

Application Note

使用对数检测器放大器进行超声波检测



Anant Sinha, Shreenidhi Patil

摘要

超声波检测使用频率高于人类听觉的声波（通常高于 20kHz）来检测物体、测量距离或判断某种物质是否存在。超声波检测的工作原理是：发送器发射超声波信号，信号在介质中传播，当其碰到任何物体时，部分信号会反射回来，部分信号会被吸收，而剩余的超声波信号则穿透物体。然后，接收器检测这种反射波或穿透波，并对其进行处理，以提取有用信息，例如飞行时间或信号在穿过材料时的衰减量。本文介绍了如何在接收信号链中使用 LOG300 等对数检测器来处理来自超声波接收器的信号，并应用于双进纸检测、材料检测、气泡计数器或流体检测、材料检测以及距离或接近检测等应用。

内容

1 引言.....	2
2 说明.....	2
2.1 超声波检测基础知识.....	2
2.2 超声波检测的优缺点.....	3
2.3 超声波传感器.....	3
2.4 传感器拓扑.....	4
2.5 盲区对最小距离的影响.....	5
2.6 传感器驱动.....	5
2.7 超声回波和信号处理.....	6
3 对数检测器放大器及其相对于传统运算放大器的优势.....	6
4 应用.....	7
4.1 双进纸和纸张厚度检测器.....	7
4.2 气泡检测器.....	9
4.3 材料检测.....	10
4.4 距离或接近检测.....	11
5 总结.....	13
6 参考资料.....	13

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

超声波检测技术利用高频声波来检测物体并测量距离，广泛用于各种应用，包括工业自动化、汽车系统和医疗应用。超声波传感器发出频率高于人类听觉范围的声波（通常高于 20kHz）。该系统主要由发送部分和接收部分组成。驱动超声波传感器主要有两种方法，一种是通过变压器驱动（需要更高的激励信号），另一种是直接使用 H 桥或放大器来驱动（需要相对较低的激励）。而在接收侧，可以使用不同类型的增益放大器（例如固定增益、可变增益、时变增益或对数增益放大器）进行信号处理。本文介绍了如何将对数检测器集成到超声波检测系统中来增强动态范围和提高灵敏度。通过使用对数检测器，超声波检测系统可以有效地处理弱回波和强信号等，从而确保测量可靠而准确。

2 说明

2.1 超声波检测基础知识

超声波是频率高于人耳听觉上限（大于 20kHz）的音波，属于声学的一个子学科。

超声波在物理性质上与正常或可听见的声音没有区别，只是人类听不到超声波。超声波可以进一步定义为在具有内部弹性力或粘性力的介质中传播的压力、应力、粒子位移和粒子速度的振荡，可以看作是在空气或其他弹性介质中的波动。

超声波可以通过空气、水和等离子体等介质传播，既可以以纵向波的形式传播，也可以以横向波的形式传播。超声波可以由超声源（例如通常使用压电材料制成的传感器的振动隔膜）生成，超声源在周围介质中产生振动。随着超声源继续使介质振动，振动以声速从超声源传播出去，从而形成超声波。在离超声源一定距离的地方，介质的压力、速度和位移随时间变化。

超声波的传播行为受介质密度与压力间关系的影响，而这种关系又受到温度的影响，并决定了声波在介质中的传播速度。介质的运动（如果介质正在运动）可以根据运动方向增大或减小声波的绝对速度。例如，如果超声波和流体沿同一方向移动，则超声波在流体中移动的传播速度可能会因流体的速度而增加。

如果超声波和流体沿相反方向移动，则声波的传播速度可能会因流体的速度而降低。介质粘度决定了声音的衰减率。对于许多介质（例如空气或水）而言，由于粘度引起的衰减可以忽略不计。但在橡胶、纸张等其他介质以及棉花等软材料中，较高的粘度会导致较大的声能损失。

虽然超声波的传输存在许多物理复杂性，但在接收点（如麦克风或超声波传感器），超声波可以简单地解释为具有频率或波长、振幅、声压或强度、声速和方向等特性的压力和时间。

声速取决于声波通过的介质，是材料的基本特性。声速与介质的体积模量与密度的比值平方根成正比。这些物理特性和声速随环境条件（如温度和湿度）而变化。

声压级或 SPL 定义如下：

$$L_p = 10 \log (p^2 / p_{ref}^2)$$

其中

$$P = \text{rms 声压 (Pa)} \quad p_{ref} = \text{基准压力, } 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

在空气中常用的基准声压是 20 微帕斯卡，在水中为 1 微帕斯卡。当声音通过介质时，声压会随着距离的增大而减小。在理想情况下，声压只会随着声波扩散而降低。然而，现实世界中的各种因素会进一步降低声压。

散射和吸收会产生额外的影响。散射是指声音朝原始传播方向以外的方向反射，而吸收是将声能转换为其他形式的能量。散射和吸收的综合效应称为衰减。超声波衰减是超声波在材料中传播时的衰减速率。

当边界两侧材料的声阻抗不同时，超声波会在边界处发生反射。材料的声阻抗定义为密度和声速的乘积。声阻抗对于确定具有不同声阻抗的两种材料边界处的声传输和反射、超声波传感器的设计以及评估声音在介质中的吸收情况而言非常重要。

声阻抗的这种差异通常称为阻抗失配。阻抗失配越大，在两种介质之间的接口或边界可以反射的能量百分比就越大。

超声波声纳横截面 (SCS) 用于衡量声纳对物体的可检测性。SCS 越大，表示物体更容易被检测到。物体将有限数量的声纳能量反射回声源。影响这一点的因素包括制造目标的材质、目标相对于所发出声纳信号波长的大小、目标的绝对大小以及目标的形状。

目标的形状还会影响入射角（声纳波束与目标特定部分接触时的角度）和反射角（反射光束离开目标接触部分时的角度）。物体的 SCS 是一个专门设计的反射球体的横截面积，该球体能够产生与该物体相同强度的反射。这个假想球体的尺寸越大，可产生的反射就越强。声纳目标的 SCS 是一个有效的面积，用于拦截发射的声纳功率，然后将该功率以各向同性方式散射回声纳接收器。

2.2 超声波检测的优缺点

与基于 IR 的其他检测技术相比，超声波检测具有多项优势。超声波传感器可以设计成有防水外壳，因此能够抵御潮气和雨水。超声波传感器在有污垢、灰尘和碎屑的环境中也能保持强大的性能，并且能够在高温和低温下运行。

与基于 IR 的传感器不同，超声波传感器能够以相同的精度检测不透明和透明物体，并且对浅色和深色物体具有相同的灵敏度。

然而，超声波检测有一个主要缺点，即超声波检测通常无法检测与传输介质具有相似声阻抗的物体。例如，在空气耦合应用中，超声波能量会穿透柔软的低密度物体，或被这些物体吸收或散射。

2.3 超声波传感器

超声波传感器通常是基于压电效应原理工作的压电式传感器，通过将压力、加速度、温度、应力或力的变化转换为电荷来进行测量。在发送信号时，超声波传感器将电输入信号转换为机械振动，从而生成超声波；在接收信号时，超声波传感器将由于超声波撞击传感器的有源元件而产生的机械振动转换回电能。

2.3.1 传感器结构

主要有两种类型的传感器：*顶部封闭式* 和 *顶部开放式*。

需要根据周围环境条件来选择类型。

表 2-1. 顶部封闭与顶部开放：优缺点

类型	顶部封闭	顶部开放
优势	<ul style="list-style-type: none"> 压电膜可防水（密封）、防热和防潮 结构设计可减轻 ESD 冲击 专为户外或恶劣环境而设计 	<ul style="list-style-type: none"> 压电膜直接与空气接触 提高接收器灵敏度 使用小驱动电压即可生成最大的 SPL 有大量可供购买的现成产品 低成本
缺点	<ul style="list-style-type: none"> 需要通过变压器实现大驱动电压 可供购买的现成产品选择有限 高成本 	<ul style="list-style-type: none"> 仅限在室内或受保护的环境中使用

2.3.2 传感器频率

大多数压电式超声波传感器都经过优化，可在特定的窄频带范围内工作，此频率称为谐振频率，具体取决于传感器的结构。对于大多数空气耦合应用，这个频率范围为 30kHz 至 480kHz，而对于液位检测应用，通常使用 1MHz 范围内的传感器。需要根据应用和要求来选择传感器频率。

随着频率的增加，分辨率和方向性也会提高，但与此同时，会减少声波信号能够传播的距离。这是因为当频率穿过介质时，与低频信号相比，高频信号的衰减要高得多。

表 2-2. 低频与高频：优缺点

类型	低频	高频
优势	<ul style="list-style-type: none"> 更大限度地提高远距离性能 有大量可供购买的现成产品 	<ul style="list-style-type: none"> 更大限度地提高分辨率（通常小于 5mm） 由于缩短了振铃衰减时间，因此单静态拓扑中的盲区很短 传输集中在前向
缺点	<ul style="list-style-type: none"> 单静态拓扑中的盲区很长 低分辨率（通常大于 5mm） 	<ul style="list-style-type: none"> 由于衰减更高，最大可检测距离减小 可供购买的现成产品选择有限

2.4 传感器拓扑

可以在两种不同的拓扑中配置传感器来发送和接收超声波信号：单静态或双静态。必须根据具体的应用类型来确定所用的拓扑。单静态拓扑是指单个传感器既发送回波，又侦听返回的回波。这是大多数应用中优选的低成本方法。单静态传感器拓扑的缺点是，传感器的激励振铃/衰减会产生盲区，并且该传感器拓扑在这段时间内无法检测反射的回波，因此会限制最小检测范围。在单静态配置中，可以通过添加阻尼电阻器来减小盲区。

另一种拓扑是双静态拓扑，这种拓扑使用了两个单独的传感器：一个用于发送、一个用于接收。这些拓扑的成本相对更高。如果我们需要测量信号穿过介质时发生的衰减，而反射的回波信号没有任何有用信息，通常使用这种拓扑。对于 ToF 应用，使用双静态方法的缺点是需要额外进行校准，因为设计人员在计算飞行时间时必须考虑接收器处传入回波的角度。

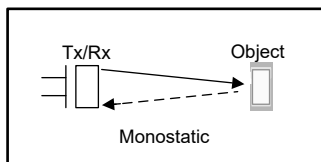


图 2-1. 单静态

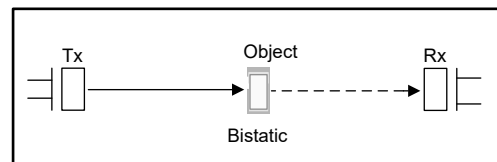


图 2-2. 双静态配置 1

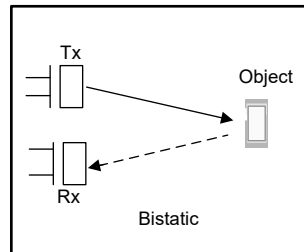


图 2-3. 双静态配置 2

2.5 盲区对最小距离的影响

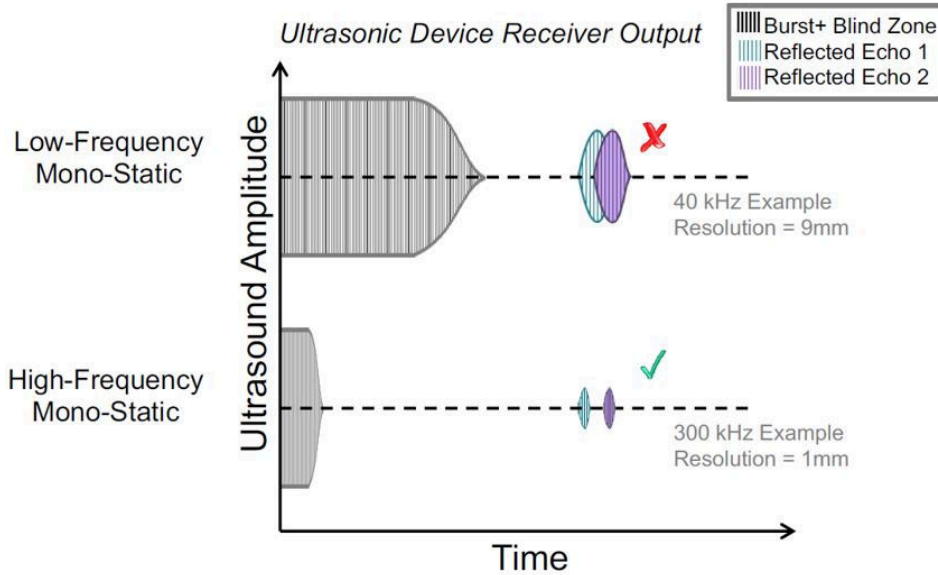


图 2-4. 盲区对最小距离的影响

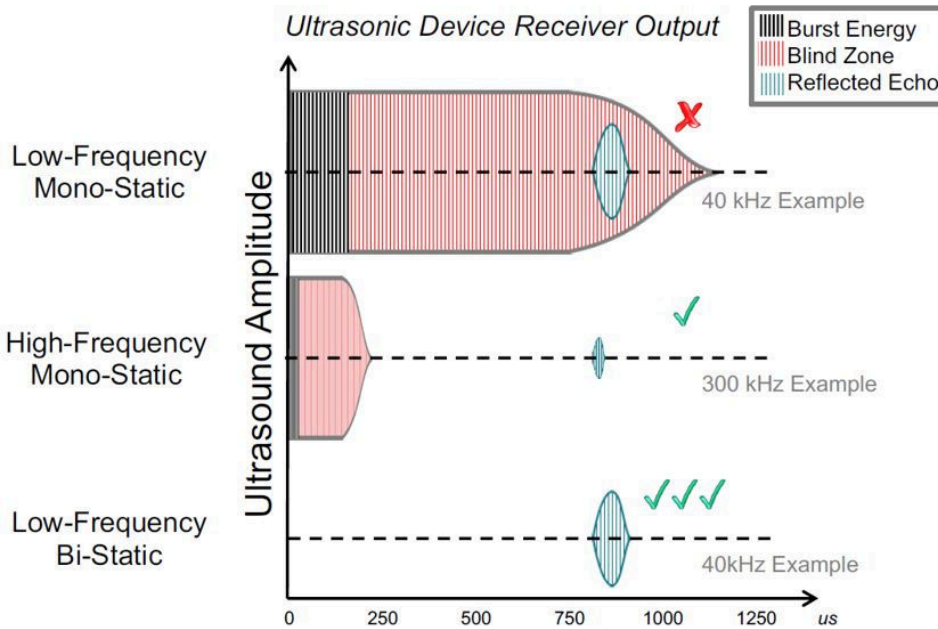


图 2-5. 多物体检测的准确度

2.6 传感器驱动

驱动超声波传感器主要有两种方法。第一种是变压器驱动，第二种是直接驱动，要选择哪种类型主要取决于激励传感器的电压要求。

顾名思义，变压器驱动方法使用升压变压器来驱动传感器。变压器的初级线圈由低压信号激励，次级侧（电压摆幅更高）驱动传感器。使用变压器驱动方法，可以使传感器激励电压超过 100Vpp，因此在声压级要求较高的场合，如需要测量或探测较远距离物体的应用场合，通常首选变压器驱动。

直接驱动方法使用 H 桥（全桥或半桥）驱动器或放大器直接驱动传感器。因此，最大激励电压受限于系统的电源。这些方法主要用于不需要大声压级的应用。

要选择的模式类型也取决于传感器的结构类型。许多顶部开放的传感器生成最大可传输声压级 (SPL) 不需要超过几十伏的电压，因此无需变压器，建议使用直接驱动模式。顶部封闭的传感器也可以在直接驱动模式下激励，但由于通常需要数百伏的电压才能生成最大可传输 SPL，因此传感器有效范围会受到限制。

表 2-3. 变压器驱动与直接驱动

类型	变压器	直接
优势	<ul style="list-style-type: none"> 能够更大幅度地提高顶部封闭传感器的驱动要求 (超过 100Vpp) 等效电路可以实现短距离的调谐/解调谐 提供固定和可调线圈类型 提供中心抽头推挽或单端输出 	<ul style="list-style-type: none"> 能够更大幅度地提高顶部开放传感器的驱动要求 能够为短距离应用驱动顶部封闭传感器 提供半桥或全桥驱动器 低成本和小尺寸
缺点	<ul style="list-style-type: none"> 大规模生产时需要额外校准和调谐 高成本和大尺寸 	<ul style="list-style-type: none"> 短距离调谐仅限于阻尼电阻器

2.7 超声回波和信号处理

TI 建议以正弦波或方波的中心频率驱动传感器，以实现更佳效果。大多数集成设计都有一个输出驱动器，它由低侧驱动器组成 (用于在变压器驱动情况下驱动变压器) ；或由采用 h 桥配置的 FET 组成 (用于直接驱动设计) 。传感器以谐振频率发出回声后，系统必须侦听传感器视场中的物体产生的回波。超声波系统通常会过滤回波，以去除噪声并在信号进入 ADC 之前对其应用增益。对超声波系统应用增益的一些方法如下：

2.7.1 数字增益或固定增益

对整个超声回波应用固定增益。该增益类型的主要缺点是，系统有时无法有效地处理宽范围的信号振幅，从而导致在检测非常弱和非常强的信号时性能不佳。

2.7.2 时变增益

所应用的增益取决于物体的远近。通常，时间上越晚的物体产生的回波响应越弱，时间上越早的物体产生的回波响应越强。为了解决这一问题，防止近距离信号饱和，并能够识别更远的物体，用户可以选择对系统应用增益，具体来说就是在较早的时间应用较小的增益，在较晚的时间应用较大的增益。这样用户就能够根据系统需求灵活地配置增益。

2.7.3 自动增益控制或对数放大器

对数放大器方法是一种在处理高振幅和低振幅输入信号时实现自动增益控制的方法。对数放大器根据对数刻度对输入信号应用增益，这有助于从微弱信号中获得更强的回波响应，同时也适当地对强信号应用增益但要防止饱和，类似于时变增益方法。虽然时变增益方法取决于物体在时间中的位置，但对数放大器取决于输入信号的实际回波，而不依赖于时间。

2.7.4 对数放大器与对数检测器

对数检测器与对数放大器之间的主要区别在于，检测器和放大器处理信号和特定应用的方式不同。对数放大器提供的输出与输入信号振幅的对数成正比。对数放大器旨在通过对数方式压缩输入信号来处理宽动态范围的输入信号。对数放大器通常用于需要信号压缩的应用，如射频信号处理、音频电平压缩和真 RMS 检测。对数检测器 (也称为解调对数放大器) 提供与输入信号包络的对数成正比的输出。对数检测器先对信号解调，然后对包络应用对数运算。对数检测器通常用于测量宽动态范围内的信号强度。

总之，虽然两个器件都进行对数运算，但对数放大器直接处理输入信号的振幅，而对数检测器则关注输入射频信号的包络。

本文的以下段落说明了如何在信号链的接收侧使用对数检测器，与各种超声波检测应用中的多增益级传统运算放大器配置相比，在输入灵敏度、动态范围、噪声和增益控制方面实现更出色的性能。

3 对数检测器放大器及其相对于传统运算放大器的优势

与传统运算放大器相比，使用对数检测器放大器进行超声波检测具有以下几项优势：

- 宽动态范围

对数检测器可以处理各种信号振幅，因此非常适合信号强度变化很大的应用。这在超声波检测中尤其有用，因为在超声波检测中，接收的信号强度会因距离、材料特性和表面纹理而变化。

- **更高灵敏度**
对数检测器可以检测信号振幅中非常微小的变化，从而提高超声波传感器的灵敏度。这对于检测传统运算放大器可能会错过的弱回波非常有用。
- **非线性输出**
对数检测器的输出与输入信号的对数成正比，这意味着输出可以将大量输入信号压缩成更小、更易于管理的输出范围，从而简化分析信号的过程。
- **降噪**
与多级固定增益放大器相比，对数检测器有助于降低噪声对信号的影响。由于对数检测器会压缩信号范围，因此能够使区分真实信号和噪声的过程变得更简单。

由于对数检测器具有这些优势，使得它成为许多应用的首选，尤其是超声波检测等需要高灵敏度和宽动态范围的应用。

4 应用

4.1 双进纸和纸张厚度检测器

超声波双进纸检测技术是一种基于传感器的机制，旨在防止同时将多张纸送入打印机或扫描仪。这不仅提高了系统运行的效率和准确性，而且有助于保持打印或扫描文档的完整性。

本节概述了双进纸检测的工作原理以及如何使用对数检测器放大器实现检测。

超声波双进纸检测工作方式如下，使用声波检测进纸系统中是否存在纸张以及纸张厚度。

发送器和接收器：该系统由两个超声波传感器组成，这两个传感器放置在送纸路径的两侧。一个充当发送器，用于发射超声波，另一个充当接收器。

- **声波发射**
发送器发出超声波，这些声波通过空气传播并撞击纸张，其中一部分声波被纸张吸收，部分声波发生反射，剩余的声波则穿透纸张。
- **信号接收和检测**
接收器接收传输的声波。如果只有一张纸，声波会有一定的强度。如果有两张纸，纸张会吸收更多的声能，导致传输的信号变弱。当纸张超过两张时，信号会更弱。接收器会检测到振幅的这种变化，并据此判断是单张还是多张纸张送入了机器。

这项技术对于防止印刷或包装等涉及多层进纸的过程中出现错误至关重要，它能确保过程顺畅进行并减少材料浪费。

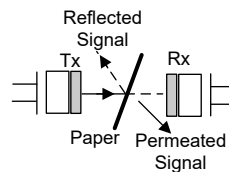


图 4-1. 纸张检测

4.1.1 原理图实现

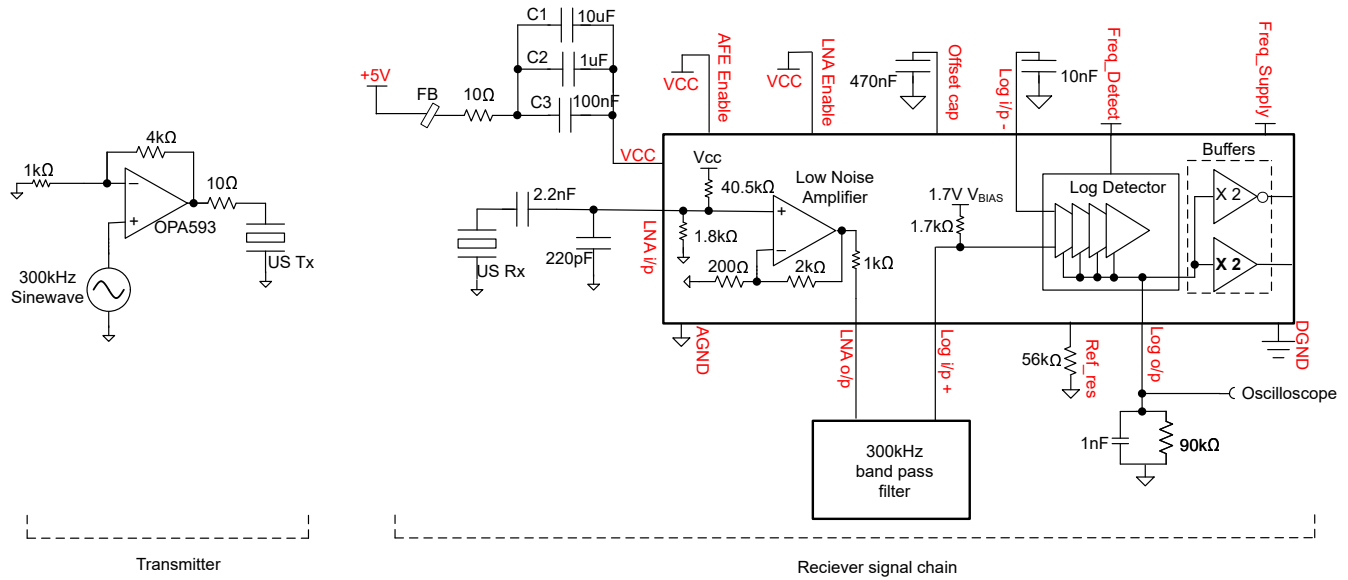


图 4-2. 双静态超声波传感器电路

实验设置

结果

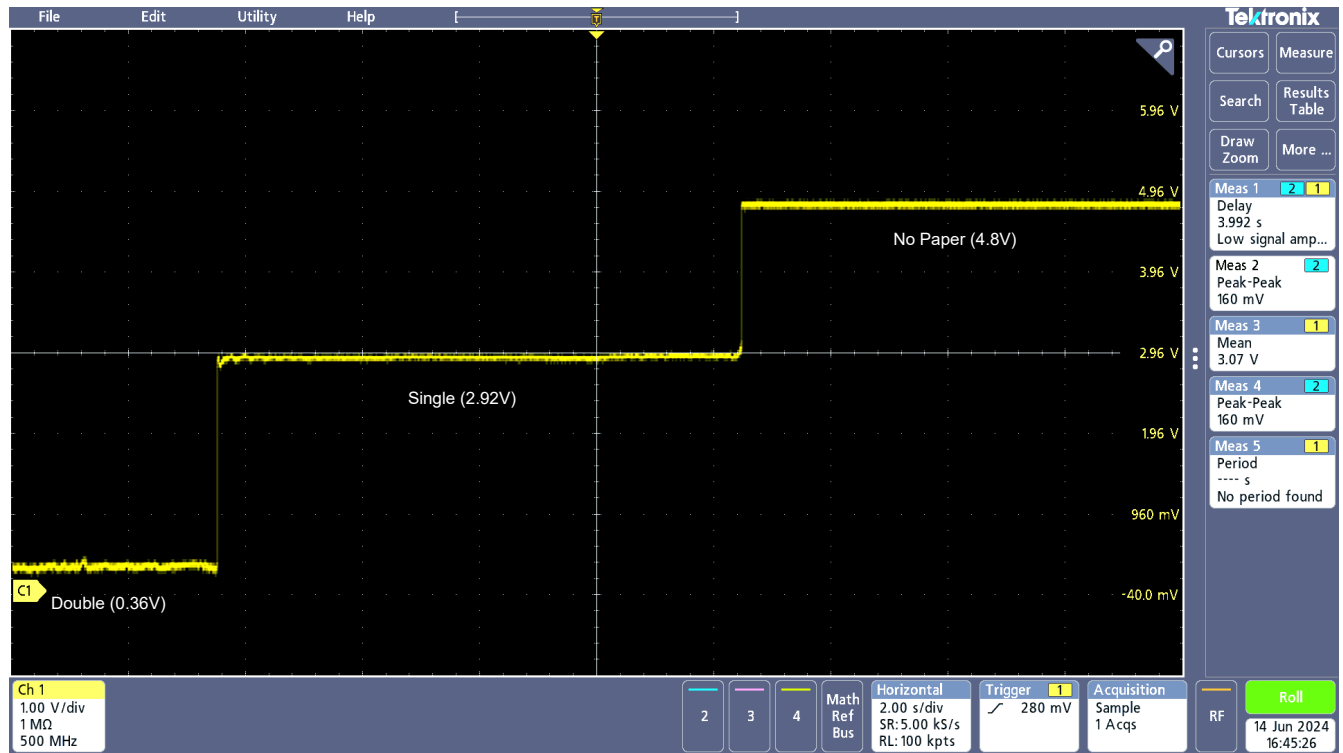


图 4-3. 双张纸、单张纸和无纸张 - 100GSM

4.1.2 材料厚度检测器

材料厚度检测与双进纸检测的工作原理非常相似，同样的设置也可用于此应用。本文演示了具有不同 GSM (克/平方米) 计数的纸张的厚度检测。GSM 越高，纸张的重量就越重，厚度会越大。

与双进纸检测类似，在此应用中，材料（此处为纸张）放置在两个超声波传感器（Tx 和 Rx）之间。当传输的信号通过纸张时，信号会衰减，在 Rx 处接收的强度取决于纸张的厚度。纸张越厚，吸收的信号越多，从而导致更高的衰减。根据接收信号强度的下降来检测厚度。

表 4-1 展示了在接收信号链中，LOG300 的输出信号与不同厚度的纸张以及两个传感器之间放置的此类纸张数量之间的关系

表 4-1. LOG300 输出 (V) 与纸张厚度间的关系

页数	70GSM 纸张	100GSM 纸张	200GSM 纸张	270GSM 纸张
无纸张	4.8V	4.8V	4.8V	4.8V
单张纸	3.1V	2.92V	2.76V	2.6V
双张纸	0.38V	0.36V	0.33V	0.31V

如图所示，随着纸张厚度增加，信号衰减也会增加，从而导致 LOG300 输出的电压降低

4.2 气泡检测器

气泡检测器用于流经管道的流体不能有空气或气泡的系统，例如透析机、输液泵和输血系统等关键医疗设备。除此之外，气泡检测器还可以检测流体中泡沫的形成。

使用超声波传感器进行气泡检测的主要优点是，测量方法是非侵入性的，而且可以穿透管壁。传感器与流体不直接接触，可防止潜在的污染或泄漏风险。因此，无需任何额外工具或对现有系统进行修改，气泡检测器可以很方便地安装在管道上。

对于此应用，在双静态配置中还可以使用两个传感器，它们放置在管子的任一侧，一个用于发送，另一个用于接收。

当没有气泡时，超声波信号穿过管子和流体，而不会有太多衰减，但如果流体中存在任何气泡，则当气泡穿过传感器之间时，超声波信号会被气泡散射或反射，从而导致到达接收器的信号衰减。接收器电路可以检测到信号中的这种衰减，并对其进行处理来计算气泡数量、气泡大小，甚至可计算气泡中的空气量。

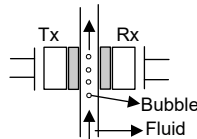


图 4-4. 气泡检测

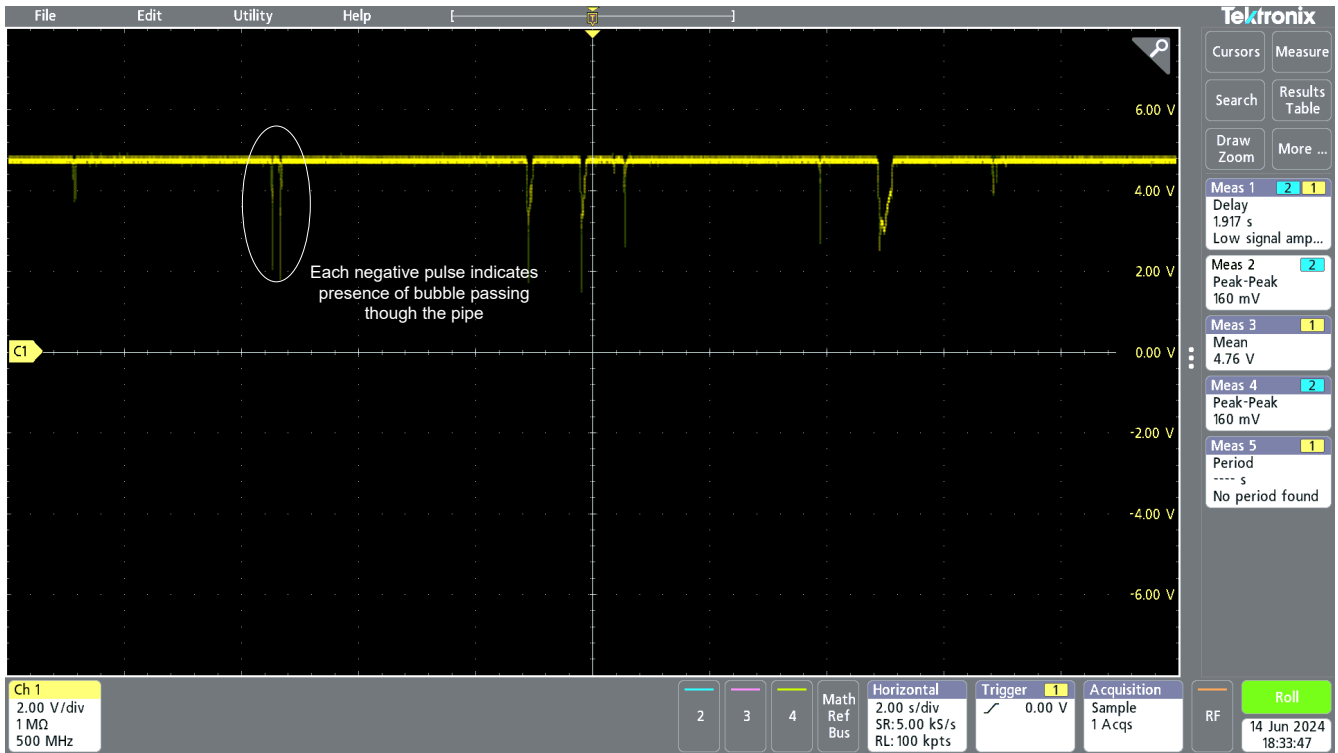


图 4-5. 气泡检测器结果

4.3 材料检测

材料检测的工作原理是向材料中发射超声波，当超声波遇到边界或缺陷时会反弹回来。根据材料类型，反射回波会具有一定的强度。更软的材料（如织物或地毯）会吸收更多的声波，从而导致回声变弱，而相比之下，硬材料（如陶瓷瓷砖或木材）则会产生更强的回声。系统会分析反射回波，从而识别接收回波的相对强度，然后进行处理以推断材料类型。

对于此应用，传感器设置为单静态配置，这意味着同一传感器先发送一系列超声波脉冲，然后等待回波。

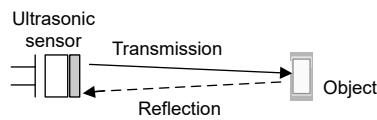


图 4-6. 单静态传感器

图 4-7 展示了如何使用 LOG300 和驱动器电路来配置超声波传感器，从而使超声波传感器采用单静态配置运行

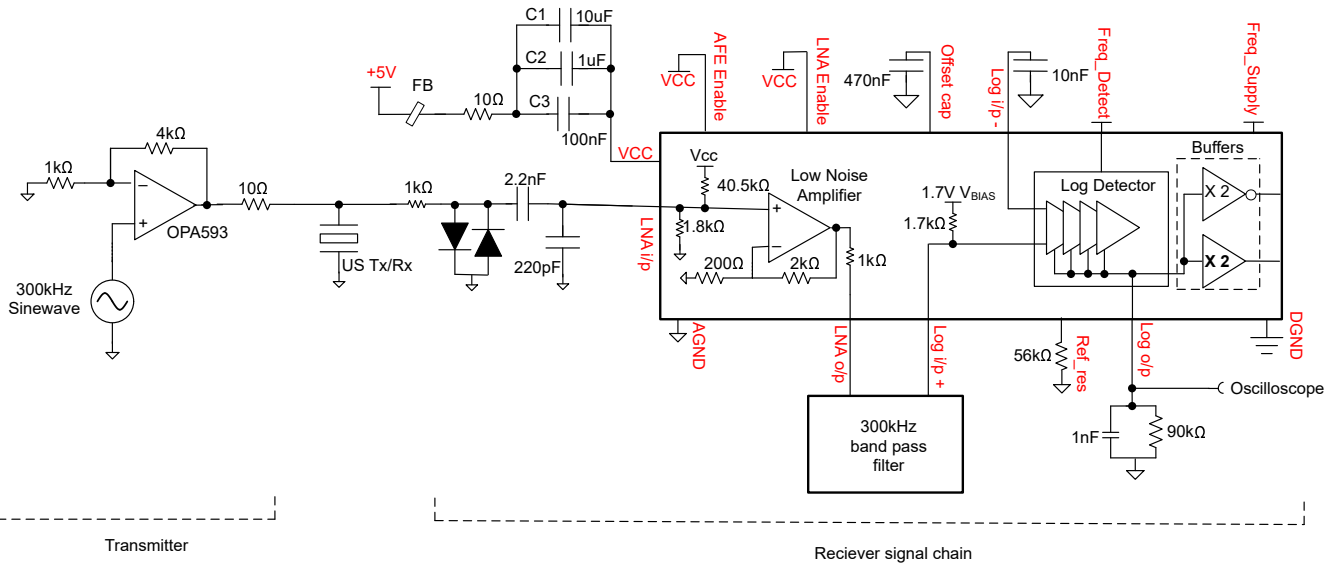


图 4-7. 单静态超声波传感器

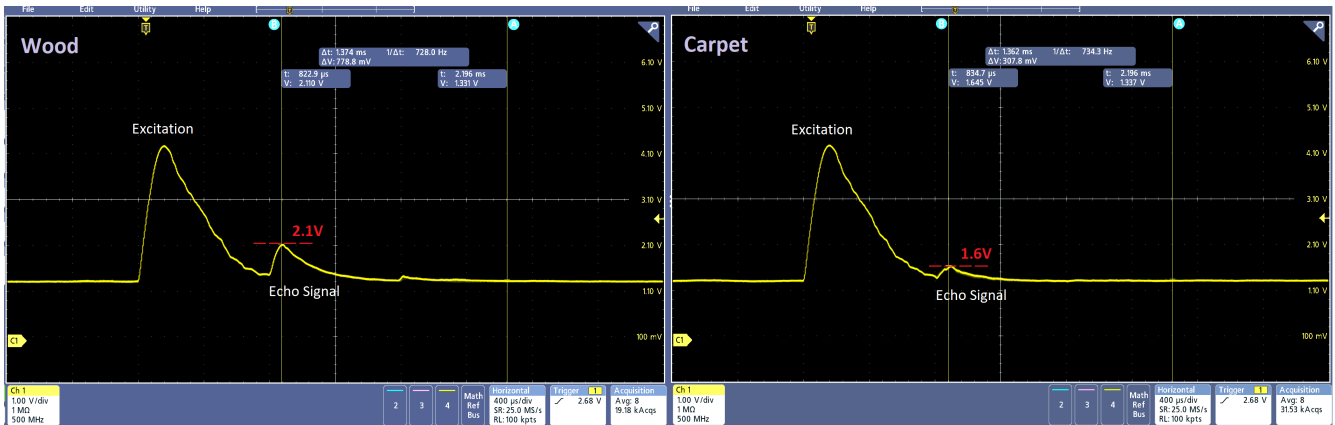


图 4-8. 木材与地毯检测结果

4.4 距离或接近检测

使用超声波传感器进行距离检测的原理是飞行时间原理，即测量超声波信号从源传输到物体（必须测量其距离）并返回接收器所需的时间。对于此应用，传感器的单静态和双静态配置都可以使用，但出于演示目的，本文展示了单静态配置。这里也可以使用材料检测中所示的相同硬件设置。不同之处在于，在这里，我们不测量回波信号的振幅，而是测量传输信号从物体反射后到达接收器所需的时间。在这里，信号传播的总距离是传感器和物体之间距离的两倍。

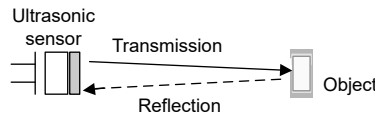


图 4-9. 单静态传感器

所花费的总时间称为飞行时间，在图 4-10 中用 Δt 表示。这里的第一个脉冲是激励或传输信号，第二个脉冲是回波信号。声音在空气中的速度约为 343m/s ，信号往返的总飞行时间为 Δt ，因此物体与传感器之间的距离可以通过 $d = (343\text{m/s} \times \Delta t)/2$ 得出

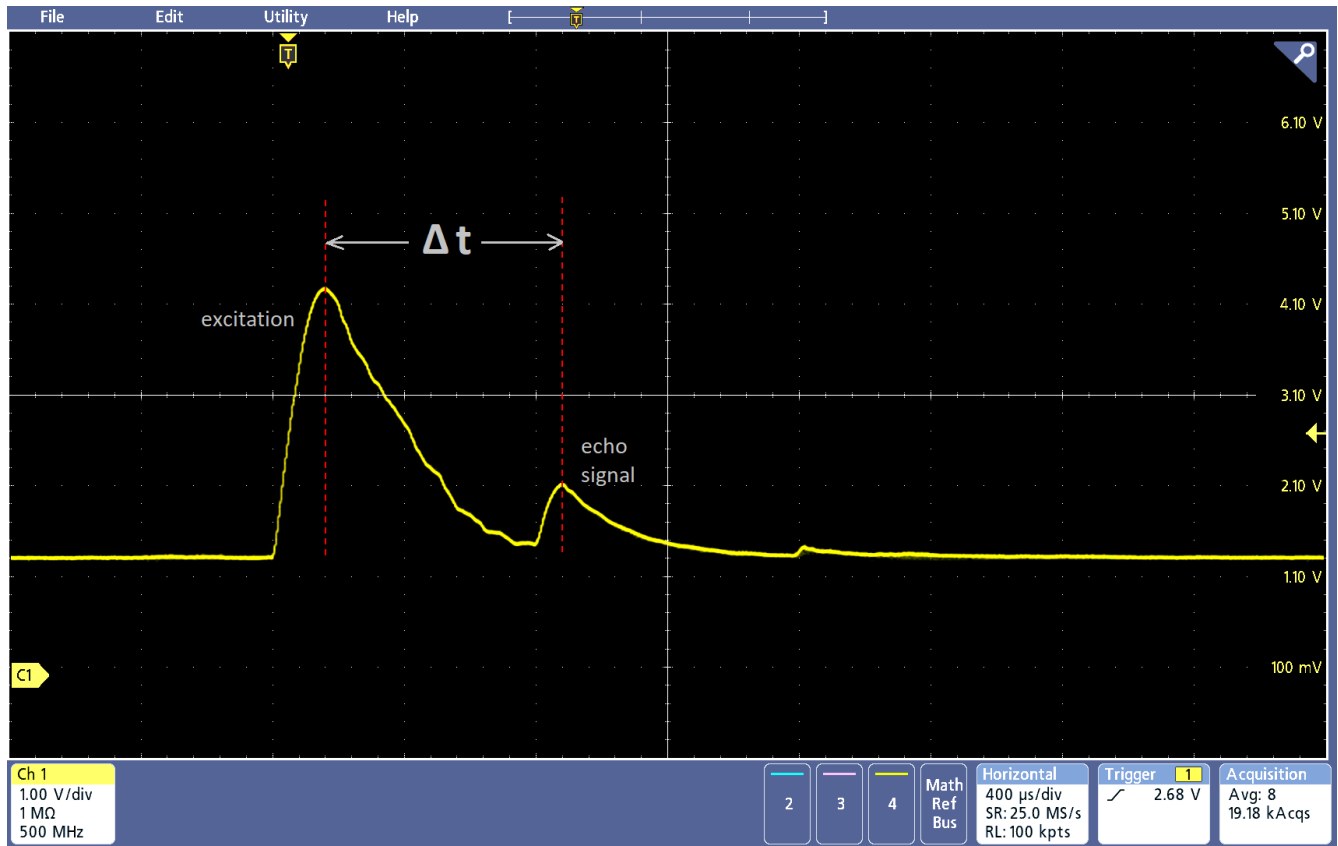


图 4-10. 距离或接近检测

5 总结

利用对数检测器放大器能力的超声波检测技术已成为各种工业和医疗应用中的关键设计。该技术非常适合需要精确检测和测量的场景，例如进纸检测、气泡检测、材料检测和接近/距离检测。

总之，在超声检测系统中集成对数检测器放大器可显著提高各种应用的性能。这项技术不仅可以提高检测精度，还可以确保稳健性和可靠性，同时降低系统复杂性，因此该技术在现代工业或医疗环境中不可或缺。

6 参考资料

- 德州仪器 (TI), [超声波检测基础知识](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [高精度实验室系列：超声波检测](#) 视频系列。

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司