◇ 研究报告 ◇

基于兰姆波的平板频分复用数据传输系统研究*

徐 统1 吴 斌2 刘秀成2 高 翔2+

(1 北京工业大学材料与制造学部 北京 100124)

(2 北京工业大学信息学部 北京 100124)

摘要:以兰姆波为载体实现平板上数据通信具有传输距离远、使用成本低和可靠性高等优点,可以在保证结构 完整性的条件下实现非电磁波通信。该文建立平板中兰姆波频分复用发射信号通用模型,分析兰姆波频分复 用发射信号的构建规则。首先,对现有传感器进行扫频实验,确定兰姆波激励频带;其次根据平板材料参数、尺 寸参数和传感器位置信息分析板长对激励信号时长的影响,得到频分复用激励信号的子载波个数及其中心频 率;最后使用格兹尔算法快速提取信号频谱中的幅度信息,利用传感器扫频曲线对信号频谱进行补偿,减少子 载波频带在传输时的频率选择性衰减。将传感器布置在平板的不同位置上进行声数据传输实验,结果表明,通 过所构建的兰姆波频分复用激励信号通用模型,可以有效地进行声数据的传输,为使用兰姆波传输声数据提 供了可行的技术方案。

关键词:兰姆波;数据通信;频分复用;结构健康监测传感网络
 中图法分类号:TB551;TG11528
 文献标识码:A
 文章编号:1000-310X(2024)06-1283-14
 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2024.06.011

The flat panel frequency division multiplexing data transmission system based on Lamb waves

XU Tong¹ WU Bin² LIU Xiucheng² GAO Xiang²

(1 Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2 Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Realization of data communication on a flat plate by using Lamb waves as a carrier has the advantages of long transmission distance, low cost of use and high reliability, and can realize non-electromagnetic wave communication under the condition of ensuring structural integrity. This paper establishes a general model of Lamb wave frequency division multiplexing (FDM) emission signal in a flat panel and analyzes the construction rules of Lamb wave FDM emission signal. Firstly, the existing sensor sweep experiment is carried out to determine the Lamb wave excitation band; secondly, the influence of the plate length on the excitation signal duration is analyzed according to the flat plate material parameter, size parameter and sensor position information, and the number of subcarriers and their center frequency of frequency division multiplexing excitation signal are obtained; finally, the amplitude information in the signal spectrum is extracted by using the Gerzel algorithm, and the signal spectrum is compensated using the sensor sweep curve to reduce the frequency-selective attenuation of the subcarrier frequency band during transmission. The transducers are

²⁰²³⁻⁰⁸⁻⁰⁷ 收稿; 2023-09-29 定稿

^{*}国家自然科学基金项目(12272014, 12004018, 12122201)

作者简介:徐统 (1995-),男,山东淄博人,博士研究生,研究方向:无损检测。

[†]通信作者 E-mail: gaoxiang@bjut.edu.cn

arranged in different positions of the plate for acoustic data transmission tests, and the results show that the constructed generalized model of Lamb wave frequency division multiplexing excitation signal can effectively transmit acoustic data, which provides a feasible technical solution for the transmission of acoustic data using Lamb waves.

Keywords: Lamb wave; Data communication; Frequency division multiplexing; Structural health monitoring

0 引言

结构健康监测系统为在役工程设备的安全运 行提供了重要的保障。大多数结构健康监测系统将 采集到的数据信息通过有线线缆或电磁波进行传 输,在某些特定的场合下受工作环境限制,如航空航 天领域的在线结构健康监测传感系统间的线缆安 装会增加结构质量和维护复杂性。电磁波则易产生 电磁干扰的影响,线缆或电磁波不适用于这些特定 场合的数据信息传输,因此将超声导波作为载体传 输数据是一种新的通信途径^[1-2]。传统声数据传输 主要在线缆、管道和金属屏障等结构上进行,而航 空航天结构多以壁板结构为主,传统声数据传输技 术并不完全适用于航空航天领域^[3-4]。借鉴其他领 域中通信调制方法的思想,将兰姆波作为载体,实现 检测和通讯的一体化对结构健康监测网络的发展 具有积极作用^[5-6]。

兰姆波无线通信的关键是调制信号设计与接 收信号解调,调制和解调通常在时域和频域上进 行^[7]。目前,在时域上通过兰姆波传输声数据的调 制解调方法有幅度调制、码分多址和相位调制等调 制解调方法^[8-9]。Kexel等^[10]将所传输的二进制序 列与正弦脉冲信号进行调制,并使用匹配滤波器来 解调所传输的二进制信息,在玻璃纤维复合板上实 现了100 kbit/s 的数据传输速率,但该方法只适用 于单输入单输出通信系统。针对多输入多输出兰姆 波通信系统, Moll等^[11-12]提出了一种基于二进制 相移键控的码分多址通信的方法,每个传感节点分 配一组伪随机信号,并在接收端对信号进行频散补 偿和解调,得到所传输的声数据信息。Zonzini等^[13] 借鉴直接扩频调制的方法对激励信号进行调制,采 用 Kasami 序列编码比特信息, 使用兰姆波频散补 偿算法对接收信号进行补偿,实现了声数据在铝梁 上的传输。但码分多址激励信号的频带较宽,在传 感网络通信过程中会对传感器的频带有一定的要 求。Xu等^[14]采用相位调制和脉冲幅度调制的方法 对汉宁窗调制的正弦信号进行调制,对多个传感节 点分配不同的频带,采用移不变稀疏编码方法进行 信息解调,实现了兰姆波声数据的传输。

针对兰姆波多输入多输出系统间的通信问题, 预先将传感器和波导的有限带宽分配给不同传感 节点,传输数据的解调过程可在频域上进行。Kexel 等[15] 提出了在玻璃纤维复合材料板上使用频分复 用调制方法,将信道的有限带宽进行划分并分配 给每个传感节点,实现多个传感器节点并行通信。 Mälzer 等^[16] 将信道可用频带划分为70~180 kHz 的损伤检测频率和400~616 kHz的通信频率,并从 通信频带上选择108个不同频率的载波作为声通信 的子载波,实现了铝板结构健康监测和损伤指标信 息的逐次传输。当兰姆波在加筋板结构的平板上激 励时,透射过加筋板的信道频率响应曲线是非线性 函数,因此频率选择会对兰姆波的通信质量造成影 响^[17]。Zonzini等^[18-19]建立结构有限元模型进行 仿真,将结构固有频率作为子载波的频率,使用轻量 化的传感器网络节点分别通过频分复用和时间反 转法通信方式实现声数据的并行传输。与在时域上 进行解调的方法相比,在频域上进行兰姆波调制解 调,虽然传感器的频带利用率低,但可有效减少噪声 等因素对兰姆波通信的影响,解调过程简单且易于 实现。

缺陷和环境温度等因素也会对兰姆波的传输 造成影响^[20-21]。为研究缺陷和环境温度对兰姆波 数据传输的影响, Kexel等^[22]在1.5 mm厚的铝板 上制造了宽度为2 mm矩形缺口损伤, 研究缺陷深 度分别为0.9 mm和1.5 mm时, 缺陷对幅度键控兰 姆波声通信的影响; 并使用120 kHz频率的汉宁窗 脉冲信号进行调制并采用非相干解调方法, 分析 2.5 ℃~41 ℃的温度变化对幅移键控导波声通信的 影响。Bahouth等^[23-25]对开关键控、幅移键控和 二进制相移键控三种方法调制的兰姆波信号进行 解调和对比, 发现二进制相移键控方法稳定性好且 误码率最低。 在使用带宽较窄的压电片通过频分复用方式 传输兰姆波声数据时,存在以下两个问题:波导结构 影响激励兰姆波信号时长,若接收传感节点同时接 收到兰姆波直达波和从边界反射的回波波包,不同 模态的波包混叠会造成信号串扰,影响传输数据的 解调,因此需要对传感网络节点在相应位置下的兰 姆波激励信号的时长进行分析;兰姆波通过压电片 进行激励时,调制信号的子载波频率幅值会发生不 同程度的衰减,因此在解调过程中需要对信号进行 补偿。

本文从兰姆波频分复用激励信号时长的设计 角度出发,建立通用化兰姆波频分复用激励信号模 型,研究平板尺寸等因素对激励信号中子载波频率 选择、子载波频谱混叠和子载波数量等的影响;针 对兰姆波在平板传播过程中存在的频率选择性衰 减情况,提出使用传感器扫频曲线进行补偿的方法, 并使用幅度阈值和信号能量阈值对传输的数据进 行解调,分析平板上兰姆波直达波信号和回波信号 造成的信号串扰对解调数据的影响,为兰姆波传输 声数据提供了可行的技术方案。

基于兰姆波的频分复用数据传输系统 理论

1.1 兰姆波通信网络

兰姆波具有频散和多模态特点,受波导几何尺 寸的影响,超声导波的传播速度随频率的不同而改 变。压电片安装方式的改变,也会激发出不同模态 的兰姆波,常用的兰姆波激励方式为单侧激励。根 据频散曲线,在一定的激励频率下,会激发出两个以 上模态的兰姆波。在相同的兰姆波激励条件下,当 传感节点的位置发生变化,兰姆波直达波会出现模 态混叠现象,为研究模态混叠对兰姆波频分复用的 影响,需建立区分兰姆波 So 模态和 Ao 模态的频分 复用激励信号模型,分析兰姆波直达波和首个边界 反射回波的到达时间差,以便后续对激励信号进行 研究。

通过Rayleigh-Lamb波动方程分析兰姆波特性,可以得到Lamb波的相速度和群速度频散曲线。 选取Q235钢板为研究对象,厚度为1.8 mm的Q235 钢板的兰姆波频散曲线如图1(a)所示。利用兰姆 波进行数据传输时,激励信号需在一定的激励频率 范围内进行激发,设激励频率范围内的最小频率是 f_{min},激励频率范围内的最大频率是 f_{max},则兰姆 波可激发频率的带宽长度为 f_m。

基于兰姆波传输数据的通信网络由多个传感 节点和下位机组成,各个传感节点接收下位机发布 的信息指令并执行,将自身采集的信息数据传输给 下位机。图1(b)展示了在正方形钢板上沿钢板中心 线等间距且轴对称布置的两个传感节点网络的示 意图,L是钢板长度,W是钢板宽度,E是激励传感 节点,R为接收传感节点,两个传感节点的距离为 D,由于传感节点是轴对称布置,因此两个传感节点 距离两侧钢板边界的距离为(L – D)/2,函数发生 器给传感网络激励端节点传输携带有声数据的激 励信号,示波器记录并保存接收节点接收到的兰姆 波信号。



图 1 平板上两个传感节点的传感网络示意图 Fig. 1 Schematic diagram of the sensing network with two sensing nodes on a flat plate

本文使用频分复用方法对兰姆波进行调制和 解调。频分复用声通信是将多个频率的子载波信号 作为激励信号。由于兰姆波在板类构件传播中碰到 边界会产生边界回波,受传感网络节点位置布置和 激励信号长度的影响。当传感节点间的距离较近或 距边界较近以及频分复用激励信号时长过长时,都 会出现兰姆波直达波 S₀模态波包与直达波 A₀模态 波包混叠或兰姆波直达波 A₀模态波包与反射波 S₀ 模态波包混叠的情况。当直达波和反射回波发生混 叠时,将影响传输数据的解调,几种波包叠加状态示 意图如图2所示。



图2 兰姆波直达波波包混叠示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Lamb wave direct wave packet mixing

分析钢板中兰姆波直达波和反射波混叠对通 信系统的影响,需要先建立适用于平板中兰姆波频 分复用激励信号的设计规则。

1.2 兰姆波频分复用激励信号模型

1.2.1 兰姆波频分复用激励信号设计规则

在已知钢板参数、兰姆波扫频曲线、传感节点 位置和压电片扫频曲线条件下,根据兰姆波各个模 态波包的到达时间差,确定激励信号时长,继而得到 满足兰姆波 S_0 模态波包和 A_0 模态波包不发生混叠 情况下的频分复用激励信号,兰姆波频分复用激励 信号设计规则流程如图3所示。



图 3 兰姆波频分复用激励信号设计规则流程图 Fig. 3 Flowchart of Lamb wave frequency division multiplexing excitation signal design rules

该模型建立包括以下几个步骤:

步骤1 输入平板尺寸和材料参数,依据频散方 程画出兰姆波频散曲线,得到平板在对应频率下的 群速度曲线;

步骤2 确定激励端节点和接收端节点在平板 上的位置,对传感器使用汉宁窗调制的正弦信号进 行扫频,得到传感器的频率响应曲线;

步骤3 根据传感器的扫频曲线,分析频率与信 号衰减的关系,选择合适的激励频率区间,对应兰姆 波群速度频散曲线,得到兰姆波在相应频率区间的 最小群速度和最大群速度;

步骤4 根据兰姆波激励节点和接收节点在平 板中的空间位置,研究兰姆波在平板中的传播过 程,分析直达波路径和首个反射回波的路径及传播 路程;

步骤5 将兰姆波直达波和首个反射回波的传播路程与兰姆波最小和最大群速度联系起来,得到 兰姆波直达波S₀模态波包、直达波A₀模态波包和 首个回波S₀模态波包的到达时间,通过计算几个波 包的到达时间差得到激励信号时长;

步骤6 根据激励信号时长,得到信号加窗后的 主瓣宽度,并根据步骤3选择的激励频率区间中最 小激励频率和最大激励频率,继而得到频分复用激 励信号的子载波个数及其中心频率;

步骤7 改变步骤1中的传感节点位置、平板尺 寸和材料等参数,即可得到适用于不同平板的兰姆 波频分复用激励信号。 通过该模型,可得到区分兰姆波直达波和反射 回波的频分复用激励信号,为研究兰姆波直达波的 模态混叠对频分复用数据传输的影响提供了理论 支持。

1.2.2 兰姆波频分复用激励信号设计示例

在所设计兰姆波频分复用激励信号模型中,输 入参数为压电片位置信息、压电片扫频曲线、平板 材料参数(杨氏模量、密度和泊松比)和几何参数 (长度、宽度和厚度);输出信息为兰姆波频分复用 激励信号的子载波中心频率和子载波个数。下面以 图1(b)建立的兰姆波频分复用通信网络示意图为 例进行说明,激励端传感器和接收端传感器沿钢板 中心线等间距布置,为避免直达波不同模态波包发 生混叠,首先需要考虑两个传感节点间的直达波路 径和反射波路径。从图1(b)中看到,共需要考虑三 条兰姆波传播路径,第一条路径是直达波路径,用两 个传感节点的直线距离差和相应兰姆波群速度来 计算兰姆波直达波So模态波包和直达波Ao模态波 包的到达时间,在图中用路径①进行表示,后续路 径计算是确定兰姆波首个反射波 So 波包的传播路 径和到达时间,当钢板尺寸发生变化时,首个反射波 波包的传播路径也不同;第二条路径是激励传感节 点激发的兰姆波分别传播到钢板左侧和右侧边界 后反射回到接收节点的兰姆波传播路径,在图中用 路径②进行表示;第三条路径是激励传感节点激发 的兰姆波传播到钢板上侧和下侧边界后反射回接 收节点的兰姆波传播路径,在图中用路径③进行表 示。兰姆波首个反射波波包的传播路径是取路径② 的和路径③的最小值,兰姆波首个反射波波包的传 播距离为

$$L_s = \min\left\{L, 2 \times \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{W}{2}\right)^2}\right\}, \quad (1)$$

式(1)中,D为激励节点和接收节点的直线距离;L 是钢板宽度;W是钢板宽度。

不同波包的到达时间是由传播路程和传播速 度共同决定的,而兰姆波具有频散特性,在激励频率 范围内波包的群速度随频率变化而变化。由于兰姆 波 S_0 模态和 A_0 模态波包在激励频率范围内都存在 频散特性,因此需要考虑兰姆波在相应的激励频率 范围内的最快群速度和最慢群速度。在图1(a)中, 最快的 S_0 模态波包群速度记为 v_{s1} ,最慢的 S_0 模态 波包的群速度记为 v_{s2} ;最慢的 A_0 模态波包的群速 度记为*v*_{a1},最快的A₀模态波包的群速度记为*v*_{a2}。 兰姆波激励时长受激励频率区间的S₀模态和A₀模 态群速度及兰姆波直达波和首个反射波的传播路 程的影响,在各个模态波包分离的情况下,兰姆波激 励信号S₀模态波包和A₀模态波包的时长可记为

$$\begin{cases} D/V_{a2} - D/V_{s2} = \Delta t_{S_0}, \\ L_s/V_{s1} - D/V_{a1} = \Delta t_{A_0}, \end{cases}$$
(2)

式(2)中, Δt_{S_0} 是直达波S₀模态波包和直达波A₀ 模态波包的到达时间差; Δt_{A_0} 是直达波A₀模态波 包和S₀模态反射波包的到达时间差。从公式(2)中 可以看到,直达波S₀模态波包和A₀模态波包的时 间差可以通过激励端节点和接收端节点的直线距 离进行确定;而直达波A₀模态波包和首个反射S₀ 模态波包的时间差受传感器布置位置的影响,当兰 姆波在路径②的传播路程小于在路径③的传播路 程时,将路径②的传播路程带入L_s进行计算;当兰 姆波在路径③的传播路程带入L_s进行计算。此 时两种路径下直达波A₀模态波包和反射波S₀模态 波包的到达时间差分别为

$$\Delta t_{\mathcal{A}_0} = \frac{L_s}{V_{s1}} - \frac{D}{V_{a1}},\tag{3}$$

$$\Delta t_{A_0} = \frac{2}{V_{s1}} \times \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{W}{2}\right)^2 - \frac{D}{V_{a1}}}.$$
 (4)

上述分析介绍了兰姆波传播路径对兰姆波频 分复用激励时长的影响。根据兰姆波直达波S₀模 态波包、A₀模态波包和首个反射S₀模态波包的时 间差,兰姆波频分复用激励信号的时长为

$$\Delta t = \min\left\{\Delta t_{\mathrm{S}_0}, \Delta t_{\mathrm{A}_0}\right\}.$$
(5)

在设计频分复用激励信号模型中,载波频率的 选择是由压电片扫频曲线和激励时长共同决定的, 时长的变化决定子载波频率主瓣的宽度,继而决定 了子载波频率的选取。在公式(5)中Δt的激励时间 下,经过汉宁窗调制的激励信号子载波的频率主瓣 宽度为

$$W = \frac{4}{\Delta t},\tag{6}$$

式(6)中,W是汉宁窗调制的激励信号子载波的频率主瓣宽度; Δt 是激励信号的时长。

子载波频率选取规则为:所取频率范围区间内 最小激励频率减去频率主瓣宽度的一半得到第一 个子载波中心频率;所取频率范围区间内最大激励 频率减去频率主瓣宽度的一半得到最后一个子载 波中心频率;其他子载波中心频率通过对最小子载 波和最大子载波的中心频率间的频带进行均分得 到。根据激励信号时长、载波频率和待传输的信息, 利用频分复用方法对汉宁窗调制的正弦信号进行 调制从而得到频分复用激励信号。在考虑子载波中 心频率的间隔为子载波频率主瓣宽度的情况下,激 励信号的子载波个数为

$$n = \left\lfloor \frac{f_m}{W} \right\rfloor,\tag{7}$$

式(7)中,n是激励信号中子载波个数; f_m是所取传 输信号的带宽; W是子载波的频率主瓣宽度; [·]是 向下取整函数。则激励信号中频分复用子载波的中 心频率为

$$\begin{cases} f_i = f_{\min} + \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2}, & i = 1, \\ f_i = f_{\min} + i \times \frac{f_{\max} - f_{\min} - W}{n - 1}, & i = 2, \cdots, n, \end{cases}$$
(8)

式(8)中,*i*是激励信号中子载波的序号;*f_i*是第*i*个 子载波的中心频率;*f_{max}*是所选激励频率范围内的 最大频率;*f_{min}*是所选激励频率范围内的最小频率; *n*是激励信号中子载波个数;*W*是子载波的频率主 瓣宽度。

1.3 调制和解调方法

1.3.1 调制

频分复用通信方法利用了传感器和平板的有限带宽,将待传输的信息调制到不同频率上进行传输,因此在传输数据前,需要预先对传感网络每个传感节点分配一组不同频率的载波。

不同类型的传感器具有不同的频率响应曲线, 在使用兰姆波传输数据前,需要用所选传感器在平 板上进行扫频,以选择最佳的载波频率。图4分别为 厚度为1 mm、直径为10 mm、材料为PZT-5的圆形 压电片在长度为1500 mm、厚度为1.8 mm的Q235 正方形钢板中心线上等间距布置时的频率响应波 列图和扫频曲线,取图4(b)中压电片扫频曲线衰减 –20 dB时的频带作为频分复用激励信号的频率范 围,则激励信号的频率范围区间为168~282 kHz。

使用频分复用方式传输数据时,对分配的子载 波频率的正弦信号采用开关键控策略进行调制,每 个载波中心频率对应一个数据位,当传输数据位'1'时,子载波的中心频率被激发;当传输数据位'0'时, 子载波的中心频率则不会被激发。为了提高信号 的抗干扰能力,减小频谱泄露,需要对信号进行处 理^[26],本文中选用汉宁窗调对开关键控的调制信号 进行加窗处理。子载波个数为N的频分复用激励信 号表达式为

$$y(t) = \operatorname{Hanning}(t) \cdot \left(\sum_{i=1}^{N-1} \sin\left(2\pi f_i t\right)\right), \qquad (9)$$

式 (9) 中, Hanning(t) = 0.5 · $[1 - \cos(2\pi t/T)]$, T 为 窗宽, f_i 为第 i 个子载波的频率。





明,根据所构建的模型,取汉宁窗的窗宽为0.84 ms。 当传输信息为"11",两个子载波的中心频率都会被 激发,通过式(9)得到信号波形,该信号的时域图及 频域图如图5所示。





Fig. 5 Time and frequency domain plots of the Lamb wave frequency division multiplexing excitation signal

1.3.2 解调

在兰姆波频分复用数据传输系统中,信息在频 域进行传输,因此接收端节点在接收到信号后,需对 接收信号进行傅里叶变换得到信号频谱,通过判断 特定信号频域区域内的频率是否超过解调所设置 的阈值,从而解调出传感器所传输的数据。获取信 号频域信息的常用方法是傅里叶变换,傅氏变换计 算了信号在不同频率下的幅度信息和相位信息。在 实际应用中,不考虑信号的相频信息时,可以考虑使 用更快的解调方法,如采用格兹尔算法,仅计算频谱 中的几个离散点,提高接收信号的解调效率。频分 复用解调过程包括以下几个步骤:

步骤1 从接收到的兰姆波信号中提取出兰姆 波直达波波包;

步骤2 使用格兹尔算法对接收到的信号进行 计算,得到所设频带范围内的频率幅度信息; 步骤3 根据压电片扫频曲线对信号频率幅度 信息进行补偿,得到补偿后的频率幅度信息;

步骤4 对补偿后的频率幅度信息进行幅度阈 值和信号能量阈值判断,解调出所传输的数据。

解调过程中,信号频率上幅度阈值和信号能量 阈值的判决公式为式(10)和式(11):

$$y_{fd} = \text{sign}(x_i - \theta_f), \quad i = 1, 2, \cdots, N,$$
 (10)

$$y_{nl} = \operatorname{sign}\left(\sum_{i=1}^{N} x_i - \theta_n\right), \quad i = 1, 2, \cdots, N, \quad (11)$$

式中, N 为所截取的子载波频段间的信号点数, θ_f 是信号频谱上的幅度阈值, θ_n 是信号频谱上的能量 阈值指标, y_{fd} 是信号频谱上幅度阈值的判决结果, y_{nl} 是信号频谱上能量阈值的判决结果。

当信号子载波频段间的频谱幅值大于等于所 设的幅度阈值时,认为所传输的数据为数据位1,且 所取信号子载波频段间的能量阈值大于等于所设 的能量阈值指标时,认为所传输的数据为数据位1; 反之则认为所传数据为数据位0。

1.4 实验设置

兰姆波频分复用声通信实验所用到的设备为 泰克AFG3021B任意波形发生器、圆形压电陶瓷压 电片、泰克DPO4034示波器和方形钢板。圆形压电 陶瓷压电片直径为10 mm,厚度为1 mm,材质为 PZT-5。钢板尺寸为1500 mm×1500 mm,厚度为 1.8 mm,材料为Q235型钢,杨氏模量E = 210 GPa, 泊松比 $\nu = 0.3$,密度 $\rho = 7890$ kg/m³。实验装置实 物图如图6所示。



图 6 实验装置实物图 Fig. 6 Physical diagram of the test setup

2 实验结果讨论

2.1 平板中兰姆波频分复用激励信号模型

平板中兰姆波频分复用激励信号根据上述模型进行构建,以所搭建的实验平台为例进行分析。 平板材料参数所用Q235型钢的材料参数,压电片 扫频曲线通过实验获得(如图4所示),为分析板长 对频分复用激励信号的影响,将激励压电片和接收压电片位置设置为沿钢板中心线等间距且轴对称布置,设置板长变换范围为500~2000 mm,变换步长为0.1 mm,通过建立模型进行计算得到直达波So模态波包和Ao模态波包时间差以及子载波个数不同时的子载波频谱主瓣重叠结果图,如图7 所示。



图 7 子载波个数为2和3时不同平板尺寸下的激励 信号长度结果图

Fig. 7 Plot of excitation signal length results for different plate sizes for subcarrier numbers 2 and 3

图7展示了在不同激励范围和子载波数目下, 兰姆波直达波S₀模态波包和A₀模态波包不发生混 叠时,子载波频率主瓣间的重叠程度随平板板长变 化的关系,蓝色、黑色和红色曲线分别代表频率范 围在衰减-10 dB、-16 dB和-20 dB时对应的激 励频率区间。图7(a)和图7(b)分别展示了载波个数 为2和载波个数为3的子载波主瓣宽度间的重叠程 度图,从图中可以看到,激励频率区间变化时,对应 的激励信号子载波重叠程度也会发生改变,下面以 蓝色曲线为例进行说明。

图 7(a) 是子载波个数为2时,主瓣间重叠的 程度随平板板长变化的关系图。从图中可以看到, 当激励信号的子载波个数为2时,在平板边长为 500~621 mm阶段,几个模态波包的到达时间差较 小,因此激励信号时长和激励信号的周期数也较 小, 而载波频率主瓣宽度大于压电片扫频曲线的 频率范围,最终这个阶段无法生成激励信号;在平 板边长为621~773 mm范围内,激励信号子载波频 率相近,导致激励信号子频率主瓣重叠为一个,随 着平板边长尺寸增加,激励信号子载波中心频率 间的差值逐渐增加,重叠的主瓣重叠幅度下降;在 平板边长为774~863 mm范围内,频谱上激励信号 有两个频率主瓣,但两个频率主瓣的中心频率与 预期的子载波中心频率有所差异, 且随着平板边长 尺寸增加,频率主瓣间重叠幅度也不断增加;在平 板边长为876~1232 mm范围内,激励信号的子载 波主瓣中心频率与所设计的载波频率保持一致,子 载波主瓣频率间重叠幅度逐渐下降;在平板边长 为1232~2000 mm,子载波主瓣频率没有重叠部分。 图7(b)是当子载波个数为3时,主瓣间重叠的程度 随平板板长变化的关系图,其变化趋势与图7(a)一 致;在平板边长尺寸增加至1149 mm时,信号中三 个主瓣的中心频率与所设计载波频率一致。

2.2 频分复用解调

利用频分复用激励信号模型计算得到激励信号,并开展实验研究。将激励压电片和接收压电片沿钢板中线轴对称布置,激励压电片距离钢板 左侧边界500 mm,接收压电片距离钢板右侧边界 500 mm,两个压电片间隔500 mm,取载波频率为 200 kHz和250 kHz,图8和图9分别为接收到的兰 姆波信号的时域和时频图及直达波波包的时域和 频域图。

从图9中可以看出,由于兰姆波在传播过程中 子载波频段发生了不同程度的衰减,为提高解调准 确性,需要对信号频谱进行补偿。图10是直达波信 号频谱图和使用压电片扫频曲线补偿后的频谱图。 在计算中,为减少计算量,可以采用格兹尔算法只提 取信号频域中的幅度信息而忽略掉信号相位信息, 图11是使用格兹尔算法后的结果图以及通过压电 片扫频曲线补偿后的结果图。

通过图11可以看到,对兰姆波信号使用格兹 尔算法可以有效提取信号频域中的幅度信息,但 由于兰姆波在钢板传播时不同频率的衰减程度不 同,使得子载波间幅度偏差变大,影响解调结果。 在图11中,中心频率为200 kHz和250 kHz的子载 波主瓣频率内信号幅度分别为 3.293×10^{-3} V和 2.11 × 10⁻³ V,信号幅度间的比值为1.56;子载 波主瓣频率内信号能量值分别为1.726 × 10⁻¹ J 和7.510 × 10⁻² J,信号的能量差为9.75 × 10⁻² J。 经过压电片扫频曲线进行补偿后,两个子载波 主瓣频率内信号幅度分别变为2.984 × 10⁻³ V和 3.293 × 10⁻³ V,信号间的比值变为0.91;两个子载 波主瓣频率内信号能量值分别变为 1.726×10^{-1} J 和 1.676×10^{-1} J,信号的能量差值变为 5×10^{-3} J。

根据以上结果可知,通过压电片扫频曲线补偿 兰姆波信号的格兹尔算法,子载波主瓣频率内的信 号幅度和能量值得到补偿,子载波幅度的比值接近 1。基于此,可以设置合适的阈值,通过对信号幅度 和能量进行阈值判决,解调出所传输的信息。









图 9 兰姆波直达波信号时域与频域图







Fig. 10 Spectrogram of the Lamb's wave direct wave signal and the compensated signal spectrogram



图 11 兰姆波直达波信号格兹尔算法结果图及补偿后的结果图

Fig. 11 Plot of the results of the Gerzel algorithm for the Lamb's wave direct wave signal and the compensated results

$\mathbf{2.3}$ 直达波模态混叠对解调的影响

实验中,激励端压电片激励的不同模态的兰姆 波波包在经过一段距离的传播后,会在接收端压电 片处发生混叠。混叠有两种情况,一种是直达波的 不同模态的波包发生混叠;另一种是边界反射波与 直达波发生混叠。兰姆波直达波So模态和Ao模态 波包分离对解调的影响已经在上述章节进行了分 析,下面改变激励压电片和接收压电片的布置位置, 使激励压电片与接收压电片间距分别变为300 mm 和700 mm,截取与2.2节中相同时长的信号,分析 直达波So模态和Ao模态波包混叠与直达波Ao模 态和反射波So模态波包混叠对解调的影响。

2.3.1 直达波 S_0 模态和 A_0 模态对解调的影响

在搭建的实验平台基础上,保持激励压电片的 位置不变,改变接收压电片的位置,首先使激励压电 片与接收压电片间距缩小至300 mm,分析直达波 S₀模态波包和A₀模态波包混叠对兰姆波频分复用

无线数据传输的影响,此时,兰姆波信号的时域和时 频图如图12所示。

从图12中可以看到,兰姆波直达波波包与反射 波 S_0 模态波包可以很明显的区分,直达波波包中 S_0 模态波包和Ao模态波包发生了混叠。对直达波信 号进行频域分析结果如图13和图14所示。

由图13和图14可知,当So模态直达波与Ao 模态直达波发生混叠时,子载波的主瓣频率内 的信号幅度变化较小,中心频率为200 kHz和 250 kHz的子载波主瓣频率内的信号最大幅度分别 为3.4×10⁻³ V和2×10⁻³ V,信号幅度间的比值为 1.7; 子载波主瓣频率内信号能量值为1.944×10⁻¹ J 和7.17×10⁻² J,能量间的差值为1.227×10⁻¹ J。使 用压电片扫频曲线对信号进行补偿后,中心频率为 200 kHz 和 250 kHz 的子载波主瓣频率内的信号最 大幅度分别变为3.4×10⁻³ V和3.2×10⁻³ V,信号 幅度间的比值为1.06,相应子载波主瓣频率内信号 的能量值变为1.909×10⁻¹ J和1.689×10⁻¹ J。



图 12 兰姆波直达波 So 模态波包和 Ao 模态波包混叠时信号时域图及时频图





图13 兰姆波混叠信号及补偿后信号的频谱图





图 14 兰姆波混叠信号格兹尔算法结果图及补偿后的结果图

Fig. 14 Plot of the results of the Gerzel algorithm for the Lamb wave-mixed signal and the compensated results

从计算结果中可以看到,当S₀模态直达波与 A₀模态直达波发生混叠时,两个子载波主瓣频率内 信号幅度和能量也都存在不同程度的变化,使用压 电片扫频曲线进行补偿后,两个子载波主瓣频率内 信号幅度和能量间的差值变小,补偿后的信号幅度 比值更接近1,信号能量差值变为 2.2×10^{-2} J。与 兰姆波S₀模态和A₀模态分离时的信号相比,子载 波主瓣频率内的信号最大幅值和能量值有所增加, 但经过补偿后的子载波主瓣频率内的信号幅度和 能量差值减小。因此,当兰姆波S₀模态直达波与 A₀模态直达波发生混叠时,对传输数据的解调影响 较小。

(a) 压电片扫频曲线与混叠信号频谱图

2.3.2 直达波 A_0 模态和反射波 S_0 模态

将接收端压电片移动至与激励端压电片相距 700 mm处的位置,分析兰姆波S₀模态反射波与直 达波A₀模态波包发生混叠对频分复用数据传输的 影响,此时,兰姆波信号的时域和时频图如图15 所示。 图15为边界反射波S₀模态波包和直达波A₀ 模态波包发生混叠时的信号时域和时频图,从图中 可以看到,直达波S₀模态波包和A₀模态波包分离, 而直达波A₀模态波包和反射波S₀模态波包有部分 混叠。图16和图17分别是使用傅里叶变换和格兹 尔算法的信号频域图。

(b) 经过补偿后的混叠信号频谱图

由图 16 和图 17 可知, 当直达波 A_0 模态波包与 反射波 S_0 模态波包发生混叠时, 子载波主瓣频率 内的信号幅度发生了较大程度的变化, 中心频率为 200 kHz 和 250 kHz 的子载波主瓣频率内的信号最 大幅度分别为 4.8×10^{-3} V和 2.1×10^{-3} V, 信号幅 度间的比值为 2.29, 子载波主瓣频率内信号能量值 为 1.881×10^{-1} J和 4.34×10^{-2} J。使用压电片扫 频曲线对信号进行补偿后, 中心频率为 200 kHz 和 250 kHz 的子载波主瓣频率内的信号最大幅度分别 变为 4.8×10^{-3} V和 3.1×10^{-3} V, 信号幅度间的比 值变为 1.55, 相应的信号能量为 2.604×10^{-1} J和 1.476×10^{-1} J。

根据实验结果,可知当直达波A0模态波包与

反射波S₀模态波包发生混叠时,子载波主瓣频率 内的信号幅度和能量发生较大程度的变化。与前 两种状态兰姆波信号进行对比,直达波A₀模态波 包与反射波S₀模态波包发生混叠后的子载波信号 幅度差值和能量差值最大,不利于传输数据的解 调结果,但由于子载波主瓣频率外的信号幅度值 小,所以仍可通过设置合适的阈值解调出所传输 的数据。



图 15 直达波 Ao 模态波包和反射波 So 模态波包混叠时信号时域图及时频图

Fig. 15 Time domain and time-frequency diagrams of the signal when the direct wave A_0 modal wave packet and the reflected wave S_0 modal wave packet are mixed











Fig. 17 Plot of the results of the Gerzel algorithm for Lamb wave-mixed signals and the results after compensation

1295

3 结论

本文构建了兰姆波频分复用激励信号设计模型,研究了平板中频分复用方式传输数据方法。通过实验测试得到了压电片扫频曲线,基于此设计了 兰姆波激励信号调制和解调方案,开展了传输两位 信息的兰姆波通信实验,讨论了兰姆波不同模态波 包信号混叠对兰姆波声通信的影响。得到的主要结 论如下:

(1)构建了兰姆波直达波S₀模态波包和A₀模态波包分离时的平板频分复用激励信号模型,通过输入平板材料参数、平板长度和压电片位置信息及 扫频曲线等信息,得到频分复用激励信号时长以及 子载波中心频率和数目等信息,为频分复用激励信 号的设计提供了理论支持。

(2)使用格兹尔算法可以快速得到信号频谱中的幅度信息,再通过压电片扫频曲线进行补偿,结合频谱幅度阈值与信号能量阈值,可以有效地解调出所传输的信息。

(3) 在平板频分复用兰姆波通信系统中,接收 兰姆波信号出现直达波波包模态混叠时,子载波主 瓣频率内的子载波信号幅度和能量的最大值分别 可达3.4×10⁻³ V和1.909×10⁻¹ J,子载波间的幅 度比值为1.7,相应的能量差值为2.2×10⁻² J,在 兰姆波不同模态波包混叠情况中,载波间的差值最 小,有利于传输数据的解调;接收兰姆波信号出现 直达波A₀模态波包和反射波S₀模态波包混叠时, 子载波主瓣频率内的子载波信号幅度和能量的最 大值可达4.8×10⁻³ V和2.604×10⁻¹ J,子载波间 信号幅度间的比值为2.29,相应的信号能量差值为 1.128×10⁻¹ J,在兰姆波不同模态波包混叠情况中, 载波间的差值最大,影响传输数据的解调。

本文主要探讨了单次传输情况下兰姆波频分 复用信号的调制与解调方法。下一步的工作将对连 续传输模式下兰姆波频分复用信号的调制和解调 方法进行研究,以进一步提升兰姆波通信系统的传 输效率和通信质量。

参考文献

 张海燕,马世伟,冯国瑞,等.兰姆波结构健康监测中的概率 损伤成像[J].声学学报,2012,37(4):401-407. Zhang Haiyan, Ma Shiwei, Feng Guorui, et al. Probability damage imaging in Lamb wave structural health monitoring[J]. Acta Acustica, 2012, 37(4): 401–407.

- [2] 范佳伟,李光海,王强. 铝板裂纹缺陷兰姆波阵列瞬时相位包络成像及补偿 [J]. 应用声学, 2019, 38(6): 993–998.
 Fan Jiawei, Li Guanghai, Wang Qiang. Instantaneous phase envelope imaging and compensation in aluminum plate using array of Lamb waves[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(6): 993–998.
- [3] Primerano R A. High bit-rate digital communication through metal channels[D]. Philadelphia: Drexel University, 2010.
- [4] Jin Y, Ying Y, Zhao D. Data communications using guided elastic waves by time reversal pulse position modulation: experimental study[J]. Sensors, 2013, 13(7): 8352–8376.
- [5] 曾腾,李宇,张春华. 可重编程正交频分复用水声调制解调技术进展 [J]. 应用声学, 2018, 37(6): 963–970.
 Zeng Teng, Li Yu, Zhang Chunhua. The technical progress of orthogonal frequency division multiplexing reconfigurable and reprogrammable underwater acoustic modems[J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(6): 963–970.
- [6] 马璐, 李梦瑶, 刘淞佐, 等. 多波束分集深海远程正交频分复 用水声通信 [J]. 声学学报, 2022, 47(5): 579–590.
 Ma Lu, Li Mengyao, Liu Songzuo, et al. A multi-beam space diversity method for long-range underwater acoustic OFDM communication in deep water[J]. Acta Acustica, 2022, 47(5): 579–590.
- [7] Kexel C, Maetz T, Malzer M, et al. Digital communication across orthotropic composite components using guided waves[J]. Composite Structures, 2019, 209: 481–489.
- [8] 徐云飞,孙永顺,丁晓喜,等. 基于 Lamb 波的数据传输与缺陷检测同步实现方法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 24–31. Xu Yunfei, Sun Yongshun, Ding Xiaoxi, et al. A synchronous implementation method of data transmission and defect detection based on Lamb waves[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 24–31.
- [9] De Marchi L, Marzani A, Moll J, et al. A pulse coding and decoding strategy to perform Lamb wave inspections using simultaneously multiple actuators[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 91: 111–121.
- [10] Kexel C, Mäzer M, Moll J. Guided wave based acoustic communications in structural health monitoring systems in the presence of structural defects[C]//2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). IEEE, 2018: 1–4.
- [11] Moll J, de Marchi L, Marzani A. Transducer-to-transducer communication in guided wave based structural health monitoring[C]//Non-Destructive Testing, 19th World Conf, 2016: 1–8.
- [12] De Marchi L, Marzani A, Moll J. Ultrasonic guided waves communications in smart materials: the case of tapered waveguides[C]//Structural Health Monitoring, 8th Euro-

pean Workshop, 2016: 1–8.

- [13] Zonzini F, De Marchi L, Testoni N, et al. Direct spread spectrum modulation and dispersion compensation for guided wave-based communication systems[C]//2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). IEEE, 2019: 2500–2503.
- [14] Xu Y, Li Q, Lin W, et al. Lamb waves-based sparse distributed penetrating communication via phaseposition modulation for enclosed metal structures[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(12): 11418–11429.
- [15] Kexel C, Testoni N, Zonzini F, et al. Low-power MIMO guided-wave communication[J]. IEEE Access, 2020, 8: 217425–217436.
- [16] Malzer M, Kexel C, Maetz T, et al. Combined inspection and data communication network for Lamb-wave structural health monitoring[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019, 66(10): 1625–1633.
- [17] 李一博, 刘圆圆, 芮小博. 板状材料上加强筋的几何形状对兰姆波透射特性的影响 [J]. 声学学报, 2019, 44(2): 231-240.
 Li Yibo, Liu Yuanyuan, Rui Xiaobo. Effects of stiffeners on transmission of Lamb waves in palte-like structures[J]. Acta Acustica, 2019, 44(2): 231-240.
- [18] Zonzini F, De Marchi L, Testoni N, et al. A structural-aware frequency division multiplexing technique for acoustic data communication in SHM applications[C]//European Workshop on Structural Health Monitoring: Special Collection of 2020 Papers-Volume 1. Springer International Publishing, 2021: 769–778.
- [19] Zonzini F, Testoni N, Marzani A, et al. Low depth time re-

versal modulation technique for ultrasonic guided wavesbased communications [C]//2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). IEEE, 2020: 1–4.

- [20] Testoni N, de Marchi L, Marzani A. A stamp size, 40 mA, 5 grams sensor node for impact detection and loca-tion[C]//European Workshop on SHM, 2016: 1–8.
- [21] Gao D, Wang Y, Wu Z, et al. Structural health monitoring technology for a full-scale aircraft structure under changing temperature[J]. The Aeronautical Journal, 2014, 118(1210): 1519–1537.
- [22] Kexel C, Maetz T, Mlzer M, et al. Ultrasonic data transmission across metal structures affected by environmental conditions[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 490: 115691.
- [23] Bahouth R, Benmeddour F, Moulin E, et al. Transmission of digital data using guided ultrasonic waves in solid plates[C]//Proceedings of Meetings on Acoustics ICU. Acoustical Society of America, 2019, 38(1): 055008.
- [24] Bahouth R, Benmeddour F, Moulin E, et al. Lamb wave wireless communication in healthy plates using coherent demodulation[J]. International Journal of Electronics and Communication Engineering, 2021, 15(7): 436–440.
- [25] Bahouth R, Benmeddour F, Moulin E, et al. Wireless communication using ultrasonic guided waves in healthy and defected plates[C]//Forum Acusticum, 2020: 23–29.
- [26] 马璐, 刘淞佐, 乔钢, 等. 水声正交频分复用异步多用户接入 方法 [J]. 声学学报, 2017, 42(4): 436–444.
 Ma Lu, Liu Songzuo, Qiao Gang, et al. Asynchronous multiuser reception for underwater acoustic orthogonal frequency division multiplexing communications[J]. Acta Acustica, 2017, 42(4): 436–444.