

# 短脉冲双频换能器超声成像系统研究

刘铁铭, 蔡弈奇

(北京航空航天大学 北京 100083)

**摘要:** 超声成像系统包括完成信号发射、接收的超声换能器, 产生预设电激励信号和信号传输的硬件系统和后期软件处理系统, 本课题研究内容比较完整地覆盖了短脉冲超声系统的各个模块。在医学超声成像中, 更短的超声脉冲宽度意味着更高的轴向分辨率和更宽的频域带宽, 但是为了保证检测深度, 不能通过提升超声信号的中心频率的方式缩短脉冲宽度。因此, 在提高超声信号的相对带宽和减少单个脉冲长度方面进行了大量研究。本项目提出一种能够产生宽频短脉冲信号的 1MHz-3MHz 双频堆叠式超声换能器。不同频率的超声波信号能够同时产生, 并且在超声换能器前方较大区域内合成为准单极超声脉冲, 该双频换能器具有通过阵列设计实现波束控制的可能。

**关键词:** 超声成像;双频超声换能器;宽带超声信号;短脉冲超声

## Short pulse dual frequency transducer ultrasound imaging system

Liu Tieming, Cai Yiqi

(Beihang University, Beijing 100083)

**Abstract:** The ultrasound imaging system includes the ultrasound transducer that completes the signal transmission and reception, the hardware system that generates the preset electrical excitation signal and signal transmission, and the post-processing software system. This research covers each module of the short pulse ultrasound system in a relatively complete way. In medical ultrasound imaging, a shorter ultrasound pulse width means higher axial resolution and wider frequency domain bandwidth, but the pulse width cannot be shortened by means of boosting the center frequency of the ultrasound signal in order to ensure the detection depth. Therefore, a lot of research has been conducted to improve the relative bandwidth of ultrasound signals and reduce the individual pulse length. In this project, we propose a 1MHz-3MHz dual-frequency stacked ultrasonic transducer capable of generating a broadband short pulse signal. Ultrasonic signals of different frequencies can be generated simultaneously, and quasi-monopolar ultrasonic pulses are synthesized in a larger area in front of the ultrasonic transducer, and this dual-frequency

transducer has the possibility of beam control by array design.

**Keywords:** ultrasound imaging; dual frequency ultrasound transducer; broadband ultrasound signal; short pulse signal

## 1 传感器设计背景和应用价值

设计背景：医学超声成像的质量能够从多个方面进行改善，利用宽频短脉冲超声信号进行成像是一种有效的方案。超声成像的轴向分辨率是由时域上的超声脉冲宽度决定的，更短的脉冲宽度意味着轴向上更高的分辨能力，也就意味着更高的成像质量。提升超声换能器的中心频率是一种缩短脉冲长度的方案，但是超声波频率的提升会使得能量损耗增加，导致探测深度减小。在不改变中心频率的情况下缩短脉冲宽度，可以有效提升绝对带宽和相对带宽，这有利于获取更多的原始信息进行分析来改善成像效果。

短脉冲超声信号在频域上的表现为宽带特性，宽带特性意味着可以通过超声换能器获得更多的信息，利用这一特性也可以提升成像质量。例如利用谐波进行成像和利用频谱进行图像分析。引入超声造影剂的谐波成像利用超声回波信号中因为非线性传播产生的非基频信号进行不同频段下的成像，需要超声换能器能够工作在较宽频段下，往往通过层叠结构、并列结构或者其他结构将多种频率的压电材料做成双频或者多频换能器来实现。在谐波成像的基础上，利用超声回波信号的频谱进行特征分析需要宽频超声信号才提供较多的频域上的信息才能实现。因此，进行宽频短脉冲超声信号进行研究，具有较高的研究价值。

应用价值：双频堆叠式超声换能器能够产生宽频短脉冲超声信号，可以同时发射不同频率的超声信号，并且在超声换能器前方较大区域内合成单极超声脉冲。双频超声换能器具备发射短脉冲的能力意味着其在轴向上具有更高的分辨能力，成像的质量会提高。同时由于其具有两个频带的频谱特性，所以在超声造影剂的配合下实现谐波成像。

## 2 创新点与优势

本项目探究了利用单个层叠式压电超声换能器产生两个不同频率的超声子脉冲，并在空间上将这两个信号合成为宽频短脉冲超声信号的方案。本项目提出了一种堆叠两层压电层的双频超声换能器设计，在产生两个压电层不同本征频率的超声波脉冲信号的基础上，再将两个不同频率的压电层作为一个整体进行激励产生第三个频率的超声波脉冲信号，获得超声子脉冲信号合成的短脉冲超声信号。

相比于在时域上进行多波束合成短脉冲的方案，如使用多种频率、多个压电超声换能器从不同的空间方向发射，才只在空间一点上实现了短脉冲超声波的合成，双频超声换能器具有体积小、结构简单、易于制作成阵列等优点。

本课题的研究将集中于利用层叠式设计多频超声换能器，利用多个频段的超声脉冲合成为宽频短脉冲超声信号来解决相关问题。

### 3 实现方案简介

#### 3.1 设计原理

在医学超声中，多采用伸缩振动模式（分为厚度振动、长度振动和径向振动），在本课题的研究中，使用压电材料的厚度伸缩振动模式。这种方式的实现需要保持压电材料的极化方向和电场方向平行，产生的超声信号为纵波信号，振动方向与超声传播方向一致。考虑到高频压电片产生的超声波在低频压电片中的传播相较于低频压电片产生的超声波在高频压电片中传播，损耗因子将变成 2 倍，又因为低频压电片的厚度为高频压电片的 3 倍，所以传输路径也变成 3 倍，整体损耗因子将会扩大成为 6 倍，所以选择高频压电层放在距离负载更接近的位置。

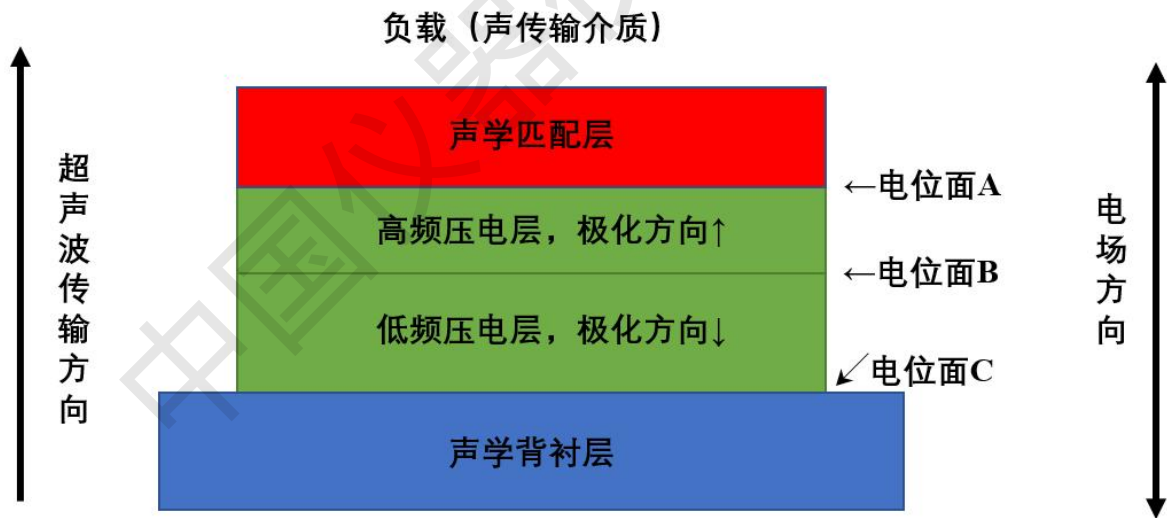


图 1 短脉冲双频超声换能器基本结构剖面图

因此，初步设计的超声换能器剖面图如图 1 所示，高频压电层和低频压电层的电极化方向相反，在压电层两个表面加外接电激励时，可以在压电片中产生平行于极化方向的电场。

考虑到人体中常见的介质声阻抗都与压电陶瓷材料差异巨大，本项目中的压电片均采用 1-3 型压电复合材料，1-3 型压电复合材料的结构如图 2 所示，在有机物基底中，均匀分布有条状纤维无机压电材料。

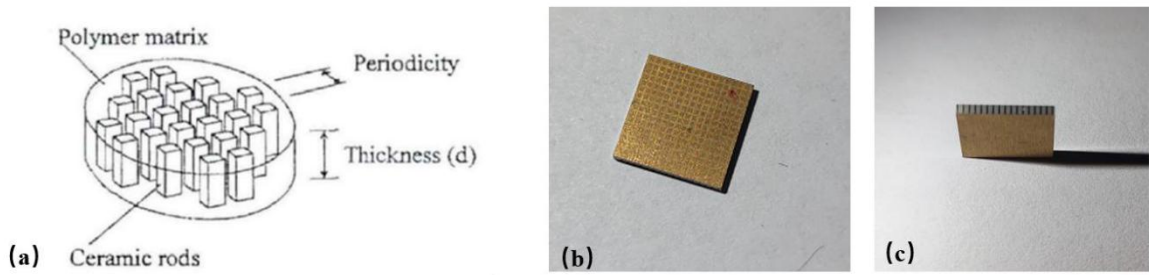


图2 1-3型压电复合材料图

a: 1-3型压电复合材料示意图; b、c: 1-3型压电复合材料实物图

本项目采用KLM模型将超声换能器的各部分结合起来统一进行超声波形的仿真,KLM模型是一种将超声换能器结构等价变换为电路模型,从而更好地进行超声换能器的结构设计的理论模型。匹配层是插在压电层和负载之间的介质层,从物理上可以考虑为串联传输线,因此可以在传输线理论的基础上,用匹配层提供任何类型的电阻抗的匹配。表1为本项目设计的短脉冲双频超声换能器KLM仿真参数。

表1 短脉冲双频换能器KLM模型仿真参数

名称	材料	厚度 (mm)	声阻抗 (MRayl)
高频压电层	1-3型压电复合材料	0.53	12.8
低频压电层	1-3型压电复合材料	1.6	12.8
匹配层	1 $\mu$ m 粒径二氧化硅/环氧树脂	0.23	4.5
背衬层	14 $\mu$ m 粒径钨粉/环氧树脂	20.0	11.3

具体的仿真模型结构如图3所示,下文将展示在以上参数下进行的KLM仿真结果。

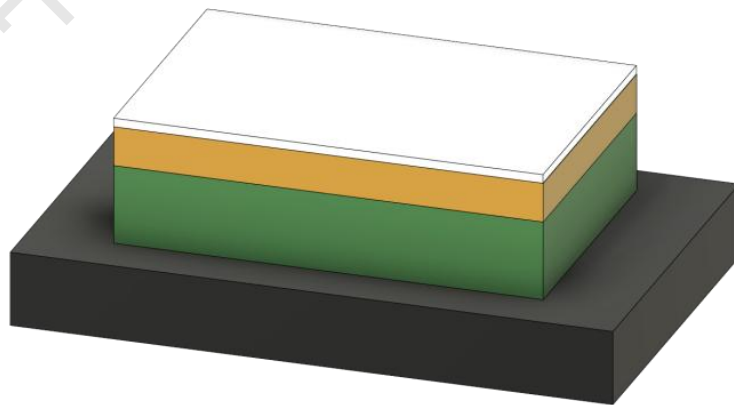


图3 短脉冲双频换能器结构示意图

图 4 展示了 1MHz 压电层时域信号及其频谱，图 5 展示了 3MHz 压电层时域信号及其频谱。

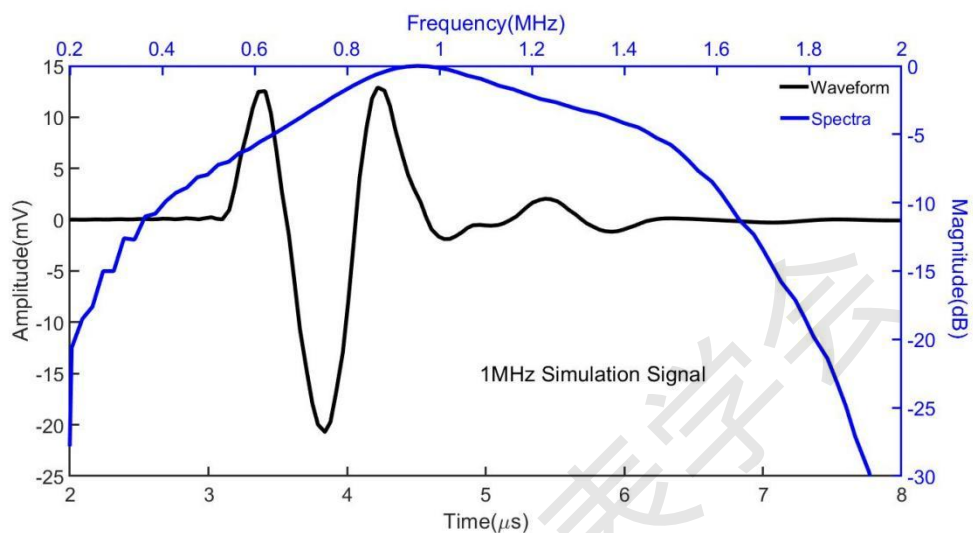


图 4 短脉冲双频换能器 1MHz 压电层仿真结果

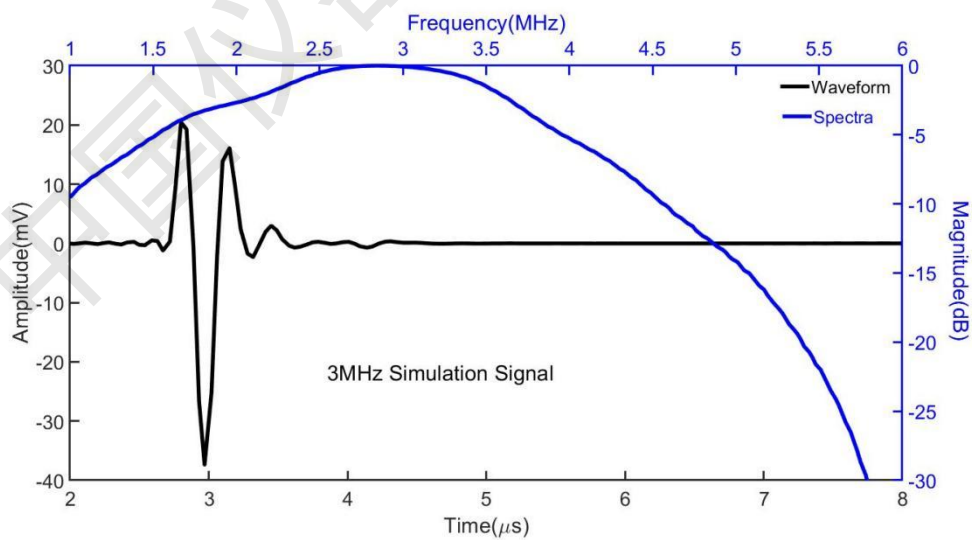


图 5 短脉冲双频换能器 3MHz 压电层仿真结果

图6展示了1MHz和3MHz的脉冲激励信号在时域以及频域上合成短脉冲的仿真结果。可以看出合成的短脉冲信号在时域上信号幅值是1MHz和3MHz信号的叠加，从频谱上可以看出合成的短脉冲信号分别对1MHz和3MHz的频率敏感，可见短脉冲的合成理论上可行的。

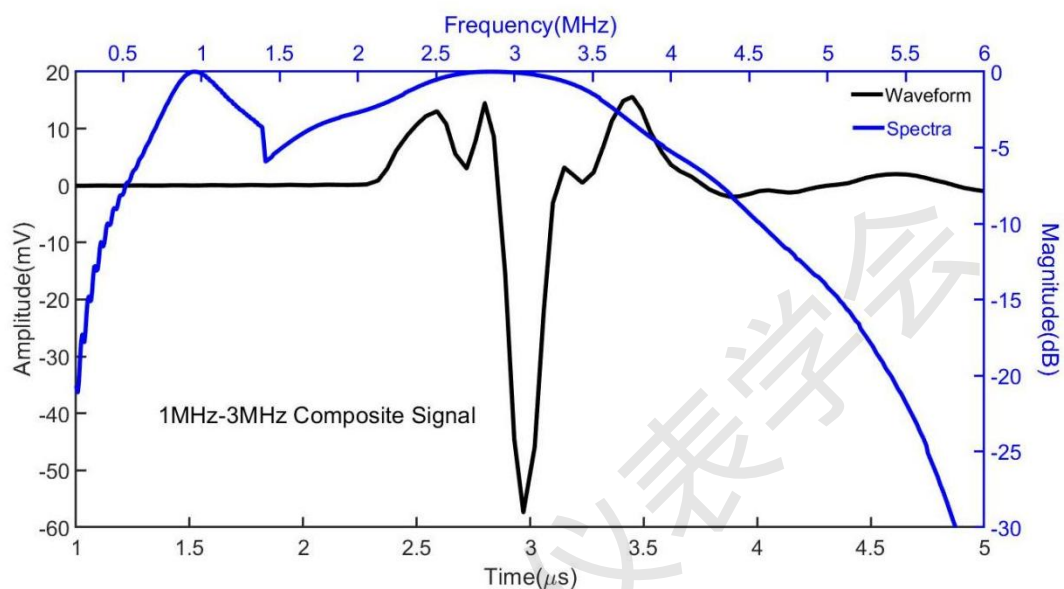


图6 短脉冲双频换能器 KLM 模型合成短脉冲激励仿真结果

### 3.2 设计方法

根据前文 KLM 的仿真参数进行制作短脉冲双频换能器，换能器的实物如图7所示。

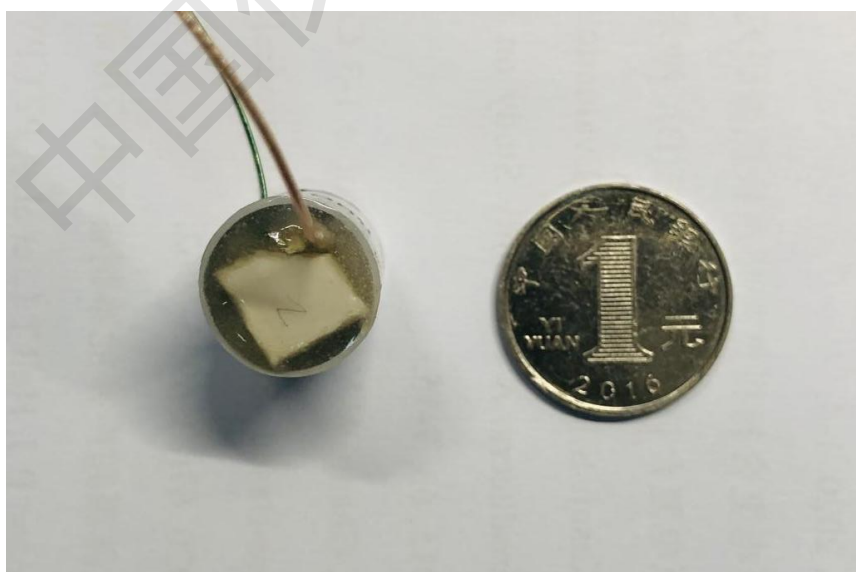


图7 短脉冲双频换能器实物图

短脉冲双频换能器需要实现的最重要的功能是利用自身多个模式产生的不同频率的超声波，在时域上合成为更窄的超声脉冲，因此需要对该换能器产生的不同频率的超声波进行测试并进行合成。

脉冲激励测试是指给予换能器一个时域上比较短的激励电信号，检测换能器在短脉冲激励下的响应。测试装置如图 8 所示，测试系统中的超声波接收器由水听器（生产商为 ONDA, 型号为 AH-2010-100）完成并传输至示波器。激励源采用双通道任意波形发生器（生产厂商为 UNI-T, 型号为 UTG2062B）作为激励源，该波形发生器可以分别调整双通道的参数发出单个正弦波信号作为激励电信号，能够解决多通道发射信号以及调整电信号相位、延时的需求。



图 8 脉冲激励测试实物图

在对换能器进行激励后，用水听器接受换能器发射的信号，同示波器进行数据采集。图 9 展示了换能器发射的 1MHz、3MHz 超声波信号。所有信号都经过相应的低通滤波器处理。

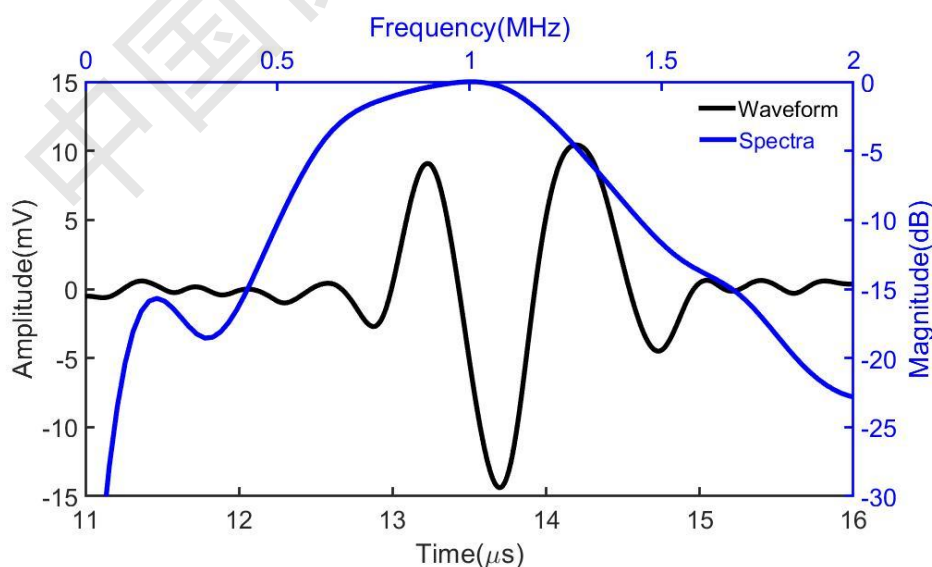


图 9 短脉冲双频换能器 1MHz 脉冲激励测试结果



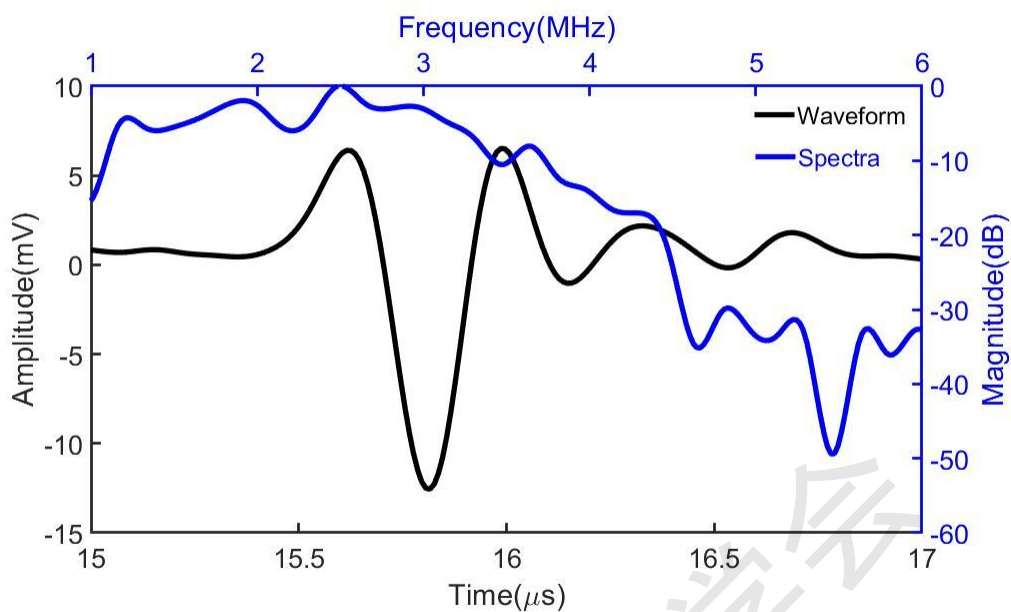


图 10 短脉冲双频换能器 3MHz 脉冲激励测试结果

本项目的短脉冲换能器的优点在于它可以直接发射合成的短脉冲信号，而不需要多个换能器分别发射再后处理合成短脉冲。图 11 展示了换能器直接发射的短脉冲信号，与仿真结果相符合。

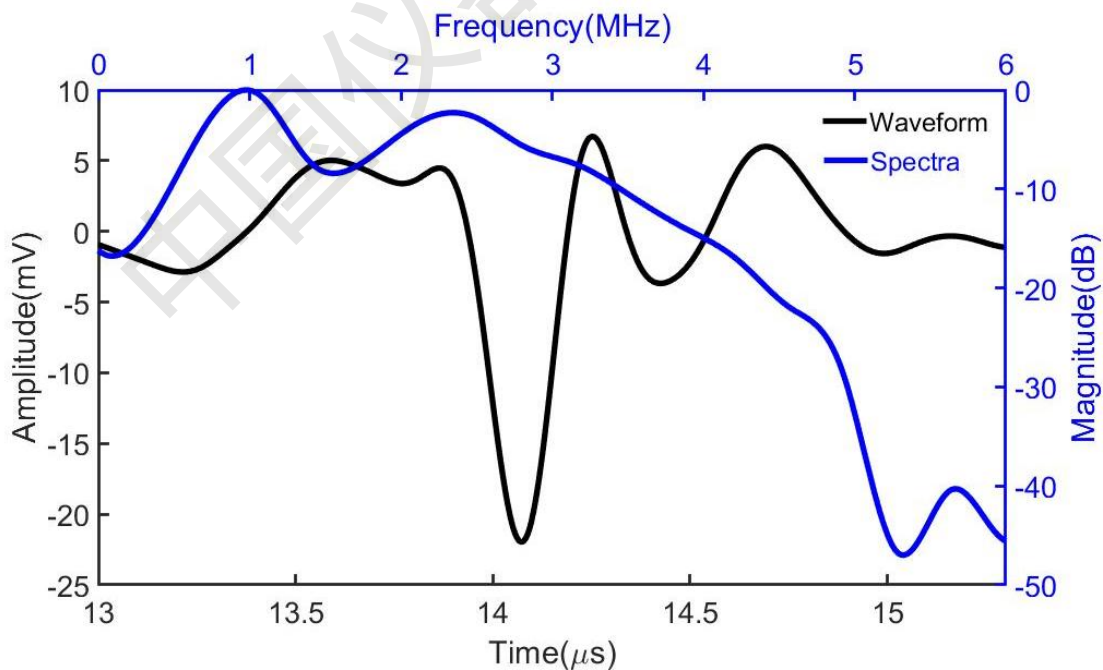


图 11 短脉冲双频换能器发射短脉冲测试结果



对脉冲激励测试结果进行分析可得，1MHz、3MHz 超声波半波宽度分别为  $0.412\mu\text{s}$ 、 $0.942\mu\text{s}$ ，合成的短脉冲信号的  $-6\text{dB}$  带宽为 105.95%。

### 3.3 实验验证过程

对待测物体进行 B 模式图像的成像实验，需要信号发射、接收的超声换能器，产生激励信号的信号发生系统，步进电机，示波器采集以及使用 Labview 软件进行数据采集的自动化。实验设置示意图如图 12 所示。实验流程大致如下：信号发生器分别发出中心频率为 1MHz 和 3MHz 的脉冲信号激励换能器发射超声波。换能器自身接受测试仿体反射回来的超声波通过示波器进行数据采集。使用 Labview 程序控制信号发生、信号采集和步进电机移动同步进行，保证数据准确。



图 12 实验设置示意图

实验前需要对扫描的次数，扫描的步长进行设置。根据测试仿体的尺寸，设置扫描次数为 1000 次，扫描步长为  $0.08\text{mm}$ ，超声换能器与测试仿体距离为  $5\text{cm}$ 。实验装置图如图 13 所示。

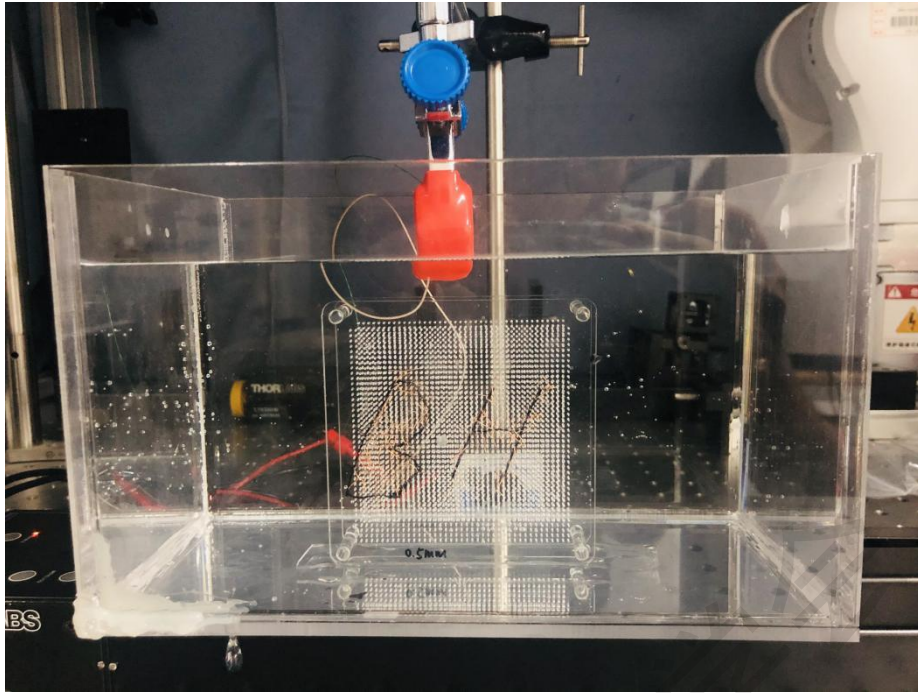


图 13 实验装置图

实验时利用 Labview 程序控制实验进行, 必须保证所有设备时钟一致才可以保证数据的准确性, 本实验所用的 Labview 程序如图 14 所示。



图 14 Labview 程序框图

换能器扫描完后, 根据得到的 1MHz 和 3MHz 的信号重建图像, 同时利用 1MHz 和 3MHz 的信号增加延迟和相位调节合成短脉冲信号同时重建图像。

### 3.4 成像实验结果

首先对扫描过程中的一条扫描线进行观察，一共有 1000 列扫描数据线，采样频率为 25MHz。以第 500 条扫描线为例。其中图 15 为 1MHz 接收信号，图 16 为 3MHz 接收信号，图 17 为合成的短脉冲信号。

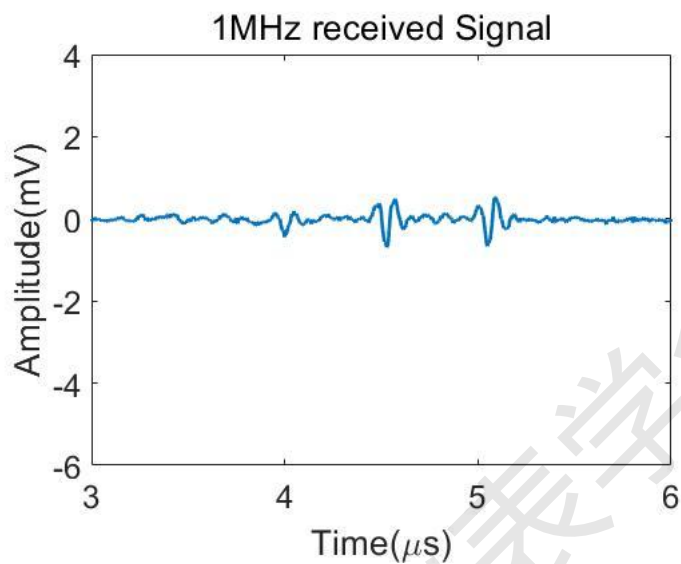


图 15 短脉冲双频换能器 1MHz 成像信号

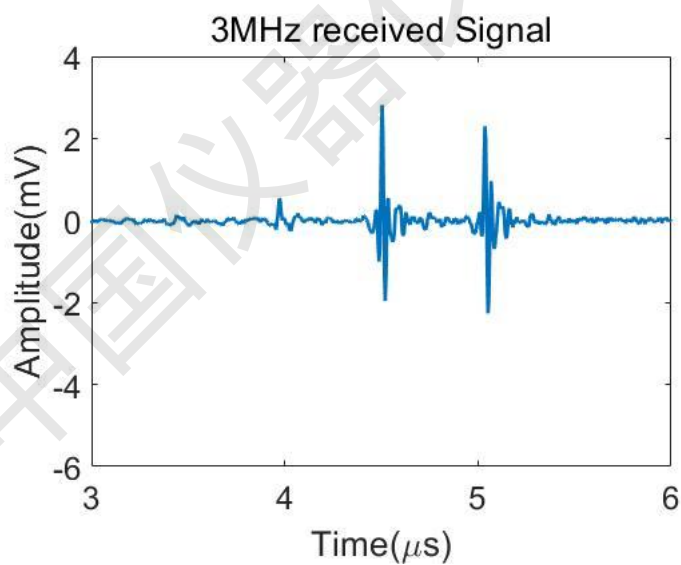


图 16 短脉冲双频换能器 3MHz 成像信号

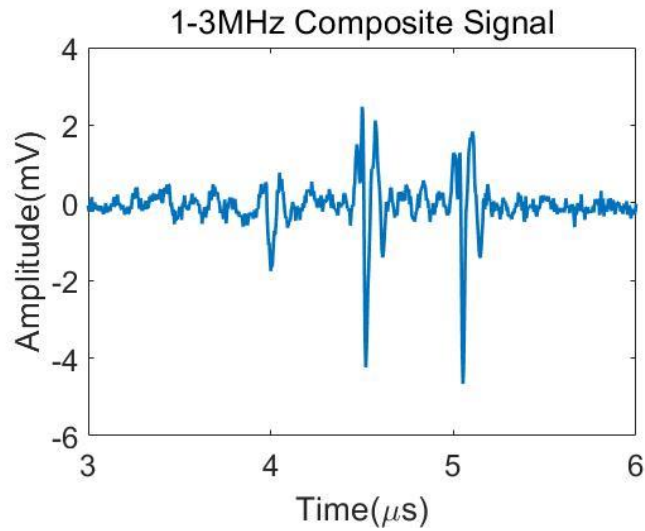
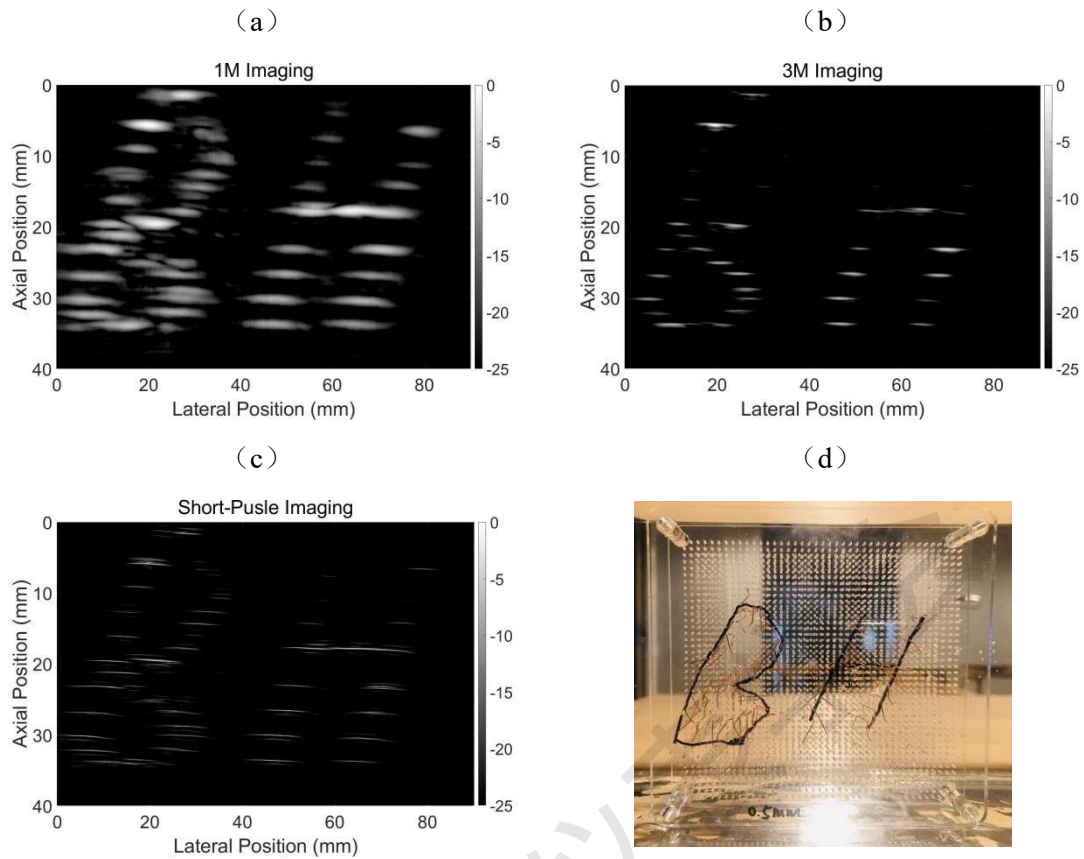


图 17 短脉冲双频换能器短脉冲成像信号

经过 1000 次扫描后，对所有的接收信号进行滤波和取包络，然后进行图像重建。图像的纵向成像深度为 0~4cm,横向成像范围为 0~9cm。对重建的图像进行对数压缩后，其结果如图 18 所示。图 18 (a) 为 1MHz 信号重建图像，图 18 (b) 为 3MHz 信号重建图像，图 18 (c) 为合成短脉冲重建图像，图 18 (d) 为测试字样为北航简拼“BH”的测试仿体。所有图像的动态范围调整到 25dB。



**图 18 短脉冲双频换能器“BH”成像信号**

**a: 1MHz 成像信号; b: 3MHz 成像信号;**

**c: 合成短脉冲成像信号; d: “BH”字样测试仿体**

对成像结果进行分析,本项目制作的短脉冲双频换能器主要是可以提高图像的纵向分辨率,因为脉冲长度越短,纵向分辨率越高。对仿体同一处的铜丝进行纵向分辨率的计算,如图 17 所示,实验测得 1MHz、3MHz、合成短脉冲纵向分辨率分别为 0.85mm、0.73mm、0.13mm。可见合成短脉冲可以极大地提高纵向分辨率,相较于 1MHz 提升了 6.5 倍,相较于 3MHz 提升了 5.6 倍。

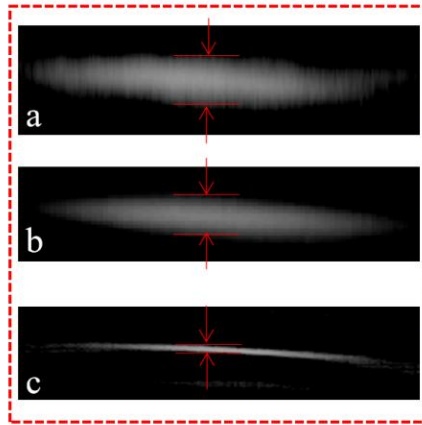


图 19 1MHz、3MHz、合成短脉冲纵向分辨率对比

### 3.5 总结

本项目仿真设计、制造并测试了短脉冲双频换能器，对于图像的纵向分辨率有较大的提升效果。此超声换能器可以自身发射短脉冲信号而不需要多个换能器进行信号叠加。由于极大地缩短了发射脉冲的长度，所以可以对图像的纵向分辨率有明显的提升效果。由于单个短脉冲双频换能器即可达到发射短脉冲的效果，而且其在尺寸上可以做到很小，所以有潜力做成短脉冲双频成像阵列，在超声成像的图像分辨率和成像深度两方面同时进行增强，有极大的应用价值。