAK D, HUANG X, et al. Transmission of images with ultrasonic elastic shear waves on a metallic pipe using amplitude shift keying protocol[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2020, 67(6): 1192-200.
- [39] 梁静远, 陈明惠, 王惠琴, 等. 无线光通信自适应阈値检测技术研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7): 1-16.
LIANG J Y, CHENG M H, WANG H Q, et al.

Research progress of adaptive threshold detection technology for optical wireless communication[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(7): 1-16.

作者简介



华佳东, 2017 年于西安交通大学获得博士学位, 现为北京航空航天大学副教授, 主要研究方向为结构健康监测、超声无损检测、周期结构与弹性波传导等。
E-mail: huajiadong@buaa.edu.cn

Hua Jiadong received his Ph.D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2017. He is currently an associate professor at Beihang University. His main research interests include structural health monitoring, ultrasonic non-destructive testing, periodic structures, elastic wave propagation, and related fields.



崔春, 2022 年于北京航空航天大学获得学士学位, 现为北京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为超声无损检测、声学超材料。
E-mail: cuichun0403@buaa.edu.cn

Cui Chun received his B.Sc. degree from Beihang University in 2022. He is currently a master student at Beihang university. His main research interests include ultrasonic non-destructive testing and acoustic metamaterials.



林京, 1999 年于西安交通大学获得博士学位, 现为北京航空航天大学教授, 主要研究方向为机械状态监测、故障诊断与预测、振动分析和非平稳信号处理等。
E-mail: linjing@buaa.edu.cn

Lin Jing received his Ph.D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1999. He is currently a professor at Beihang University. His main research interests include machinery condition monitoring, fault diagnosis and prediction, vibration analysis, and non-stationary signal processing.



张晗 (通信作者), 2023 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为中国计量科学研究院助理研究员, 主要研究方向为结构健康监测、超声无损检测、振动计量等。
E-mail: zhh@nim.ac.cn

Zhang Han (Corresponding author) received her Ph.D. degree from Beihang University in 2023. She is currently an assistant researcher at the National Institute of Metrology, China. Her main research interests include structural health monitoring, ultrasonic non-destructive testing, and vibration metrology.