

# 基于光纤耦合与相干探测的无损检测方法

何 宁<sup>1</sup>, 骆湘红<sup>1\*</sup>, 赵中华<sup>1</sup>, 廖 欣<sup>2</sup>

<sup>1</sup>桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004;

<sup>2</sup>广西无线宽带通信与信号处理重点实验室, 广西 桂林 541004

**摘要** 提出了一种将空间激光注入光纤与相干探测技术相结合的激光无损检测方法。分析了激光超声信号的传输特征和相干光探测原理,探讨了激光无损检测的信号处理及噪声抑制方法,构建了以激光激励与检测为基础,激光注入与保偏传输为核心,图形化编程语言 LabVIEW 人机交互为监测手段的实验系统。实验结果表明,该系统能减小背景光的抖动对信号检测的影响;通过控制激光的光斑直径及能量可获得不同超声信号的反射波峰,有效提高了超声回波信号对材料缺陷检测的敏感性和平稳性。检测方法为工程应用提供了新的技术途径。

**关键词** 测量; 无损检测; 激光超声; 光纤耦合; 相干光探测; 回波信号

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0812006

## Nondestructive Testing Method Based on Fiber Coupling and Coherent Detection

He Ning<sup>1</sup>, Luo Xianghong<sup>1</sup>, Zhao Zhonghua<sup>1</sup>, Liao Xin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;*

<sup>2</sup>*Guangxi Key Laboratory of Wireless Wideband Communication and Signal Processing, Guilin, Guangxi 541004, China*

**Abstract** A nondestructive laser detection method is proposed by combining the spatial laser injection into fibers with the coherent detection technique. The transmission characteristics of laser ultrasonic signals and the principle of coherent light detection are analyzed, and the signal processing and noise suppression methods in the nondestructive laser detection are discussed. The experimental system is established based on the laser excitation and detection where the laser injection and polarization-maintaining transmission are the cores, and the human-machine interactive system based on the graphical programming language LabVIEW is the monitoring way. The experimental results show that this system can reduce the influence of background light jitter on signal detection. By controlling the spot diameter and energy, one can obtain the reflection peaks of different ultrasonic signals. The sensitivity and smoothness of the ultrasonic echo signal detection on material defects are improved effectively. The testing method provides a new technique for engineering applications.

**Key words** measurement; nondestructive detection; laser ultrasonic; fiber coupling; coherent optical detection; echo signal

**OCIS codes** 120.4630; 140.3510; 140.3538; 350.6090

## 1 引 言

随着现代科技和工业技术的发展,无损检测在航空航天、核能、石油化工和机械制造等工业领域中得到了广泛应用。它不仅能探测出隐藏在材料内部的各种缺陷,而且能测量材料的厚度、硬度、强度等,对控制和改进产品质量起着关键的作用。相比于其他常规无损检测技术,超声检测技术具有检测灵敏度高、穿透能力强等优点,但传统的超声检测采用压电换能器产生和接收超声信号,探头要近距离接触被测材料,无法实现

**收稿日期:** 2017-03-31; **收到修改稿日期:** 2017-04-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(61661016)、广西无线宽带通信与信号处理重点实验室主任基金(GXKL061507)

**作者简介:** 何 宁(1958—),男,本科,教授,主要从事光通信技术方面的研究。E-mail: eicnhe@guet.edu.cn

\* **通信联系人。** E-mail: 840077641@qq.com

非接触探伤。激光超声是一种新型超声,具有极强的抗干扰能力和很宽的频带,可以在高温高压、有毒、高辐射等恶劣环境下进行遥控激发和接收<sup>[1-3]</sup>,弥补了传统超声检测技术的不足。此外,激光激发的超声表面波对表面和亚表面微小缺陷高度敏感,非常适用于表面缺陷的无损检测,因此研究弱信号环境下的高质量检测技术更具有实际意义。该技术日益成为无损检测领域的研究热点,iPhoton公司的iPLUS大型机器人激光超声检测系统已应用于客机A380复合材料构件的自动快速检测,国内南京大学、北京航空航天大学进行了复合材料内部典型缺陷及钻孔分层缺陷的检测。本文利用激光与介质相互作用的光声效应,针对激励的超声信号特征实现了对物体缺陷的非接触式检测。研究了激光超声传输与回波信号测量技术,采用激光注入光纤与相干平衡探测方法,降低了光信号在空间传输时受到的背景光及振动的影响,进一步提高了激光无损检测的性能。

## 2 激光超声无损检测原理与噪声特性

### 2.1 激光超声无损检测原理

利用脉冲激光与材料的相互作用进行光声能量转换,激发出弹性应力超声波,它产生的超声信号不仅与激光束本身的时空特性有关,还与材料的表面特性及材质有关。光声作用的介质可以是固体、液体和气体,激光激励超声波的机制可分为热弹性效应和烧蚀效应<sup>[4]</sup>,不同机制下光声转换效率随入射激光的功率密度和被测材料表面条件的不同而不同。

其中,烧蚀机制的激发效率比热弹性机制的高4个数量级,但前者的激光功率密度较高,容易对工件表面产生损伤。热弹性效应由于激发光功率低,表层的局部升温不会引起材料的任何相变,可激发出表面波、纵波和横波。若激光激发效率相对较低,则需要结合光源调制技术和表面处理技术来提高光致声的能量转换效率。

图1所示为激光超声无损检测原理图。当强度受到调制的脉冲激光照射在样品表面A点时,介质表面吸收光能量,温度升高至固体的热弹阈值,照射区因热膨胀而产生应力脉冲,同时以纵波、横波和表面波的形式在介质内部或沿表面传播,根据超声波的能量衰减和路径变化来表征物体的内部缺陷<sup>[5]</sup>。采用探测激光入射样品表面B点,利用介质中传输的超声信号对反射光束进行调制,使其携带超声信号而成为信号光,通过后端光电检测及数据处理即可完成激光超声探测。

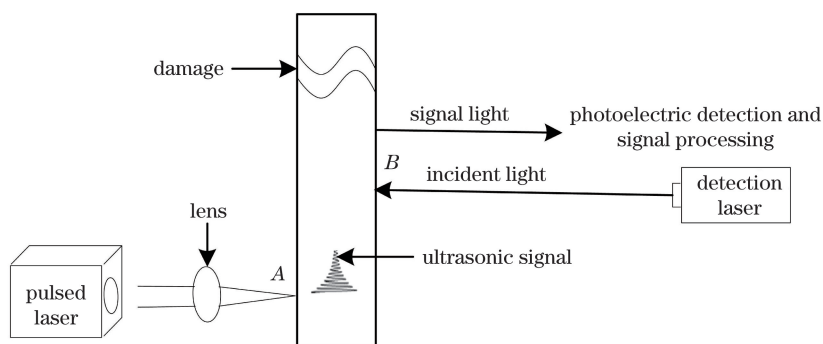


图1 激光超声无损检测原理图

Fig. 1 Schematic of laser ultrasonic nondestructive testing

激光超声的激励和检测都以光的形式实现,利用超声波传输过程中遇到缺陷障碍时的反射和透射特性,可以准确表征材料结构及特征。激光超声的脉冲宽度很窄(纳秒量级),且激励的超声波在金属中的衰减系数小,传播速度快,故能有效应用于金属材料的微小缺陷探测。在激光能量一定的前提下,光斑直径大小决定了功率密度<sup>[6]</sup>,高的功率密度可以改善超声信号的频谱特性,降低对后期信号检测精度的要求。当脉宽为 $t_0$ 的矩形脉冲激光垂直入射到光吸收系数为 $\beta$ 、热导率和热扩散率分别为 $K$ 和 $\alpha$ 的半无限媒质自由表面时,由于表面吸收光能量,媒质中将形成相应的热源,其热功率密度 $g(z,t)$ 为

$$g(z,t) = g_0^{-\beta z} [H(t) - H(t - t_0)], \quad (1)$$

式中 $g_0$ 为热源强度, $H(t)$ 为阶跃函数, $t$ 为时间, $z$ 为距离。对于弱吸收媒质,产生的超声应力脉冲为

$$u_1 = u_0 \{ [\sinh(\beta ct) - \sinh[\beta c(t - t_0)]] H(t - t_0) \} \exp(-\beta z) - u_0 \sinh\left[\beta c\left(t - \frac{z}{c}\right)\right] H\left(t - \frac{z}{c}\right) + u_0 \sinh\left[\beta c\left(t - t_0 - \frac{z}{c}\right)\right] H\left(t - t_0 - \frac{z}{c}\right), \quad (2)$$

对于强吸收媒质, 超声应力脉冲为

$$u = u_0 \left\{ -\sqrt{\frac{\alpha}{\pi c^2 t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) + \sqrt{\frac{\alpha}{\pi c^2 (t - t_0)}} \exp\left[-\frac{z^2}{4\alpha(t - t_0)}\right] H(t - t_0) + \sqrt{\frac{\alpha}{\pi c^2}} \left[ \frac{t - \frac{z}{c} - \frac{\alpha}{2c^2}}{\left(t - \frac{z}{c}\right)^{3/2}} H\left(t - \frac{z}{c}\right) - \frac{t - t_0 - \frac{z}{c} - \frac{\alpha}{2c^2}}{\left(t - t_0 - \frac{z}{c}\right)^{3/2}} H\left(t - t_0 - \frac{z}{c}\right) \right] \right\}, \quad (3)$$

式中  $u_0 = -\alpha g_0 \alpha_T E / [K\beta c(1 - 2\nu)]$ ,  $c^2 = 2(1 - \nu)\mu / [(1 - 2\nu)\rho]$ ,  $\alpha_T$ 、 $E$ 、 $\nu$ 、 $\mu$  和  $\rho$  分别为样品媒质的热膨胀系数、杨氏模量、泊松比、切变弹性模量和密度<sup>[7]</sup>。

### 2.2 激光超声检测系统中的噪声分析

激光超声无损检测是通过检测散射光完成的非接触式测量, 光在传输时易受外界背景光影响, 而且检测环境波动也会产生脉冲噪声。在实际检测过程中, 缺陷信息隐藏在回波信号中, 而它是一种时频有限的非平稳信号, 易被噪声淹没<sup>[8]</sup>, 这限制了测量的精确度和灵敏度, 影响了信号检测的判决, 增大了材料缺陷识别和特性表征的难度。

激光超声检测系统中的空间反射信号光功率很微弱, 即使利用光学方法进行非干涉或干涉检测, 被测材料表面形貌依然会导致其反射光的位置、强度及光学特性发生微小变化, 加上在开放前端进行信号接收和处理时会受到 50 Hz 工频干扰噪声的影响, 最终导致检测输出信号起伏增加, 系统信噪比降低。无损检测的目的是在弱信号环境下识别有效信号, 降低系统基底噪声, 确保信号检测的平稳性, 提高材料缺陷的检测精度。因此, 抑制噪声是信号传输和检测系统亟待解决的关键问题。

## 3 相干光探测

相干光探测技术的灵敏度高, 可获得全部的频率和相位信息, 滤波选择性能良好, 有利于微弱信号检测<sup>[9-11]</sup>。但是在相干检测中, 本振光噪声、激光器相对强度噪声(RIN)以及探测器自身的散粒噪声会降低整个系统的信噪比。为了更好地利用本振光功率以及抑制 RIN, 使系统的灵敏度进一步得到提高, 采用相干平衡探测消除噪声对微弱光信号检测的影响, 提高中频信号功率, 改善信噪比, 并同时高效率地利用本振光功率。平衡探测原理如图 2 所示, 图中参考光  $E_L$  和信号光  $E_S$  进入  $2 \times 2$  光纤耦合系统后, 光电探测器(PD)1和 PD 2 响应产生中频光电流  $I_1$  和  $I_2$ , 平衡探测系统的响应电流信号<sup>[12]</sup>为

$$I_{\text{bal}}(t) = \frac{e}{h\nu} \{ [(1 - \epsilon)\eta_1 - \epsilon\eta_2] A_S^2 + [\epsilon\eta_1 - (1 - \epsilon)\eta_2] A_L^2 \} + \frac{e}{h\nu} \{ 2(\eta_1 + \eta_2) \sqrt{\epsilon(1 - \epsilon)} A_S A_L \cos[(\omega_L - \omega_S)t + (\phi_L - \phi_S)] \} + [n_1(t) - n_2(t)], \quad (4)$$

式中  $\epsilon$  为光纤耦合器的分束比, 系统中两个 PD 相应的量子效率分别为  $\eta_1$  和  $\eta_2$ ,  $n_1(t)$  和  $n_2(t)$  为噪声电流,  $e$  为电子电量,  $h$  为普朗克常数,  $\nu$  为光子的频率,  $\omega_S$ 、 $\omega_L$  分别为信号光和参考光的频率,  $\phi_S$ 、 $\phi_L$  分别为信号光和参考光的相位,  $A_S$ 、 $A_L$  分别为信号光和参考光的光场振幅。(4)式中第一项为直流分量, 第二项为中频信号分量, 第三项为噪声。

依据平衡探测光生响应电流  $I_{\text{bal}}$ 、参考光的过剩强度噪声电流  $I_{\text{ex}}$  以及散粒噪声电流  $I_{\text{shot}}$ , 可得平衡探测的信噪比公式为

$$R_{\text{bal}} = \frac{I_{\text{bal}}^2}{I_{\text{ex}}^2 + I_{\text{shot}}^2} = \frac{(\eta_1 + \eta_2)^2 (1 - \epsilon) \epsilon A_S^2 / (h\nu)}{\left(\frac{e}{h\nu}\right) \gamma A_L^2 [\eta_1 \epsilon - \eta_2 (1 - \epsilon)]^2 W_B + [\eta_1 \epsilon + \eta_2 (1 - \epsilon)] W_B}, \quad (5)$$

式中  $W_B$  为探测器带宽;  $\gamma$  为 RIN 系数, 其取值范围为  $10^2 \sim 10^6 \text{ A}^{-1}$ , 表示参考光噪声功率与其平均功率平

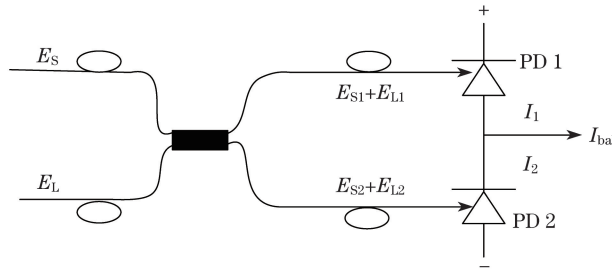


图 2 平衡探测系统原理

Fig. 2 Schematic of balanced detection system

方的比值。在相同的信号光和参考光输入情况下,若采用单端探测,则信噪比<sup>[13]</sup>可表示为

$$R_{\text{sgl}} = \frac{\eta_1 (1 - \epsilon) A_S^2 / h\nu}{W_B + \left(\frac{e}{h\nu}\right) \gamma A_L^2 \eta_1 \epsilon W_B} \quad (6)$$

根据(5)、(6)式,对信噪比随本振光功率变化情况进行仿真,使平衡探测器和单端探测器的光束分束比为 0.5 和 0.1,仿真结果如图 3 所示。由图可知,单端探测信噪比随本振光功率的增大而增大,但增大不明显,而 PD 参数一致和不一致情况下平衡探测随着本振光功率的增加输出信噪比均会有所增大。实际应用对比显示,平衡探测抑制噪声及改善信噪比的性能要优于单端探测系统的。

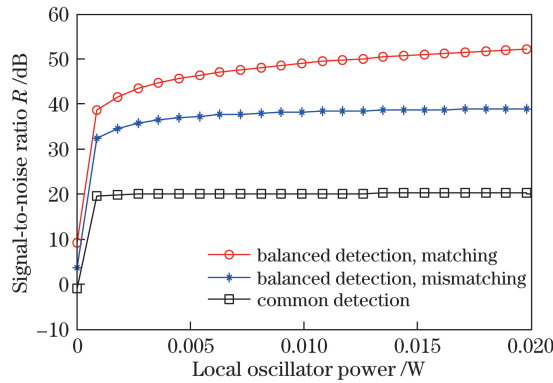


图 3 平衡探测与单端探测信噪比仿真

Fig. 3 Signal-to-noise ratio simulations under balanced detection and common coherence detection

## 4 系统设计与实现

### 4.1 硬件实现

图 4 所示实验系统主要由单频激光器、Nd:YAG 激光器、 $2 \times 2$  保偏光纤耦合器、PD 和数据采集、上位机软件处理六部分组成。选择波长为  $1.06 \mu\text{m}$  的 Nd:YAG 激光器作为激励源,根据样品介质的结构形状及材料特性选择适当的激光输出功率和驱动频率。

用线宽为 10 MHz 的 532 nm 单频激光器作为探测光源,输出激光束经分束棱镜后分成两束光,一束经由光纤注入器成为本振光,另一束经样品表面反射后,被超声振动信号调制成为信号光注入光纤。信号光与本振光经  $2 \times 2$  光纤耦合器混合后,进入平衡探测器进行相干检测处理,对超声脉冲信号进行数据采集,并将其输送到上位机系统软件进行监测。

### 4.2 软件监测设计

系统通过数据采集系统把信号传输到计算机进行处理,得出所需的数据结果。这些信息能以波形、数据的形式进行实时显示和存储,由上位机交互界面实现对特定物理量的监视。

本系统利用图形化编程软件 LabVIEW,通过模块式设计思路进行上位机界面系统的软件设计。根据总体需求,将系统划分为数据采集、数据处理和数据存储三个功能模块。LabVIEW 从采集缓存中读取数据,并将数据以波形图表的形式显示在人机交互界面中,如图 5 所示。

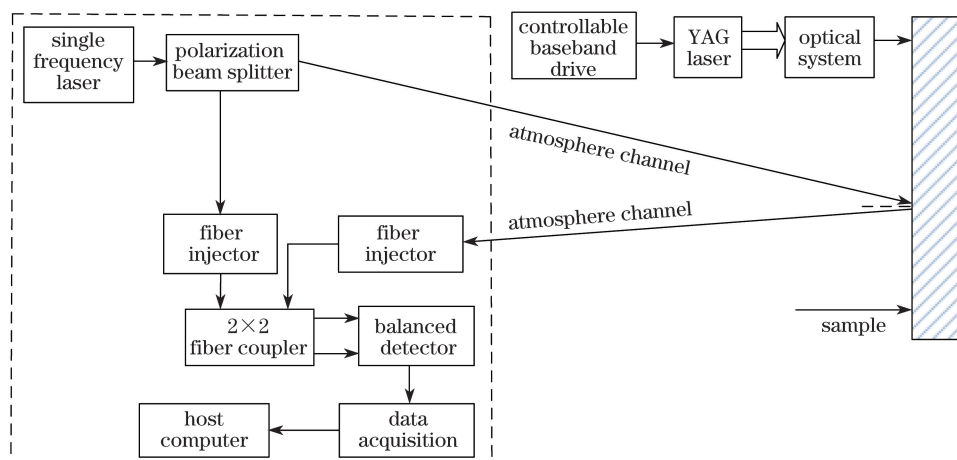


图 4 实验系统总体框图

Fig. 4 General block diagram of experimental system

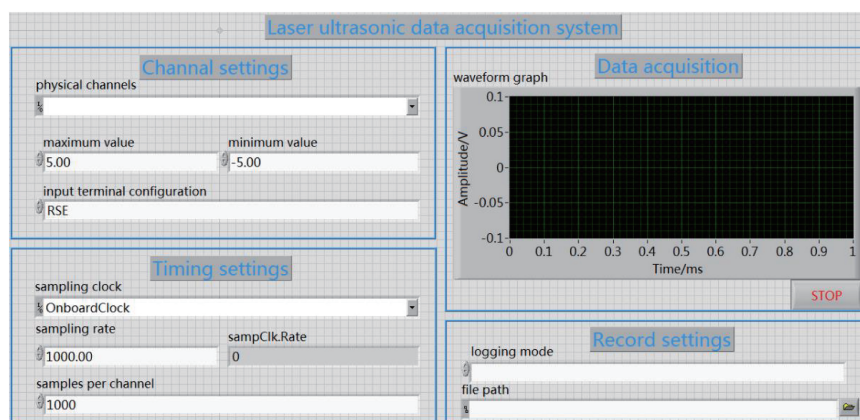


图 5 激光超声信号检测系统显示界面

Fig. 5 Display interface of laser ultrasonic signal detection system

显示界面主要包括通道设置、定时设置、数据采集和记录设置四个部分。通道设置可用于通道选择、测量范围和信号输入形式设定；定时设置用于时钟源、采样率及采样数设定；数据采集用于超声信号分析和处理；在记录设置中，为记录数据设置相应的模式和路径。通过人机交互界面可对测试中的边界条件和相关参数进行适当设置，以获得最佳的测量结果。

## 5 实验测试与分析

图 6 所示为实验测试平台。选择对激光脉冲强吸收的铝板作为被测工件，激励源产生的激光脉冲经过透镜聚焦成点光源入射到工件表面，能量在 10 mJ 以上时将在工件内部激励产生超声信号。实验中到达工件表面的激光光斑直径从 1 mm 变化到 5 mm，对应的超声幅度从 250 mV 变化到 80 mV，说明光斑直径减小可提高激励的超声信号幅度。以下测试选择光斑直径为 4 mm，利用透镜组将超声信号的探测光源从空间耦合到保偏光纤中，将入射光斑逐级聚焦，使光束直径从毫米量级汇聚到微米量级。系统中采用的  $2 \times 2$  光纤耦合器为保偏型，其对应的激光波长为 532 nm，因此保偏光纤的芯径只有  $3.5 \mu\text{m}$ ，实验中通过微调光纤注入器与激光的入射角度，可使激光耦合效率达到最佳。保偏光纤的特殊结构决定了只有与之匹配方向一致的激光才能耦合进入光纤中传输，而其他方向的光被截止，进入光纤中的光的偏振态从而得到了良好的保持。系统选择的光纤耦合器的两个通道的偏振方向一致，保证了相干探测光信号的偏振特性和传输方向，这样光纤中的信号光与参考光才能有效地进行相干叠加，减小了随机背景噪声的影响，提高了输出信号的平稳性。调整光纤注入器后，获得的空间光到保偏光纤的耦合效率为 2.5% 左右。如果到达光纤注入器

的功率更小或光纤注入器调整不到位,则耦合效率会更低;若是采用单模光纤耦合,由于芯径为  $10\ \mu\text{m}$ ,其耦合效率可大于 30%,但单模光纤不具备保偏特性,相干混合后的光将出现波动,经光电探测后的噪声明显增加,导致系统信噪比降低。

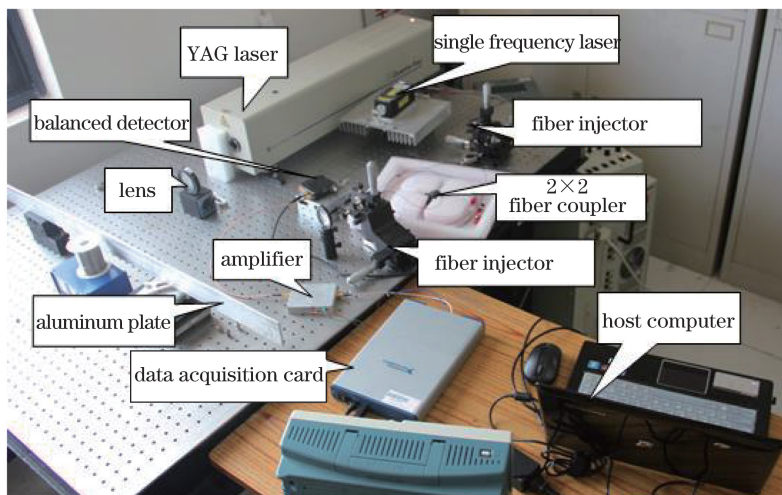


图 6 激光超声诱导与光学相干探测实验测试平台

Fig. 6 Experimental testing platform for laser ultrasonic induction and optical coherent detection

被测材料表面形貌导致激光出现散斑现象,使散射后的光强减弱,且光斑形状不规则。系统先采用大直径的单透镜将一定区域内的散射光斑会聚成直径小于 10 mm 的圆形光斑,再选择一宽口径透镜组合的光纤注入器与之配合,将材料表面散射的信号光斑耦合到保偏光纤中,从而提高从被测材料表面返回的信号光的能量收集效率,保证一定的信号光强度。同时,实验中适当增强入射到材料表面的探测激光,取棱镜的参考光、信号光的光分比为 40:60。实验测量得到的探测激光经分光后的参考光功率为 6 dBm,到达金属表面的入射功率为 9 dBm。由于界面损耗,表面反射信号功率(激光注入透镜前)为 -4.5 dBm,透镜聚焦后的功率为 3.7 dBm,经激光注入后到达平衡探测器输入光端口的信号光为 -41 dBm,参考光为 -10 dBm。

实验采用两种方案进行测试对比,探测激光的作用点相同,图 7(a)所示为基于空间光相干方式的单端探测采集到的激光超声噪声基底信号(方案一)。方案一在探测激光分光后,通过全反和半反透镜组合,调整参考光和被测铝板反射光两路光束,使其平行叠加,并送达 PD,其光束准直和激光偏振都受到一定限制。图 7(b)所示为基于光纤传输相干平衡探测获得的激光超声噪声基底信号(方案二)。

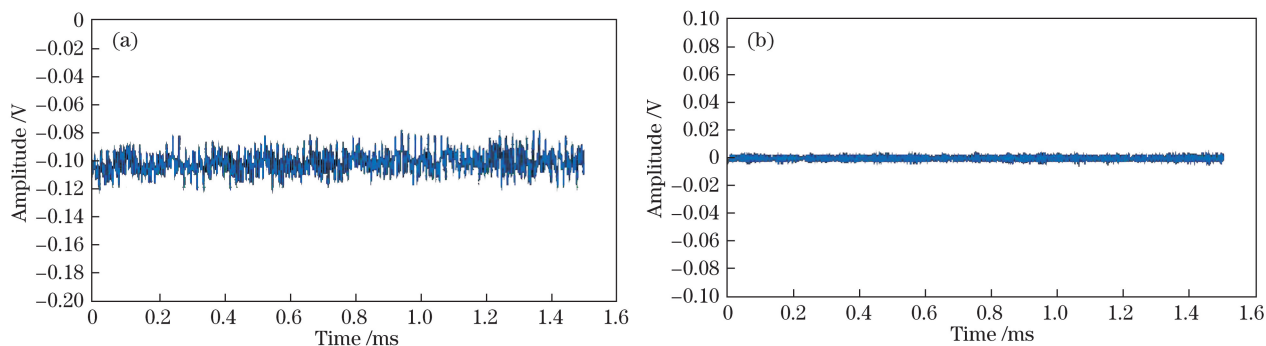


图 7 基底噪声对比。(a)单端探测;(b)平衡探测

Fig. 7 Background noise comparison. (a) Common detection; (b) balanced detection

由图 7 可知,单端探测的基底噪声明显有起伏,而平衡探测的基底噪声较平滑,稳定性较好,噪声基底电压幅值降低了近 30 mV,结果充分显示了相干平衡探测对噪声抑制的优势。

实验选择规格为  $1250\ \text{mm} \times 50\ \text{mm} \times 4\ \text{mm}$  的有缺陷铝板工件进行测试,在距探测点左侧的工件边界 30 mm 处设置缺陷的深度和宽度均为 2 mm。在铝板的同侧进行激光激励与检测,探测点与缺陷位置距离

$L$  为 29 cm, 根据超声波传播特性, 激光检测到的是沿铝板表面直接传播的超声表面波。图 8 所示为上位机数据采集的波形, 图 8(a) 所示为基于空间光相干方式的单端探测采集到的激光超声信号, 图 8(b) 所示为经激光注入后相干平衡探测的非接触式采集波形信号。

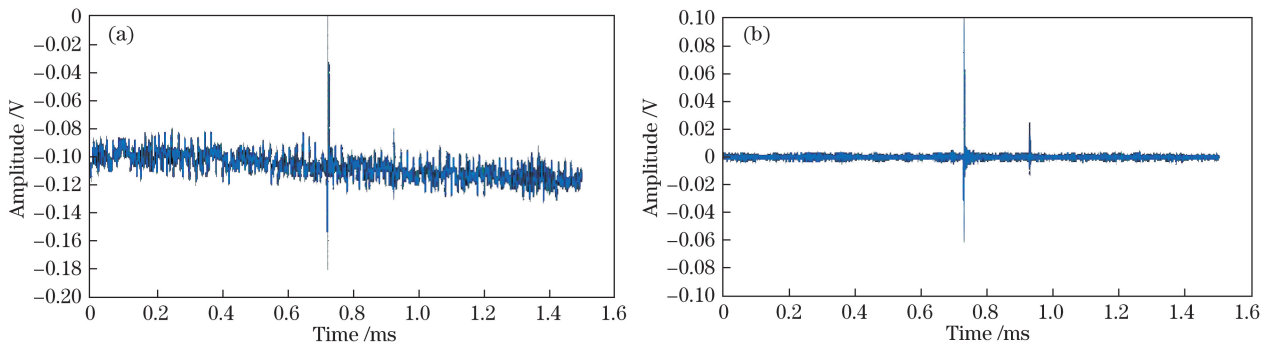


图 8 激光超声检测系统采集到的波形。(a)单端探测;(b)平衡探测

Fig. 8 Waveforms obtained from laser ultrasonic detection system. (a) Common detection; (b) balanced detection

从图 8 中看出, 噪声的随机起伏将增大基底噪声, 使系统对信号检测的信噪比明显降低, 测试得到的图 8(b) 所示的波形信噪比较图 8(a) 所示的提高了 9 dB 以上。由检测原理可知, 若工件无缺陷, 超声信号将直接衰减而没有回波信号, 只有一个主峰波形。而图 8(a)、(b) 检测的是有缺陷的工件, 超声信号遇到裂缝反射后往回传播, 使得信号光发生突变, 图 8(a)、(b) 中第一个幅值为直接到达的主峰, 第二个幅值是铝板表面缺陷反射引起的回波信号。波形中各峰值的出现时间分别为 0.72 ms、0.92 ms, 时间差  $\Delta t$  均为 0.2 ms, 已知超声表面波在铝板中的传播速度  $c = 2940$  m/s, 由此可以得到探测点到缺陷位置的距离为

$$L_1 = \frac{c \times \Delta t}{2} = 29.4 \text{ cm}, \quad (7)$$

误差量与真实损伤距离的比值为  $\Delta L/L = 1.38\%$ 。

经实验测试分析可知, 采用相干平衡探测方式的激光超声检测系统具有一定的噪声抑制能力, 基底漂移较小, 系统输出信号起伏现象得到明显改善, 回波信号峰值清晰, 依据检测信号峰间隔可快速准确实现对材料缺陷的检测。

## 6 结 论

提出了一种基于空间光耦合技术的光纤传输相干光探测的激光无损检测方法, 对数据信号的提取与处理进行了分析。基于激光超声信号的检测接收机制, 从相干探测原理出发, 利用同源相干平衡探测方法, 通过控制脉冲激光和调整输出激光光束, 改变到达被测工件的激光能量, 从而获得了理想的超声信号, 降低了激光源空间漂移对相干探测的影响, 进一步提高了相干光探测的灵敏度和探测弱信号的能力。选择窄线宽的探测激光, 通过空间光注入保偏光纤的处理方式降低噪声起伏的影响, 进一步改善了系统检测性能, 为激光超声无损检测提供了一种新的技术手段。

## 参 考 文 献

- [1] Zhu Qian, Qiu Jinhao, Zhang Chao, *et al.* Application of laser ultrasonic detection for double-laser laminated material[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 031402.  
朱 倩, 裘进浩, 张 超, 等. 双层层压材料中激光超声检测方法的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 031402.
- [2] Sadeghi S, Najafabadi M A, Javadi Y, *et al.* Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates[J]. Materials & Design, 2013, 52(24): 870-880.
- [3] Zhang Chao, Ji Hongli, Qiu Jinhao, *et al.* Research on interference energy calculation method in laser ultrasonic technique[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0714001.

- 张 超, 季宏丽, 裘进浩, 等. 激光超声检测中干涉特征提取算法的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0714001.
- [4] Liu Dan. Research on laser ultrasonic excitations and detection technique[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- 刘 丹. 激光超声激励与检测技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [5] Guo Jia, Li Sihai, Ning Ning, *et al.* Application of laser ultrasonic technique in non-destructive testing[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(4): 487-490.
- 郭 佳, 李四海, 宁 宁, 等. 激光超声技术在无损检测中的应用[J]. 航空工程进展, 2014, 5(4): 487-490.
- [6] Cheng Yong, Zhu Mengzhen, Ma Yunfeng, *et al.* Mechanism and effects of complex laser ablation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(11): 28-34.
- 程 勇, 朱孟真, 马云峰, 等. 激光复合损伤机理与效应研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 28-34.
- [7] Li Ligu. Application of optical heterodyne measurement in nondestructive testing[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2006.
- 李丽国. 光外差测量在无损探伤中的应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [8] Chao Jianshu, Ji Baoping, Luo Zhenxing, *et al.* Research on de-noising method for laser ultrasonic signal[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(2): 171-176.
- 曹建树, 姬保平, 罗振兴, 等. 激光超声信号去噪方法的研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(2): 171-176.
- [9] Leven A, Kaneda N, Koch U, *et al.* Coherent receivers for practical optical communication systems[C]. Anaheim: Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2007.
- [10] Barry J R, Lee E A. Performance of coherent optical receivers[C]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(8): 1369-1394.
- [11] Wang C, Gao L, Li Y, *et al.* Investigation of balanced detection and receiver for coherent lidar[C]. SPIE, 2009, 7382: 738201.
- [12] Yang Yanling, Li Yanchao, Gao Long, *et al.* Numerical simulation of balanced heterodyne detection for coherent lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(10): 1918-1922.
- 杨彦玲, 李彦超, 高 龙, 等. 相干激光雷达平衡外差探测方法的数值仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1918-1922.
- [13] He Ning, Feng Taiqin, Liao Xin. Research on noise cancellation based on acousto-optic effect in coherent detection[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0706001.
- 何 宁, 冯太琴, 廖 欣. 基于声光效应的相干探测光学降噪方法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0706001.