

利用计算全息技术重构激光超声的激发面源

丁 然¹ 徐晓东¹ 刘晓峻¹ 许钢灿²

(¹ 南京大学声学研究所 近代声学重点实验室, 江苏 南京 210093; ² 杭州应用声学研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要 把计算全息技术引入激光超声无损检测系统, 此系统借助直接搜索算法生成计算全息图, 利用空间光调制器液晶器件代替传统全息干板再现全息图像, 并将此生成、再现方法具体用于空间调制的脉冲激光源的产生, 以辅助固体表面的窄带超声波的激发。由于算法的稳健性和重建方法灵活性, 大大简化了激光超声实验系统, 缩短了实验周期, 在激光超声无损检测领域有广泛的应用空间。

关键词 计算全息; 激发面源重构; 直接搜索算法; 液晶空间光调制器

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS200828s1.0164

Pump Source Reconstruction of Laser Ultrasonic by Computer Generated Holography

Ding Ran¹ Xu Xiaodong¹ Liu Xiaojun¹ Xu Gangcan²

(¹ Key Laboratory of Modern Acoustics, Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

² Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310012, China

Abstract The technique of computer-generated holography (CGH) is introduced into the experimental system on laser ultrasonic non-destructive evaluation (NDE). This system employs a direct-search algorithm to generate the hologram and further reconstructs the hologram via aliquid crystal spatial light modulator. Specifically, a generation and reconstruction method is applied to help the spatial modulation of the laser pulse to excite narrow-band ultrasound. Due to the robusticity of the algorithm and the flexibility of the reconstruction method, this method can simplify the laser ultrasonic setup and substantially shorten the experiment period. Thus there will be a variety of applications for this system in the fields of NDE.

Key words computer-generated holography; reconstruction of pump source; direct-search algorithm; liquid crystal spatial light modulator

1 引 言

典型的激光超声无损检测技术是利用光学系统将脉冲激光聚为点源、线源或具有空间调制的面源在样品上激发声波, 再借助光学检测系统检测在被测物体上激发的声波。通过分析检测系统所获得的声信号进而获得样品的弹性参数、结构缺陷等^[1]。由于激光超声技术具有非接触、快速准确等特性, 在无损检测领域中已引起广泛的关注, 但因结构复杂, 稳定性要求高, 限制了其使用范围。

计算机生成全息图 (CGH) 技术利用计算机产生数字形式全息图, 由阿道尔夫·罗曼教授提出。它的实用意义在于 CGH 的光学重建所重现的是数

字物体而不必是实在物体, 因此, 原则上可以借助 CGH 的重建形成任意的波前形状和光强分布, 这也使得它得以广泛应用于激光加工、激光超声等领域。目前生成 CGH 的方法有^[3~6]; 基于干涉的条纹计算, 傅里叶变换法和由 MIT 空间成像小组提出的基于衍射的条纹计算方法; 在具体的计算方法上也出现了辅助的优化算法如 Gerchber-Sax-ton 算法、误差递减法 (Error-Reduction)、输入输出法 (Input-Output)、模拟退火法、遗传算法、直接搜索算法等^[7~9]。在重建手段上, 有借助石英蚀刻、激光打印透明薄膜、空间调制器 (LCD/LC) 等方式^[7~9]。

为简化激光超声系统, 提高其适用性。本文采

用计算全息技术,对该系统进行了改造。首先利用计算全息技术,根据直接搜索算法^[7]生成二元相位全息图,对生成的全息图进行了数字重建的仿真;其次在实验上以脉宽为 8 ns,重复频率为 10 Hz 的 Nd:YAG 脉冲激光为激发光源(重建光源),利用 LCD 空间光相位调制器(SLM)进行光学重建。当激光照射到 LCD 时,其出射光将得到的全息像投射到所需检测的样本表面,从而激发实验上所需要的声波信号。这样大大简化了激光超声的激发系统。由于实验采用了高效、稳健的生成算法和即时的重建系统,大大缩短了实验周期,降低了实验成本,提高了时间的灵活性。

2 全息图的生成原理

基于干涉的条纹计算,利用计算机模拟光场,其计算效率较低,精度较差。本文中全息图生成算法采用二进制/灰度直接搜索算法。这种算法最大的优点是普适性、高精度(低重建误差)和高效性^[3,7]。而且,这种方法不牵扯到谱操作,不需要考虑优化相位偏置修正、量化层次、像素单元大小等参数。计算全息图的原理与编码技术在文献 4 中已详细讨论,此文仅给出全息计算中所需的计算理论。

2.1 相位调制的基本方程

对于全息图上某一单元(例如一个像素区域)对重建图像所起到的相位调制作用可表述为:

$$\Delta I_{\text{image}} \approx \frac{-i}{2\lambda D} I_{\text{holo}} S_{\text{pixel}} T_{\text{trans}} \exp[-i(\phi_D + \phi_{\text{holo}} + \phi_{\text{origin}})] = \frac{M}{D} \exp[-i(\phi_D + \phi_{\text{holo}} + \phi_{\text{origin}})], \quad (1)$$

式中 ΔI_{image} 为图像上单位区域的光强, D 为全息图与重建图像之间的距离, I_{holo} 为全息图平面上单位区域的光强, S_{pixel} 为全息图上一个像素的面积, T_{trans} 为全息图平面的透明度, M 对于固定系统可以抽象出来的常数比例系数。 ϕ_{origin} 为入射光某点相位, ϕ_{holo} 全息图上相对应像素点相位, ϕ_D 为相位的传播因子。

2.2 采样条件

在实施算法过程中应注意全息图像素与重建图像像素之间应遵循文献^[4,7]中指出的两条采样条件:

$$r_{\text{holo}} \leq \frac{\lambda f}{R_{\text{image}}}, \quad (2)$$

$$r_{\text{image}} \leq \frac{1}{2} \frac{\lambda f}{R_{\text{holo}}}, \quad (3)$$

其中, r 为像素尺度, R 是全息图或重建图像的孔径大小, f 为成像距离。

为了使生成的条纹中亮点连续而不是分立,根据上述第二式,图像数字化采样点间距应小于 $\frac{1}{2} \frac{\lambda f}{R_{\text{holo}}}$ 的一半,此上限 $\frac{1}{2} \frac{\lambda f}{R_{\text{holo}}}$ 被称为采样定律中的抽样间距(PSF)。

3 程序流程与全息光学再现系统

本文中采取直接搜索算法计算所需的全息像,其算法流程如图 1 所示。直接搜索算法是以一个随机序列决定搜索点的顺序,在搜索过程中通过改变部分点的相位,并引入一惩罚函数判断改变相位的保留或丢弃,该算法优先搜索黑白的交界处和相位有序区域与相位相对无序的区域的交界处,通过改变相位以达到全息图的逐渐有序,直至满足所需的条件。

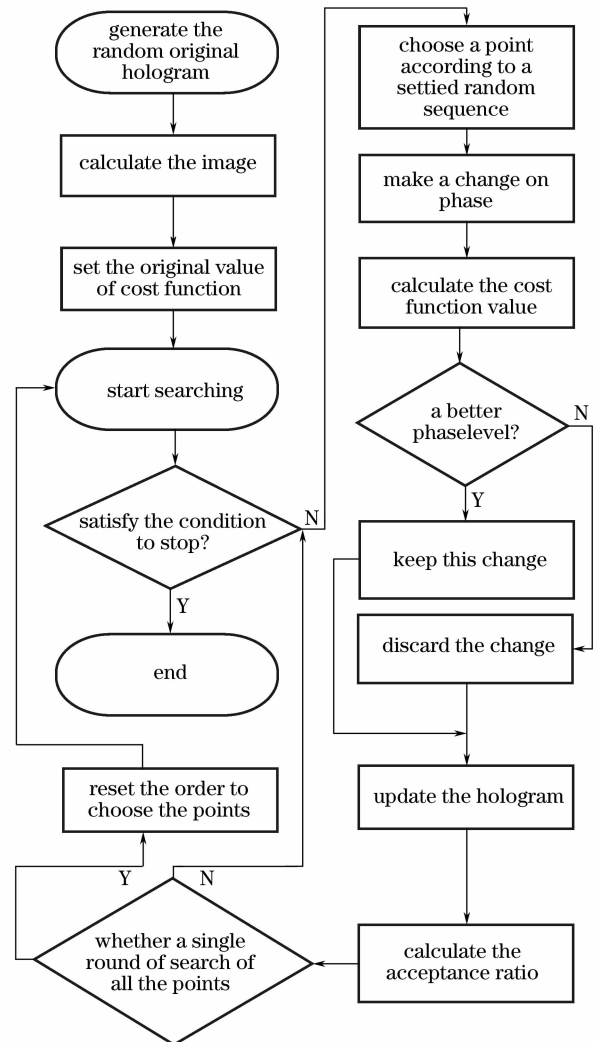


图 1 直接搜索算法流程图

Fig. 1 Flow chart of direct-search algorithm

图 2 为所采用的光学全息再现光路,由于激光超声往往使用强脉冲光源作为声波的激发光源,在实验中为验证本系统的可行性,本系统使用一束重复频率为 10 Hz,脉宽为 8 ns,波长为 532 nm 的 Nd:YAG 脉冲激光为激发光源(重建光源),利用透射式液晶显示器(LCD)作为空间光相位调制器(XGA2 SLM)进行光学重建。当激发光照射显示有全息图的 LCD 时,其出射光将在所需检测的样本表面重构出激光超声实验中所需要的激发面源。

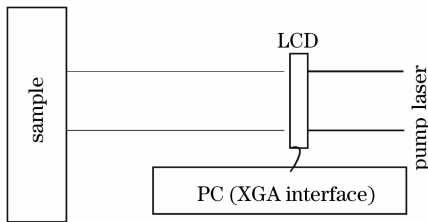


图 2 光学再现系统

Fig. 2 Reconstruction setup of optic holograph

4 实验结果与讨论

为提高成像质量和成像效率,分别讨论了采样间距、全息图孔径、重建光束孔径以及算法的收敛限,这四种参量对 CGH 重建质量的影响。

图 3 和图 4 是在使用不同采样间隔条件下,计算和再现的计算全息图和物体的再现图。图 3 为采样间隔是 3 倍 PSF 条件下,计算所获得的全息图和重构的物象,从图可看出其计算全息图黑白条纹无序,衍射效率严重偏低,导致其相应的再现图像点不连续,图象与背景对比度不好;图 4 为满足采样定理条件下所获取的计算全息图与再现图,可看出其全息图的黑白条纹对比清晰,所获取的重构图象像素点连续,清晰。然而采样点的增加同样会增加计算机耗时,综合考虑费效比,应采用合理的、充分小的

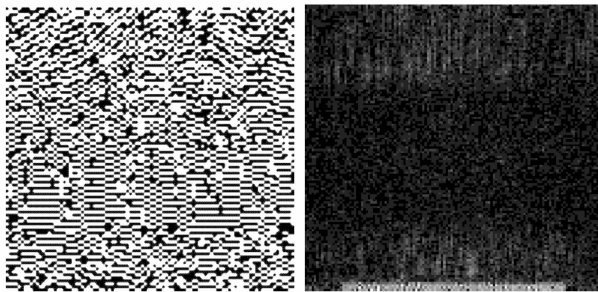


图 3 全息图与相应的再现图,其采样点间距为 3 倍 PSF

Fig. 3 Computer generated hologram and corresponding reconstructed image with the sampling interval of 3 point spread function (PSF)

采样间距,从而获取可接受的图象对比度。

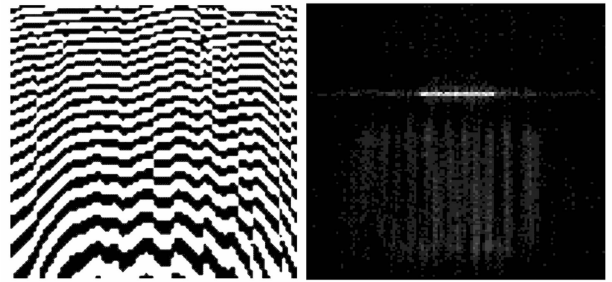


图 4 全息图与相应的再现图,其采样点间距小于 1/2 倍的 PSF

Fig. 4 Computer generated hologram and corresponding reconstructed image with the sampling interval of 1/2 point spread function

图 5 为脉冲激光通过不同孔径大小全息图样所获取的重构的瞬态栅源,其中图 5(a)使用大小为 100×100 个 LCD 像素点的全息图重构图象,图 5(b)为使用 350×350 个 LCD 像素点的全息图重构图象;两幅全息图生成中均采用了各自对应的合理采样间距。比较二者图象可知:较大的全息图孔径可以获得较高的重建图像分辨率以及图象的对比度。

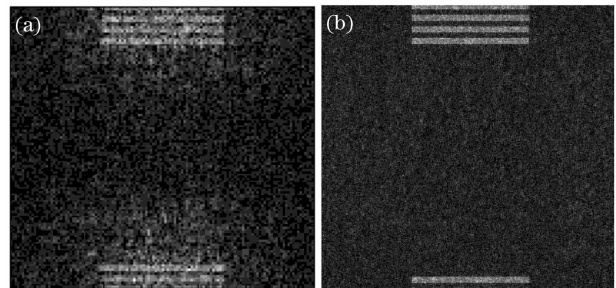


图 5 重建的干涉条纹。(a)使用大小为 100×100 像素点重构图;(b)使用大小为 350×350 像素点重构图

Fig. 5 Interference fringes. (a) Reconstructed by 100 pixel \times 100 pixel hologram, (b) reconstructed by 350 pixel \times 350 pixel hologram

在实验中发现如采用不同直径的再现光束,重建的图象清晰度也不同,如较细的光束由于不能充分使用全息图的相位信息,不能获得很好的重建精度和图像对比度。图 6 为充满全息图样条件下所重构的物象,其像素点连续,图象与背景具有很好的对比度。

鉴于实验证明过低的收敛限并不会显著改善重建精度,故综合算法收敛时间和算法效率,收敛限一般取为 5%~10% 的改变接受率。

通过以上分析和实验结果的比较,采样间距、全息图孔径、重建光束孔径以及算法的收敛限明显影响

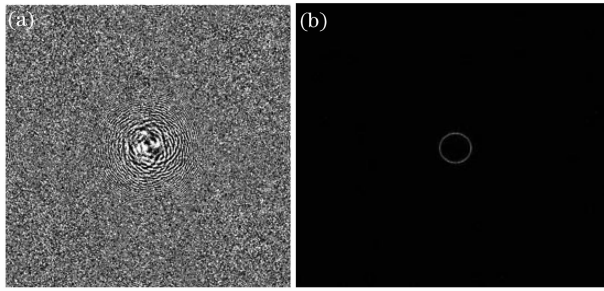


图 6 全息图与相应的再现图,光束口径为 600×600 个像素点。(a) CGH, (b) 重建图像

Fig. 6 Computer generated hologram (a) and corresponding reconstructed image (b) with the size of reconstruction laser of 600 pixel \times 600 pixel

了物象的重建精度,在计算上采样间距和算法的收敛性即影响了图象的重建精度也决定了计算时间,因此应综合考虑其费效比,以获取良好的重建结果和较少的计算时间。在全息图和重建光束的口径上在 LCD 所允许的尺度上,应尽量通过扩束达到达到 LCD 满口径,这对于使用强脉冲激光的图象重建尤其重要,这可使光能量分散有助于缓解 LCD 像素结构本身带来的衍射干扰,以及降低强脉冲光可能给 LCD 所带来的损伤。

5 结 论

本文中讨论了计算全息技术辅助激发窄带超声波的方法,尝试了一套全息图生成、重建和激发声信号的实验系统的可行性。本文通过直接搜索算法生成 CGH,并借助 LCD 重建所需用于激发超声波的条

纹图样。由于直接搜索算法的稳健性和通用性,以及 LCD 重建的灵活性,计算全息技术在辅助超声无损检测方面将有潜在的应用前景。

参 考 文 献

- 1 C. B. Scruby, L. E. Drain. *Laser Ultrasonics-Techniques and Applications* [M]. Bristol: Adam Hilger, 1990
- 2 Kozma A, Kelly D L. Spatial filtering for detection of signals submerged in noise[J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**: 387~390
- 3 Michael A, Seldowitz, Jan P. Allebach *et al.*. Synthesis of digital holograms by direct binary search[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(14): 2788~2798
- 4 Yu Meiwen. *Optical Holography and Its Applications* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 276~311
于美文. 光全息学及其应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 276~311
- 5 M. Sutkowski, M. Kujawinska. Application of liquid crystal (LC) devices for optoelectronic reconstruction of digitally stored holograms [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, **33**(3): 191~201
- 6 Yu Shigang. Effective method for improvement of computer-generated hologram reconstruction quality[J]. *Applied Laser*, 2003, **23**(4): 225~228
俞世钢. 提高计算机制全息图再现像质的有效方法[J]. *应用激光*, 2003, **23**(4): 225~228
- 7 Clark M. Two-dimensional, three-dimensional, and gray-scale images reconstructed from computer-generated holograms designed by use of a direct-search method[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(25): 5331~5337
- 8 Feng Yujun, Zhou Jin, Huang Xinfan *et al.*. Two channel self-focusing matched filter by computer-generated hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 255~256
封余军, 周 进, 黄信凡 等. 双通道自聚焦计算全息匹配滤波器 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 255~256
- 9 Ren Xiuyun, Cheng Xin, Liu Xuan *et al.*. Imaging properties of the computer-generated holograms based on a spatial light modulator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 110~113
任秀云, 程 欣, 刘 轩 等. 基于空间光调制器的计算全息成像特性 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(1): 110~113