
数字全息记录及实时 光学实时再现实验

实验讲义

大恒新纪元科技股份有限公司

版权所有 不得翻印

数字全息及实时光学再现实验

一、 引言

全息干涉测量是一种非常有用的无损检测技术，然而，用传统全息干板记录全息图时必须做显影等湿处理，在实际应用中许多不便。1967 年由 Goodman 等人便开始用 CCD 摄像机记录干涉图。1971 年，Huang 在介绍计算机在光波场分析中的进展时，首次提出数字全息的概念，进入 21 世纪数字全息已经成为一个十分活跃的研究领域。

二、 实验目的

- 1、理解数字记录、光学记录、数字再现、光学实时再现
- 2、理解计算模拟全息原理，实现数字记录，数字再现
- 3、理解可视数字全息原理，在空间光调制器上加载计算模拟全息图，利用再现光路恢复物信息，实现数字记录，光学再现
- 4、理解数字全息实验原理，搭建透射、反射干涉光路采集全息图，通过软件再现物信息，实现光学记录，数字再现
- 5、理解实时传统全息实验原理，了解与传统全息之间的异同，通过空间光调制器再现全息图，完成光学记录，光学再现
- 6、探究数字全息在测量方面的应用

三、 实验器件

激光器及组件、可调光阑、摄像机、空间光调制器、分束镜及组件、空间滤波器、可调衰减片、反射镜及组件、干板架、待测物

四、 实验原理

全息技术是基于光的干涉原理，将物体发射光波波前以干涉的形式记录光波的相位和振幅信息，利用光的衍射理论再现所记录物光波的波前，从而获得物体振幅和相位信息，此类技术在光学检测和成像方面有着广泛的应用。传统光学全息实验是通过银盐、重铬盐材料或光致聚合物等记录全息图，拍摄过程对环境要求较高，冲洗过程繁琐，重复性差。

本实验在传统全息术基础上，开发了数字全息、计算模拟全息和光学实时再现等全息技术。数字全息技术自 1967 年顾德门提出，其基本原理是用高分辨率摄像机代替干板或者光致聚合物记录全息图，然后由计算机模拟光场对全息图进行数字再现。计算模拟全息是利用计算机模拟物光和参考光通过计算获得模拟全息图，通过计算机模拟光场实现数字再现。光学实现再现是将模拟全息图或数字全息图加载到空间光调制器，同时用参考光照射，在空间光调制器后面即可用白屏或 CCD 接收再现图像。

1、数字全息图的记录和再现基本原理

在全息技术发展过程中，很长时间人们都是通过全息干板来记录全息干涉图样，需要经过曝光、显影、定影等化学处理，过程费时复杂，而且记录干板不能

重复使用。数字全息技术的发展弥补了实验缺憾。数字全息记录和再现的基本理论与普通全息是相同的，其区别在于数字全息采用数字摄像机代替干板存储全息图，通过计算机软件模拟记录光场实现图像衍射再现，简化了再现过程，实现了全息图实时记录与存储，展现了全息的数字化过程。

1) 数字全息的全息图记录

物光波的信息包括光波的振幅和相位，然而现有的记录介质均只能记录光强，因此，必须把相位信息转换为强度信息才能记录下物光的所有信息。全息术就是利用干涉法将空间相位调制转化为空间强度调制从而记录下物光波全部信息的方法。

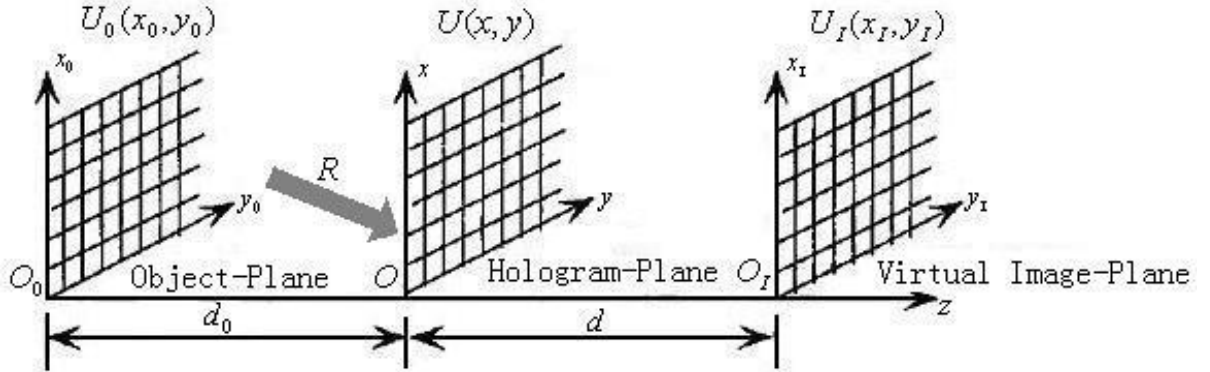


图 1 数字全息图记录和再现的坐标系统变换示意图

图 1 为数字全息记录和再现的坐标系统变换示意图。物体位于物平面 x_0y_0 面上，与全息平面 xy 面相距 d_0 ，即全息图的记录距离。摄像机位于 xy 面上，记录物光和参考光在全息平面上的干涉光强分布。 x_Iy_I 面是数值再现的成像平面，与全息平面相距 d ，也称为再现距离。

设位于 x_0y_0 平面的物光场分布为 $U_0(x_0, y_0)$ ，传播到全息平面 xy 面记为

$$O(x, y) = A_o(x, y) \exp[j\varphi_o(x, y)] \quad (1)$$

其中， $A_o(x, y)$ 和 $\varphi_o(x, y)$ 分别为物光波的振幅和相位分布。将到达全息平面上的参考光波记为

$$R(x, y) = A_r(x, y) \exp[j\varphi_r(x, y)] \quad (2)$$

其中， $A_r(x, y)$ 和 $\varphi_r(x, y)$ 分别为参考光的振幅和相位分布。则 xy 面上全息图的强度分布为

$$I_H(x, y) = |U(x, y)|^2 = |O(x, y) + R(x, y)|^2$$

将(1)式和(2)式代入上式可得

$$I_H(x, y) = |A_o(x, y)|^2 + |A_r(x, y)|^2 + O(x, y)R^*(x, y) + O^*(x, y)R(x, y) \\ = |A_o(x, y)|^2 + |A_r(x, y)|^2 + 2A_o(x, y)A_r(x, y)\cos[\varphi_o(x, y) - \varphi_r(x, y)]$$

(3)

式(3)的前两项分别是物光和参考光的强度分布, 仅与振幅有关, 与相位没有关系。第三项是干涉项, 包含了物光波的振幅和相位信息。参考光波作为载波, 其振幅和相位都受到物光波的调制, 干涉条纹则是参考光波的振幅和相位受到物光波调制的结果。

假设全息图经数字化后离散为 $N_x \times N_y$ 个点, 记录全息图的CCD光敏面尺寸为

$L_x \times L_y$, 则通过空间采样后所记录的数字全息图可表示为

$$I(u, v) = I_H(x, y) \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \sum_u \sum_v \delta(x - u\Delta x, y - v\Delta y) \quad (4)$$

其中, $(u, v = -N/2, -N/2+1, \dots, N/2-1)$ 。 Δx 和 Δy 分别是 x 和 y 方向的采样间隔,

且 $\Delta x = L_x/N_x$, $\Delta y = L_y/N_y$, δ 表示二维脉冲函数, 矩形函数 $\text{rect}(x/L_x, y/L_y)$ 表示CCD靶面的有效面积。

由于数字全息是使用CCD代替全息干板记录全息图, 因此想获得高质量的数字全息图, 并完好重现物光光波, 必须保证全息图表面上的光波的空间频率与记录介质的空间频率之间满足奈奎斯采样定理, 即记录介质的空间频率必须是全息图表面上光波的空间频率的两倍以上。但是由于摄像机分辨率(约100线/mm)比全息干板等传统记录介质的分辨(约5000线/mm)低的多, 而且CCD靶面较小, 因此数字全息的记录条件不容易满足, 记录结构的考虑也有别于传统全息。目前数字全息技术仅限于记录和再现较小物体低频信息, 切对记录条件有其自身要求, 因此想成功记录数字全息图, 就必须合理的设计实验光路。

设物光和参考光在全息图表面上的最大夹角为 θ_{\max} , 则摄像机平面上形成

最小的条纹间距 Δe_{\min} 为:

$$\Delta e_{\min} = \frac{\lambda}{2\sin(\theta_{\max}/2)} \quad (5)$$

所以全息图表面上光波的最大空间频率为:

$$f_{\min} = \frac{2\sin(\theta_{\max}/2)}{\lambda} \quad (6)$$

一个给定的CCD像素大小为 Δx , 根据采样定理, 一个条纹周期 Δe 至少要等于大于2倍像素周期, 即 $\Delta e \geq 2\Delta x$, 记录信息才不会失真。由于数字全息光路中所允许的物光和参考光夹角 θ 很小, 因此 $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$, 有:

$$\theta \leq \frac{\lambda}{2\Delta x} \quad (7)$$

所以

$$\theta_{\max} = \frac{\lambda}{2\Delta x} \quad (8)$$

在数字全息图的记录光路中,参考光与物光的夹角范围受到摄像机分辨率的限制。由于现有摄像机分辨率较低,因此只有尽可能减小参考光和物光夹角才能保证携带物体信息的物光中的振幅和相位被全息图完整的记录下来。摄像机的像素尺寸一般在5-10微米范围内,故参考光和物光夹角最大值在2-4度范围内。

2) 数字全息图的再现

随着数字全息技术的发展,出现了多种类型的数字全息图。从物光和参考光的位置是否同轴考虑,可以分为同轴数字全息图和离轴数字全息图;从记录时物体与全息图的相对位置考虑,可以分为菲涅耳数字全息图、夫琅禾费数字全息图和数字像面全息图。数字全息图的数值再现方式主要有两种:第一种是由计算机程序完成数字全息图的衍射及成像等过程,获得重构的物光光波场,再通过数字显示设备显示光波场的强度图像;第二种是由计算机程序对数字全息图进行简单处理,再借助液晶空间光调制器(Liquid crystals-Spatial light modulators, LC-SLM)、数字微镜(Digital Micromirror Device, DMD)等衍射成像设备来获得重构的物光光波场。

从摄像机记录的光波场,到以数字形式存储全息图,再到数值再现全息图,数字全息技术的这一过程可以看作是一个数字化的相干光学成像系统,它能产生一个复波场,而这个复波场是经原始物体折射或衍射的像。对于这个成像系统,只要在物场给定一个输入函数,就能在像场得到一个输出函数。

根据数字全息图成像方式的不同,也需要选择不同的再现系统。下面对目前应用广泛的菲涅耳数字全息图和数字像面全息图的再现系统原理进行简要介绍。

如图1所示, $x_I y_I$ 面是数值再现的成像平面,与全息平面相距 d ,也称为再现距离。 $U_I(x_I, y_I)$ 是再现像的复振幅分布,因为它是一个二维复数矩阵,所以可以同时得到再现像的强度和相位分布。

菲涅耳数字全息图再现过程就是一个菲涅耳衍射过程,根据衍射原理和再现距离可得再现平面上的光场分布,即:

$$U_I(x_I, y_I) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \iint_{-\infty}^{\infty} I(u, v) C(u, v) \exp\left\{\frac{jk}{2d}[(x_I - u)^2 + (y_I - v)^2]\right\} du dv \quad (9)$$

式中, $C(u, v)$ 为计算机模拟的再现光复振幅分布。

将(9)式中二次相位因子 $(x_I - u)^2 - (y_I - v)^2$ 展开,

$$U_I(x_I, y_I) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \iint I(u, v) C(u, v) \exp\left[\frac{jk}{2d}(u^2 + v^2)\right] \exp\left[-j2\pi \frac{1}{\lambda d}(ux_I + vy_I)\right] du dv \quad (10)$$

在满足菲涅耳衍射的条件下,为了获得清晰的再现像, $|d|$ 必须等于 d_0 (记录

距离)。当 $d = -d_0 < 0$ 时, 原始像在焦, 再现像 $U_I(x_I, y_I)$ 包含物光波原始像的复振幅分布。其中:

$$U_I(x_I, y_I) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \exp[-j2\pi \frac{1}{\lambda d} (x_I^2 + y_I^2)] \times F^{-1}\{I(u, v)C(u, v) \exp\left[-\frac{jk}{\lambda d} (u^2 + v^2)\right]\} \quad (11)$$

当 $d = d_0 > 0$ 时, 共轭像在焦, 再现像 $U_I(x_I, y_I)$ 包含物光波共轭像的复振幅分布。其中:

$$U_I(x_I, y_I) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \exp[\frac{j\pi}{\lambda d} (x_I^2 + y_I^2)] \times F^{-1}\{I(u, v)C(u, v) \exp\left[\frac{jk}{\lambda d} (u^2 + v^2)\right]\} \quad (12)$$

在菲涅耳数字全息图的数值再现过程中, 同样可以根据衍射距离的不同选择 S-FFT 或 D-FFT 方法进行再现计算。

数字像面全息图是物光场的像与参考光在全息平面干涉的强度分布 $I_H(x, y)$ 。因此 $I(u, v)$ 的傅里叶变换频谱 $I(f_u, f_v)$ 将包含原始物光波的频谱, 同时存在物光共轭像的频谱及零级衍射光。如果利用频谱滤波或在参考光中引入相移等方法消除共轭像的频谱及零级衍射光, 这样就将得到物光场在全息平面 xy 面上的像的频谱 $I_o(f_u, f_v)$, 再通过傅里叶反变换, 就可以获得物光场的像的复振幅分布 $U_I(x_I, y_I)$ 。

容易看出, 再现像的强度分布 $I_I(x_I, y_I)$ 和相位分布 $\Phi_I(x_I, y_I)$ 都可以由复振幅分布 $U_I(x_I, y_I)$ 计算得到 (* 表示共轭):

$$I_I(x_I, y_I) = U_I(x_I, y_I) U_I^*(x_I, y_I) \quad (13)$$

$$\Phi_I(x_I, y_I) = \arctan \frac{\text{Im}[U_I(x_I, y_I)]}{\text{Re}[U_I(x_I, y_I)]} \quad (14)$$

其中, $\text{Im}[U_I(x_I, y_I)]$ 和 $\text{Re}[U_I(x_I, y_I)]$ 分别表示 $U_I(x_I, y_I)$ 的虚部和实部。

3) 优化数字全息再现像质量的若干方法

在采用离轴方式记录全息图时, 只要在全息图记录过程中满足再现像的分离条件, 再重现过程中就可以使再现像、共轭像和直投光分开。但数字再现时, 除能得到想要的物信息, 直投光和共轭像也同时能出现在屏幕上以杂乱的散射光出现, 二者对于实验影响较大, 特别是直射光, 由于占据大部分能量而在屏幕的当中形成一个亮斑, 致使再现像由于亮度较低, 在屏上不易显示出来。如果能将直射光和共轭光的影响去除, 那么数字全息的再现像质量将会有较大提高。

(1) 空域滤波及频域滤波

传统全息也会通过滤波来达到消除直透光和共轭像的目的,通常是在光路当中的适当位置放入滤光装置,只允许形成再现像那部分空间频率的光通过,控制其它空间频率的光不通过,从而达到滤波的目的,这种空域滤波的方法对实验光路的设计要求很高。而数字全息出现以后,就可以直接对 CCD 上采集到的全息图进行频域滤波,即对采集到的全息图进行傅立叶变换,得到其空间频谱分布,在空间频谱上直接进行滤波处理。对参物光干涉后的全息图光强进行傅立叶变换得到的空间频谱分布,对此频谱图可采用频域滤波将直透光和共轭像的频谱去除掉干扰项,而只剩下再现像的频谱项,然后再单独对它进行傅立叶逆变换,得到一幅只剩下物信息项的全息图,然后用一般的数字再现方法对它进行再现。由于此全息图中去除了直透光和共轭像频谱,所以再现结果中也只有物体再现像出现。这种方法与传统全息空域滤波去除直透光和共轭像的思路一致,只不过数字全息频域滤波的傅立叶变换和滤波过程是在计算机上处理,因此该方法的实验光路简单,实用性强。但经两次傅立叶正反变换和滤波处理后很容易造成部分有用信息的丢失,最终引起再现像的模糊甚至扭曲变形,这在对物体进行形貌测量时尤为明显。

(2) 相移技术

相移技术是通过给记录光路的参考光引入特定的相位变化,得到几幅有固定相位差的全息图,再把它们进行叠加,特定相位差的全息图在叠加过程中可能使得直透光和共轭像相互抵消而去除。其中最为常用的是四步相移,它是分时记录下参考光进行 0 、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ 相移后的 4 幅全息图进行叠加的,如采用同轴四步相移的方法,得到的四幅全息图进行如下叠加。可见四幅全息图的叠加已经完全去除了直透光和共轭像,并且使物光振幅变为原来的 4 倍,强度信息则变为原来的 16 倍,因此再现像的信噪比也得到很大的改善。

现在已经有人在尝试使用更多步的相移技术,而且进行相移的方法也多种多样,有采用压电陶瓷进行相移的;有采用液晶光阀和计算机产生计算相移的;有用步进电机进行相移的;有用一块平面镜旋转不同的角度来得到不同相移。即使这样要彻底去除零级衍射光和共轭像至少需要分时采集四幅全息图,因此对实验设备和环境稳定性有较高要求,且只能用于静止不动的物体的记录,对于要进行实时记录就难于实现了。

(3) 全息图相减法去直透光

数字全息图相减法去除直透光其实质也是一种引入相移的方法。由于在引入相移过程对于直透光是没有影响的,因此任意相位相移后的两幅全息图相减都可以彻底去除直透光。但要同时使得再现像和共轭像得到增强就可采用 p 步相移,用未引入相移前的全息图和引入相移的全息图相减去除了直透光。并使物体再现像和共轭像的振幅变为原来的两倍,光强变为原来的四倍。上述全息图相减的方法,可以采用任意相位的相移,甚至不需要相移,对实验设备和环境要求更低,易于操作和实现,但共轭像的影响没有去除,所以仍然需要进一步的滤波处理。

(4) 基于拉氏算子和梯度算子的图像预处理

拉普拉斯算子和梯度算子都是数字图像处理中用于图像锐化、增强的工具,常用来提取图像的边界。拉普拉斯算子比较适用于改善因为光线的漫反射造成的图像模糊。当图像的模糊是由光的漫反射造成时,不模糊图像等于模糊图像减去它的拉氏变换的常数倍。另外,即使模糊不是由于光的漫反射造成的,对图像进行拉氏变换也可以使图像更加清晰。用 CCD 采集的数字全息图是以像素形式离

散化存储在计算机里的，对其中任意一个像素的光强值作二维拉普拉斯处理，使图像边界凸显出来，而光强分布相对均匀的直透光就能得到抑制。在相关文献中梯度算子也可来提取图像边界，抑制图像低频信息的。经过预处理后的全息图可以再结合频域滤波或在频域用窗函数选择所需频谱进行再现。

2、计算模拟全息的记录与再现

1) 物面和全息图面的抽样及计算

数字计算机通常只能对离散的数字信号进行处理，并以离散的形式输出。因此，制作计算全息图的第一步是对物波函数进行抽样。设待记录的物波函数为

$$f(x, y) = a(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \quad (15)$$

其傅里叶变换（空间频谱）为

$$F(u, v) = A(u, v) \exp[i\phi(u, v)] \quad (16)$$

为满足抽样定理的要求，物波函数及其空间频谱函数必须是带限函数，即

$$\begin{aligned} f(x, y) &= 0 & |x| \geq \frac{\Delta x}{2}, & |y| \geq \frac{\Delta y}{2} \\ F(u, v) &= 0 & |u| \geq \frac{\Delta u}{2}, & |v| \geq \frac{\Delta v}{2}. \end{aligned} \quad (17)$$

在此条件下，根据抽样定理，对物函数及其频谱函数的抽样间隔应为：

$$\begin{aligned} \delta x &\leq \frac{1}{\Delta u}, & \delta y &\leq \frac{1}{\Delta v} \\ \delta u &\leq \frac{1}{\Delta x}, & \delta v &\leq \frac{1}{\Delta y}. \end{aligned} \quad (18)$$

取(18)式中的等号，抽样单元总数 $M \times N = \Delta x \Delta y \Delta u \Delta v$ 是相同的。

对于傅里叶变换全息图，全息图上记录的是物波的空间频谱 $F(u, v)$ ，因此必须对物波函数进行离散傅里叶变换。离散傅里叶变换的公式如下：

$$F(j, k) = \sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} f(m, n) \exp[-i2\pi(\frac{jm}{M} + \frac{kn}{N})] \quad (19)$$

为了减少运算时间，通常采用快速傅里叶变换（FFT）算法。计算结果一般为复数：

$$f(m, n) \xrightarrow{\text{FFT}} F(j, k) = F_r(j, k) + iF_i(j, k) \quad (20)$$

其振幅和位相可分别表示为：

$$A(j, k) = \sqrt{F_r^2(j, k) + F_i^2(j, k)}, \quad \phi(j, k) = \tan^{-1}\left(\frac{F_i(j, k)}{F_r(j, k)}\right) \quad (21)$$

2) 编码及绘制全息图

编码的目的就是将计算出的全息图面上的复振幅函数转化成实值函数（全息图透过率函数）。下面简要介绍 Lohmann 等人提出的迂回相位型计算全息图的编码方法。

一般说来，对于光波的振幅进行编码比较容易，例如可以通过控制全息图上抽样单元的透过率或开孔大小来实现。但是，对于光场的相位信息进行

编码则相对比较困难。虽然从原理上可以通过改变抽样单元的厚度或折射率来实现相位调制，但实际制作非常困难。美国科学家 Lohmann 巧妙的利用了不规则光栅的衍射效应，提出了迂回相位编码方法。

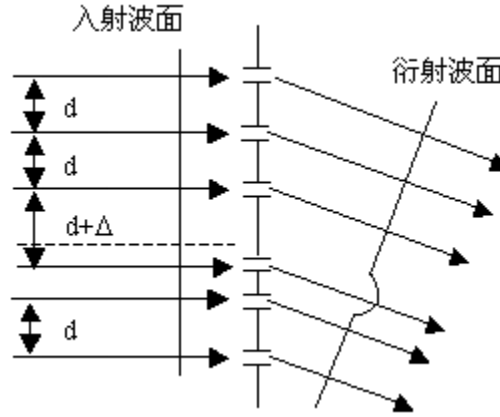


图 2 各级衍射光的等相位图

如图 2 所示，当用一束平面波垂直照明一栅距 d 恒定的平面光栅时，产生的各级衍射光仍为平面波，等相位面为垂直于相应衍射方向的平面。根据光栅方程，光栅的任意两条相邻狭缝在第 K 级衍射方向的光程差为：

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_k = 2\pi K \quad (22)$$

是等相位的。如果某一点的狭缝位置有偏差，如栅距增大了 Δ ，则该处在第 K 级衍射方向的衍射光的光程差变为 $L' = (d + \Delta) \sin \theta_k$ ，从而导致一附加相移：

$$\phi_K = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta \sin \theta_k = 2\pi K \frac{\Delta}{d} \quad (23)$$

Lohmann 称这种位相为迂回位相。迂回位相的值与相对偏移量 Δ/d 和衍射级次 K 成正比，与入射光波的波长无关。迂回相位效应表明，通过局部改变狭缝或开孔位置，可以在某个衍射方向得到所需要的位相调制。Lohmann 正是基于这一原理提出了迂回相位编码方法。其基本思想是，在全息图的每个抽样单元中，放置一个通光孔径，通过改变通光孔径的面积来实现光波场的振幅调制，而通过改变通光孔径中心距抽样单元中心的位置来实现光场相位的编码。通光孔径的形状可以是多种多样的，可根据实际情况来选取。

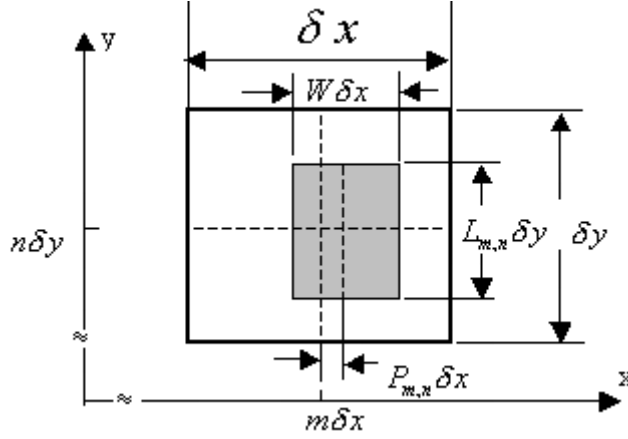


图 3 抽样单元的示意图

图 3 所示是采用矩形通光孔径编码的计算全息图的一个抽样单元的示意图。图中， δx 和 δy 为抽样单元的抽样间隔， $W\delta x$ 为开孔的宽度， $L_{mn}\delta y$ 为开孔的高度， $P_{mn}\delta x$ 为开孔中心到抽样单元中心的距离。我们可以选取矩形孔的宽度参数 W 为定值，用高度参数 L_{mn} 和位置参数 P_{mn} 来分别编码光波场的振幅和位相。设待记录光波场的归一化复振幅分布函数为：

$$f_{mn} = A_{mn} \exp(j\phi_{mn}) \quad (24)$$

则孔径参数和复振幅函数的编码关系为：

$$L_{mn} = A_{mn} \quad , \quad P_{mn} = \frac{\phi_{mn}}{2\pi K} \quad (25)$$

利用这种方法编码的计算全息图的透过率只有 0、1 两个值，故制作简单，抗干扰能力强，对记录介质的非线性效应不敏感，可多次复制而不失真，因而应用较为广泛。

当计算机完成了计算全息图的编码后，按计算得到的全息图的几何参数来控制成图设备以输出计算全息图。

3) 全息图再现

计算全息图的再现与光学全息类似，不同的是实验过程中通过软件模拟平面波光场，模拟物信息记录的实验条件，所以模拟仅在特定的衍射级次上才能再现我们希望的波前。

3、空间光调制器实时再现

随着计算机和采集技术的发展，在传统全息实验基础上，人们逐渐用高分辨率的 CCD 摄像机来替代全息记录干板来采集全息图。由于摄像机记录了含有物光信息的全息图，如果能将此全息图加载到再现光路上，那么就能完成光学再现。空间光调制器恰好可对光进行振幅调制和相位调制，能完成全息图加载光路的工作。下面对空间光调制做简单介绍。

1) 空间光调制器

空间光调制器是一类能将信息加载于一维或二维的光学数据场上，以便有效的利用光的固有速度、并行性和互连能力的器件。这类器件可在随时间变化的电驱动信号或其他信号的控制下，改变空间上光分布的振幅或强度、相位、偏振态以及波长，或者把非相干光转化成相干光。由于它的这种性质，可作为实时光学信息处理、光计算等系统中构造单元或关键的器件。空间光调制器是实时光学信

息处理，自适应光学和光计算等现代光学领域的关键器件，很大程度上，空间光调制器的性能决定了这些领域的实用价值和发展前景。

空间光调制器一般按照读出光的读出方式不同，可以分为反射式和透射式；而按照输入控制信号的方式不同又可分为光寻址(OA-SLM)和电寻址(EA-SLM)。最常见的空间光调制器是液晶空间光调制器，应用光—光直接转换，效率高、能耗低、速度快、质量好。可广泛应用到光计算、模式识别、信息处理、显示等领域，具有广阔的应用前景。

想定量分析液晶屏对光的调制特性，需要将调制过程用数学方法来模拟，液晶盒里的扭曲向列液晶可沿光的透过方向分层，每一层可看作是单轴晶体，它的光学轴与液晶分子的取向平行。由于分子的扭曲结构，分子在各层间按螺旋方式逐渐旋转，各层单轴晶体的光学轴沿光的传输方向也螺旋式旋转。如图 3 所示。

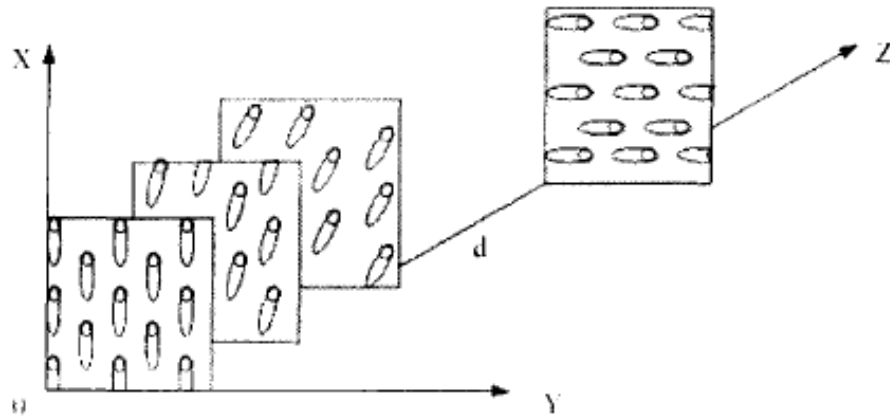


图 3 TNLC 分层模型

在空间光调制器液晶屏的使用中，光线依次通过起偏器 P_1 、液晶分子、检偏器 P_2 ，如图 4 所示。光路中要求偏振片和液晶屏表面都在 $x-y$ 平面上，图中已经分别标出了液晶屏前后表面分子的取向，两者相差 90° 。偏振片角度的定义是，逆着光的方向看， ϕ_1 为液晶屏前表面分子的方向顺时针到 P_1 偏振方向的角度， ϕ_2 为液晶屏后表面分子的方向逆时针到 P_2 偏振方向的角度。偏振光沿 z 轴传输，各层分子可以看作具有相同性质的单轴晶体，它的 Jones 矩阵表达式与液晶分子的寻常折射率 n_o 和非常折射率 n_e ，以及液晶盒的厚度 d 和扭曲角 α 有关。除此之外，Jones 矩阵还与两个偏振片的转角 ϕ_1 ， ϕ_2 有关。因此光波强度和相位的信息可简单表示为 $T = T(\beta, \phi_1, \phi_2)$ ； $\delta = \delta(\beta, \phi_1, \phi_2)$ ，其中 $\beta = \pi d [n_e(\theta) - n_o] / \lambda$ 又称为双折射，它其实为隐含电场的量，因为 β 为非常折射率 n_e 的函数，非常折射率 n_e 随液晶分子的倾角 θ 改变， θ 又随外加电压而变化。

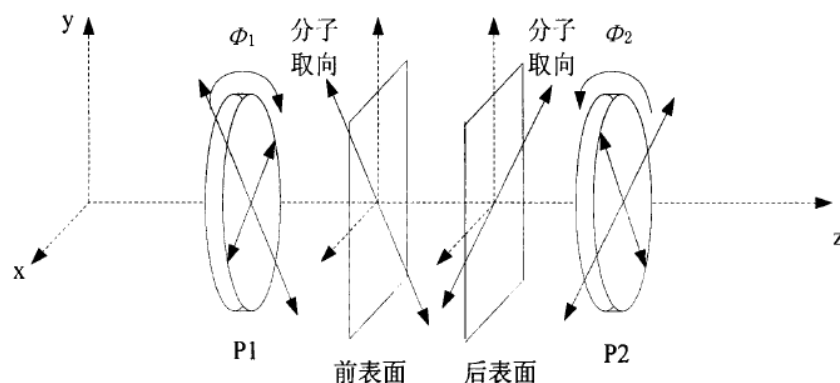


图 4 SLM 光路示意图

目前主流的液晶显示器组成比较复杂，它主要是由荧光管、导光板、偏光板、滤光板、玻璃基板、配向膜、液晶材料、薄膜式晶体管等构成。作为空间光调制器来使用时，通常只保留液晶材料和偏振片。液晶被夹在两个偏振片之间，就能实现显示功能，光线入射面的称为起偏器，出射面的称为检偏器。实验时通常将这两个偏振片从液晶屏中分离出来，取而代之的是可旋转的偏振片，这样方便调节角度。在不加电压和加电压的情况下液晶屏的透光原理如图 5 所示。

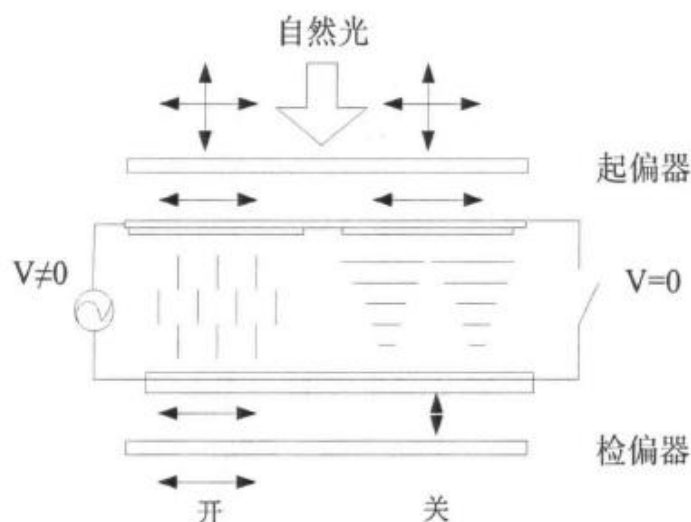


图 5 液晶屏的透光原理

图 5 中液晶屏两侧的起偏器和检偏器相互平行，自然光透过起偏器后变为线偏振光偏振方向为水平。右侧 $V=0$ ，不加电压，液晶分子自然扭曲 90° ，透过光的偏振方向也旋转 90° ，与检偏器方向垂直，无光线射出，即为关态。然而在左侧 $V \neq 0$ ，分子沿电场方向排列，对光的偏振方向没有影响，光线经检偏器射出，即为开态。这样即实现了通过电压控制光线通过的功能。

2) 空间光调制器实时再现

利用空间光调制器来代替传统全息干板，可以实现传统全息实验中无法实现的实时全息功能。但由于液晶空间光调制器的分辨率比干板的低，当有参考光照射空间光调制器时衍射过程中物的振幅信息和相位信息都会有丢失，所以在记录全息图的时候我们一定要尽可能获得较完备信息。同时为提高再现信息质量，物体尺寸、记录距离、参物光干涉夹角以及共轭像的分离都可以作为实验中的优化参数。

4、数字全息在信息加密中的应用

在信息技术高度发达的今天，传统的信息安全技术如加密技术及身份验证技术等难以满足海量数据的处理需求。这是因为这些传统的信息安全技术主要依靠计算机或 DSP 等电子手段来实现，这些方法受到处理速度的限制。光学信息安全技术作为一种新的安全手段，近年来得到了快速发展，是对传统安全技术的重要补充和提升。基于光学理论与方法的数据加密和信息隐藏技术是近年来在国际上开始逐步发展的新一代信息安全理论与技术。并行数据处理是光学系统固有能力和，如在光学系统中的一幅二维图像中的每一个像素都可以同时地被传播和处理。当进行大量信息处理时，光学系统的并行处理能力很明显占有优势，并且所处理的图像越复杂，信息量越大，这种优势越明显。同时，光学加密装置比电子加密装置具有更多的自由度，信息可以被隐藏在多个自由度空间中。在完成数据加密或信息隐藏的过程中，可以通过计算光的干涉、衍射、滤波、成像、全息等过程，对涉及的波长、焦距、振幅、光强、相位、偏振和空间频率及光学元件的参数进行多维编码。与传统的基于数学的计算机密码学和信息安全技术具有多维、大容量、高设计自由度、天然的并行性、难破解等诸多优势。

由于数字全息的灵活性，我们将其应用于数字图像加密领域。依据上文中提到的数字全息的记录和再现原理，将明文作为物光信息，则全息记录图即为密文，根据光学衍射传播原理，加密和解密的算法即为菲涅尔衍射算法，在整个全息系统中的波长和再现距离都可以作为密钥。这样便构成了一个完整的信息安全密码系统。在加密中可以在计算全息中通过菲涅尔计算生成明文信息的物光衍射全息图。在解密时将衍射全息图写入到空间光调制器中，用特定的波长在指定的光路中可以再现明文信息。

本实验所展现的是数字全息在信息安全中的简单应用，主要是帮助学生理解数字全息和信息安全的一些概念。从 1995 年 Philippe Refregier 等人提出了双随机相位编码方法开始了掀起光学加密的研究热潮。研究人员相继提出了一些在双随机相位编码方法基础上的新方法，比如，纯相位加密、基于分数傅里叶变化的加密方法，基于菲涅尔变换的加密方法、基于联合变换相关器的加密系统、利用离轴全息数字全息的加密系统和利用相移干涉技术的数字全息加密系统等。

光学信息处理有着处理速度快、信息容量大、能够实现快速卷积、密钥空间大且具有并行处理等方面的优势，所以说光学信息处理在加密和信息隐藏中具有很大的潜力。

五、 实验内容与步骤

本实验系统对全息技术做出了全面地展示，具体有一定前沿性和综合性。如果从全息角度区分，实验内容包括计算机模拟全息、数字全息、可视数字全息、实时传统全息。如果从记录方式和光学再现方式的角度区分，实验内容可分为数

字记录，数字再现；光学记录，数字再现；数字记录，光学再现；光学记录、光学再现。图一给出了实验内容的整体规划示意图。

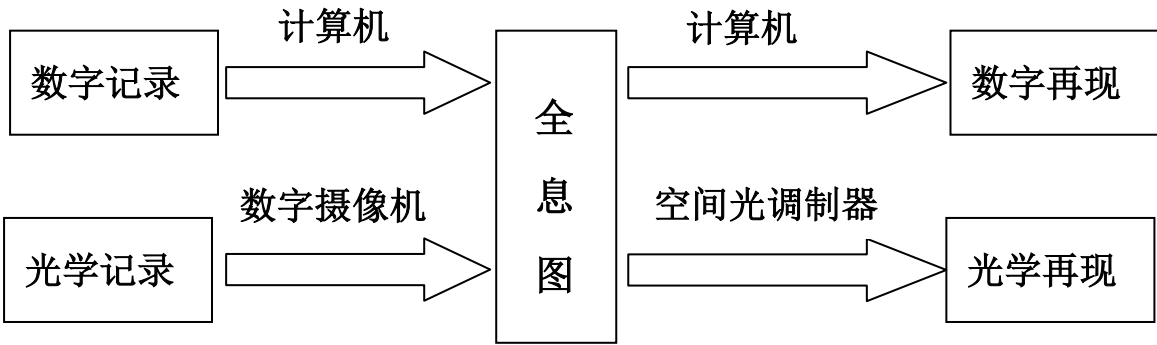


图 6 数字全息整体实验方案

1、计算机模拟全息（数字记录，数字再现）

计算模拟全息分为两个过程，第一是通过计算机计算出一副图片的全息图，第二个过程仍然是通过计算机将全息图重建，重建之后就能得到初始的图片。

根据实验原理编写程序，下面给出程序演示结果，打开“holography.exe”

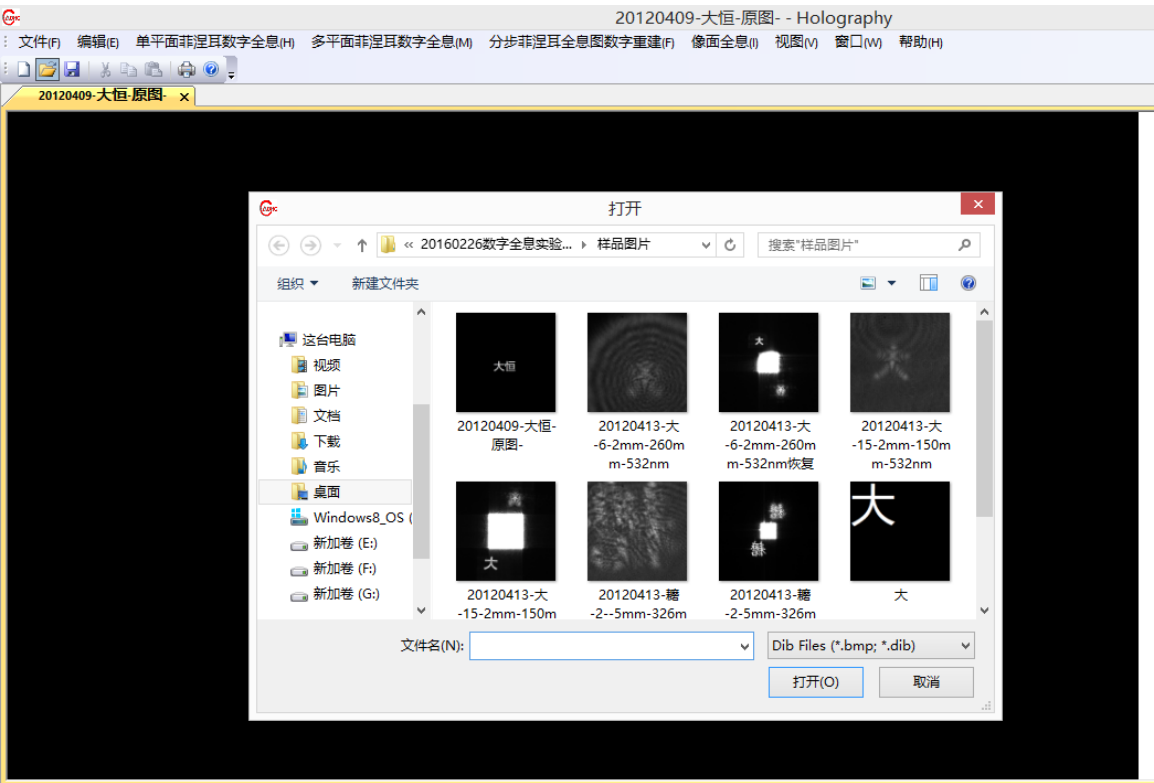


图 7

1) 读取文件，在菜单栏点击“文件—>打开”，如图 7 所示，物信息图片尺寸为 1024*1024，一般的物信息尺寸在整尺寸的四分之一或者五分之一，点击图片，“打开”会有图 8。

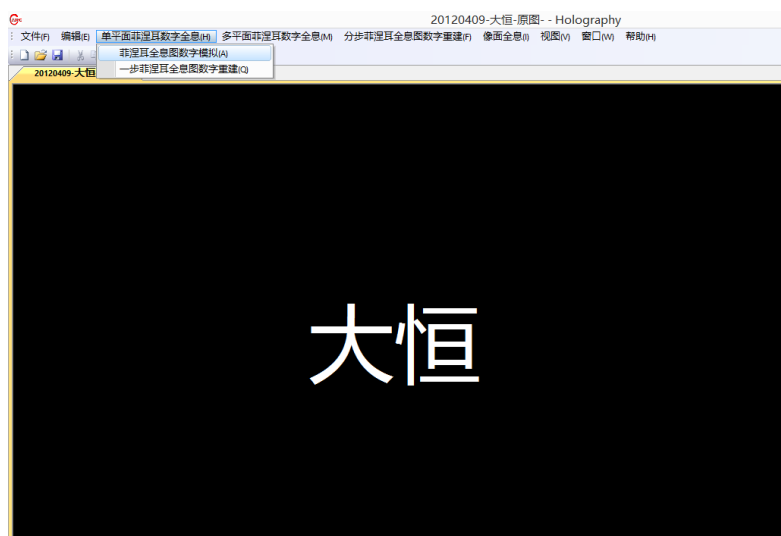


图 8

2) 点击菜单栏中的“单平面菲涅尔数字全息—>菲涅尔全息图数字模拟”会有图 9 的参数设置。在模拟时可以不更改默认参数。放大率一栏一般为 1。也可更改现有参数比如记录距离调整为 1000mm，放大率为 1。

单色数字全息参数	
记录距离1:	1000 mm
光波长:	532 nm
CCD宽度:	1024 pixels
CCD高度:	1024 pixels
CCD像素尺寸:	5.2 um
模拟物光场宽度:	102.3 mm
模拟物光场高度:	102.3 mm
参考光与Z轴夹角:	2 °
参考光与X轴夹角:	88.58 °
参考光与Y轴夹角:	88.58 °
强度放大因子:	1

图 9

3) 点击“OK”，程序会自动运行，随后输出图 10 全息图

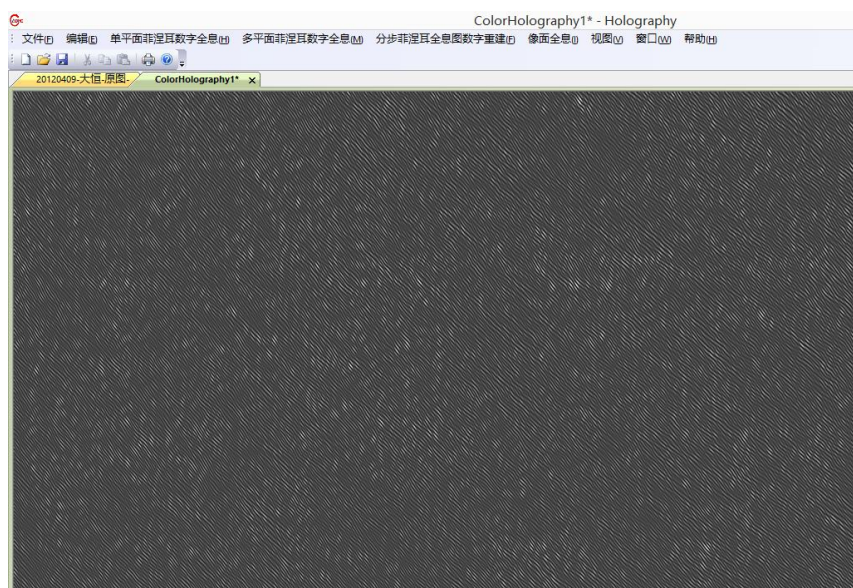


图 10

4) 点击菜单栏中的“单平面菲涅耳数字全息—>一步菲涅耳全息数字重建”会弹出参数对话框，再现参数要和模拟参数相同，点击“OK”，软件计算之后会将重建结果输出到屏幕上，有图 11 结果。如果再现参数（再现距离和记录波长）与记录参数不用得到的图像会变模糊。

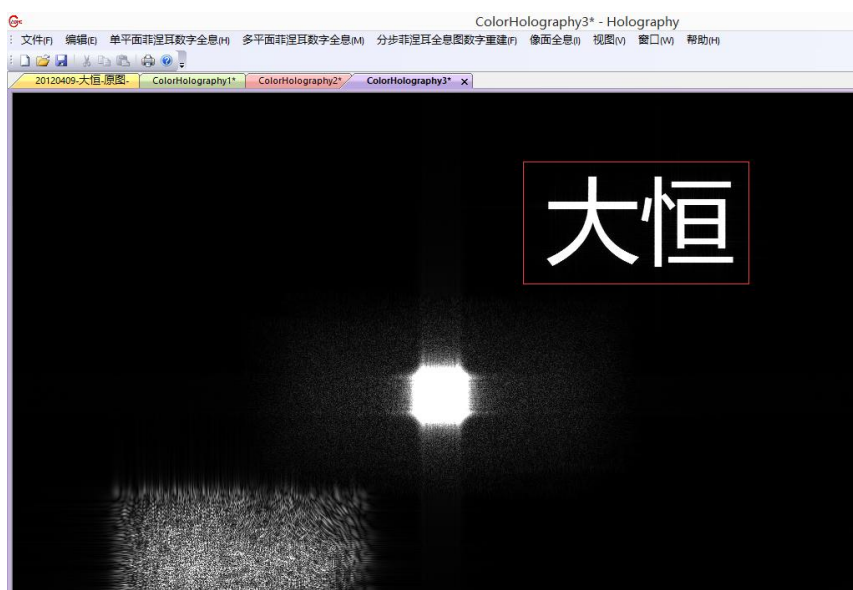


图 11 数字再现图

图中右上角白框中圈出的“大恒”字便是重建结果。

2、可视数字全息（数字记录，光学再现）

可视数字全息分为两个过程，一是将一副图片通过计算软件得到其全息图，二是将得到的全息图加载到空间光调制器上，在光路中将物信息再现出来。

1) 仍以图 12 “大恒”为例讲述本实验过程，图片为 1024*1024，打开操作软件，在软件中加载此图片：



图 12

2) 参考实验 1 中获得全息图的方法, 可得到下面得到“大恒”的计算全息图, 如图 13, 将图像存储到指定文件夹中, 图片大小为 1024×1024 , 格式为 bmp, 记录距离为 300mm, CCD 像素大小 $18\mu\text{m}$ (也可以默认 $5.2\mu\text{m}$) 条件下的全息图。

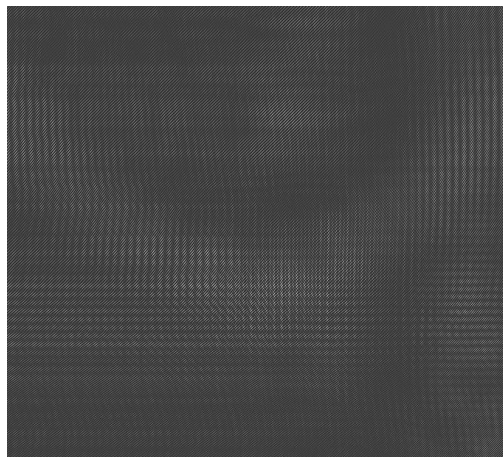


图 13

3) 搭建图 14 所给光路, 依次调整激光器、扩束系统、准直系统、空间光调制器、凸透镜和摄像机, 保证各器件同轴等高, 凸透镜可紧挨空间光调制器。

4) 调整电脑分辨率为 1024×768 使其与空间光调制器匹配, 将采集的全息图通过电脑加载到空间光调制器上。

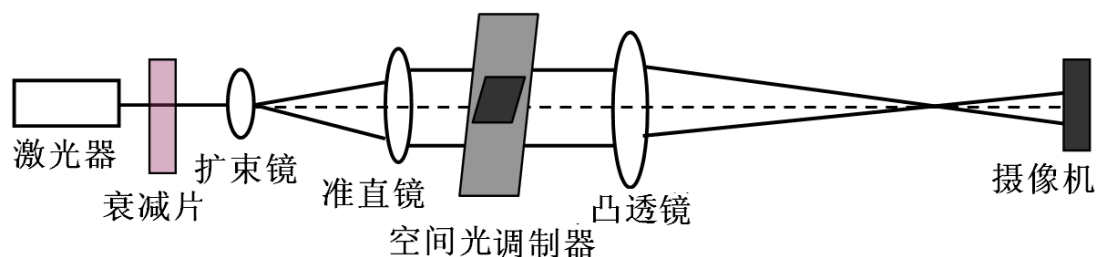


图 14 光学再现光路示意图

5) 当再现光源入射到空间光调制器上, 调整圆形可调衰减器和摄像机的采集时间, 在摄像机上可以看到再现像, 如下图 15 所示, 调整凸透镜与空间光调制器的距离能改变再现像的大小。

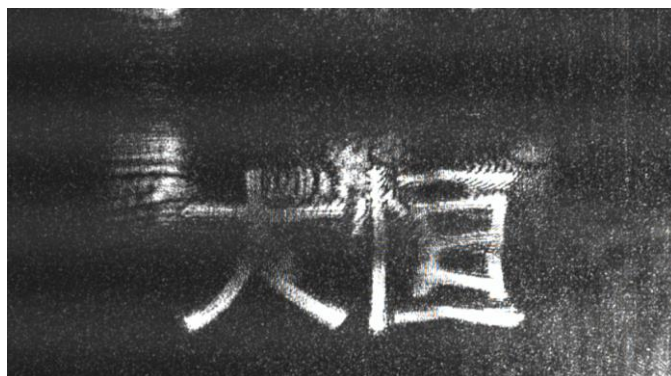


图 15 摄像机采集的再现图像

3、数字全息（光学记录、数字再现）

数字全息整个分为两个过程也分为两个过程, 第一个过程是通过光路获得全息图光路, 第二个过程是数字再现。

1) 透射数字全息获得可以通过搭建马赫曾德干涉光路获得全息图。调节光路, 根据图 16 透射光路示意图将激光器、扩束准直系统、分束镜、反射镜以及合束镜, 使各元件等高同轴。

2) 通过调整合束镜。可以改变条纹疏密, 待条纹较密但人眼仍可分辨时即可。

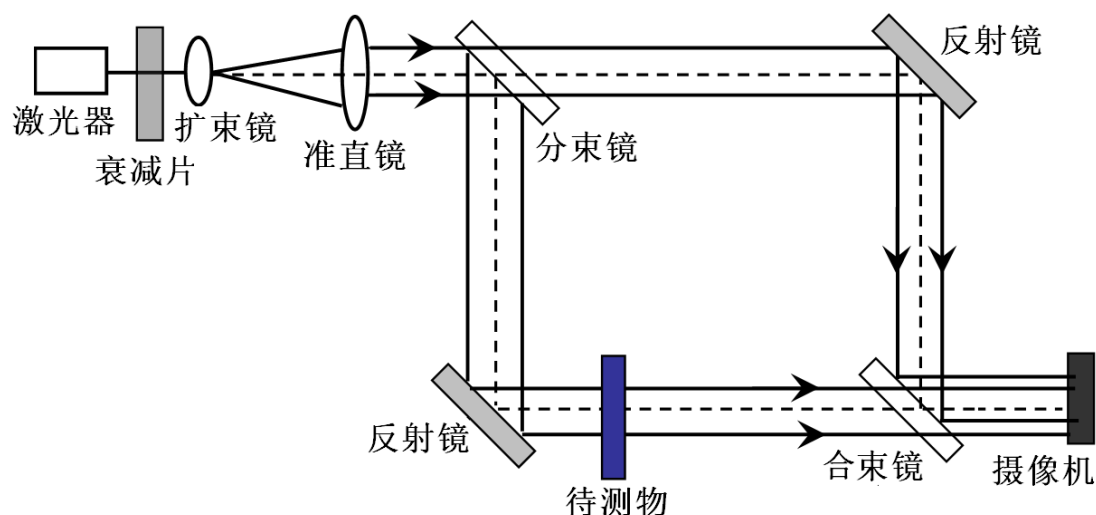


图 16 透射全息光路示意图

3) 摄像机与待测物的距离可有公式 $\Delta L_0 = \lambda d/p$ 确定, 式中 ΔL_0 为物体尺寸的 4 倍, λ 是光波长, d 为记录距离, p 为 CCD 的像元尺寸。其中再现距离长短一是影响再现物的大小, 一是影响 ± 1 级像与 0 级分开程度; 条纹疏密主要影响

±1 级像与 0 级分开程度，条纹越密分开角度越大，条纹越疏分开角度越小。例如：物体尺寸选 27mm，CCD 像素选 5.2um，光波长用 632.8nm,则记录距离应该选大于 854mm。由于实验过程中使用的激光波长是 532nm，所以记录距离可选择 150mm——450mm。

4) 调整摄像机的快门速度和增益获得一定灰度的全息，一般来讲，物光和参考光光强相近，单独一束光的灰度大于 25 即可。例如，确定快门速度为 100 微秒，.调整可调圆形衰减器即可获得合适灰度。

5) ,经摄像机采集后可获得大小为 1024*1024 的全息图，如图 17，将全息图通过数字全息软件便可恢复原物信息。

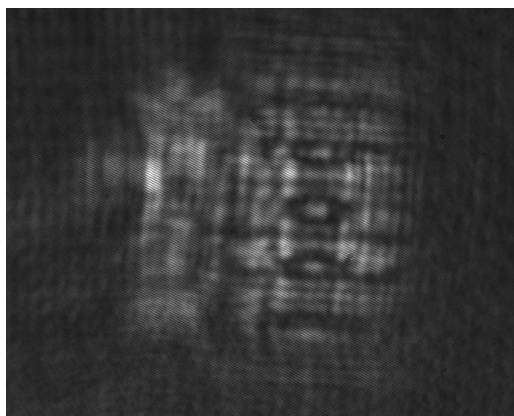


图 17

6) 再现过程可参考实验 1 中信息再现部分，首先运行软件之后打开全息图，然后点击菜单栏中的“单平面菲尔涅数字全息—>一步菲涅尔全息数字重建”会弹出参数对话框，再现参数要和光路采集的实际参数相同（记录距离、摄像机参数、记录波长、物体大小），点击“OK”，软件计算之后会将重建结果输出到屏幕上，经软件再现可得如图 18 的原物信息，需注意的再现过程放大率默认值为 25，实验过程中可根据实际再现的物信息效果调整放大倍数，放大倍数越大物与背景的对比度越高。

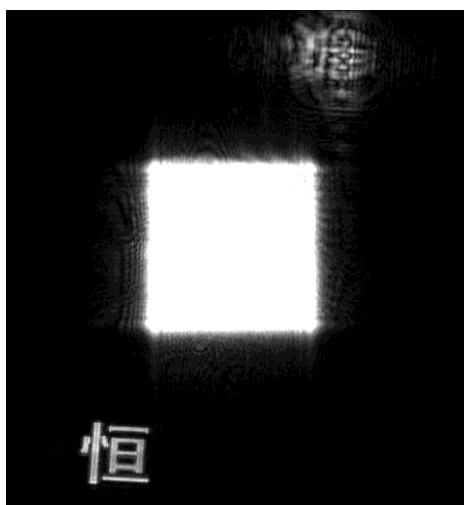


图 18

4、实时传统全息（光学记录、光学再现）

实时传统全息虽然是通过光路记录全息图和通过光路再现物信息，但是整个实验系统已经彻底放弃了干板这种记录介质，实验中利用高分辨 CMOS 摄像机和空间光调制器实时采集，实时再现，方便简单。实时传统全息也同样是分为两个过程，一是搭建干涉光路，用 CMOS 摄像机采集全息图。二是将全息图加载到空间光调制器上，让再现光入射，在空间光调制器后方放置 CCD 或 CMOS 采集再现图像。

1) 第一个过程可以参考实验 3 透射数字全息中采集部分，以“恒”为例，可以获得“恒”全息图，大小为 1024*1024，如图 21 所示。

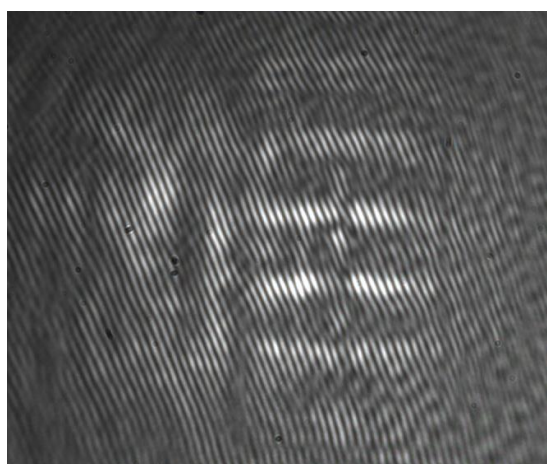


图 21 “恒”的透射全息图

2) 第二个过程的再现光路可参考实验 2 中光学再现部分。将获得的全息图加载到空间光调制器上，再现光路如图 14 所示。

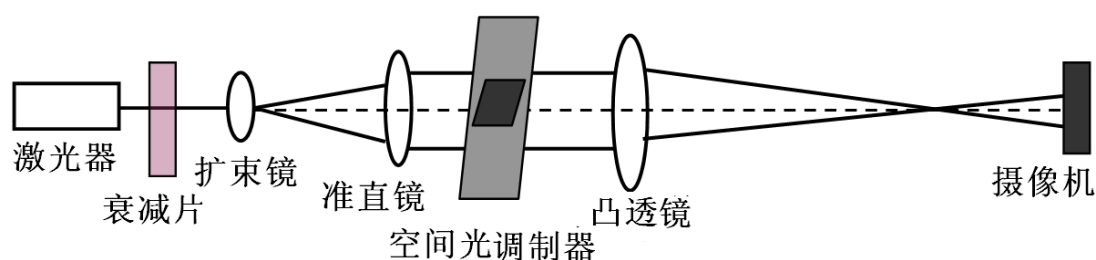


图 14 光学再现光路示意图

3) 根据以上光路我们采集到的再现图如为：



图 22 用 CCD 采集到的像信息

5 数字全息在信息加密中的应用（多平面菲涅尔全息数字模拟）

在研究数字全息技术中，波长和记录距离都可作为密钥应用到信息加密中，本实验根据数字全息特点选择两个待测物体使其携带不同物信息，对不同待测物放到同一光路，单纯改变记录距离获得复合信息的菲涅尔全息图，当数字再现时选择对应的记录距离便可将不同的物信息再现出来。

1) 点击“文件”→“打开”“大”，如图 23 所示，点击“多平面菲涅尔全息”→“获取图片 1”。以此类推，分别获取 2 和 3，如图 24。

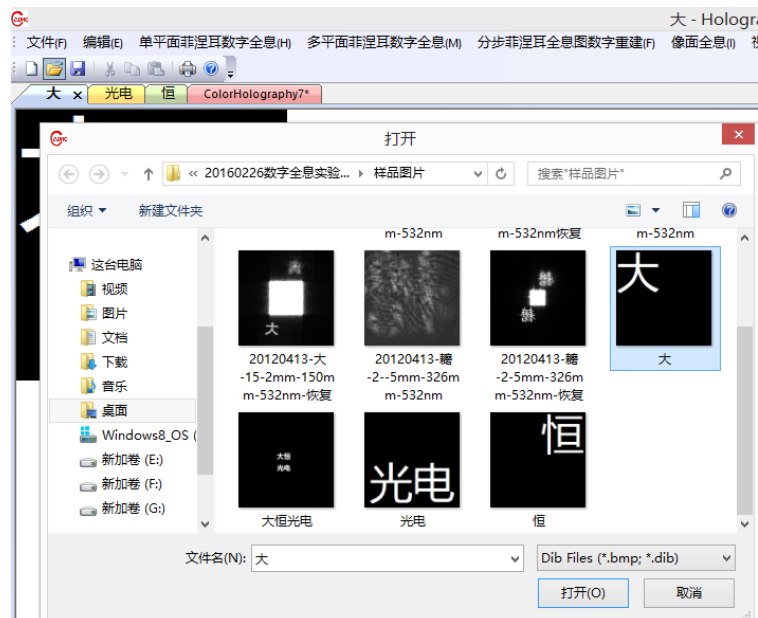


图 23

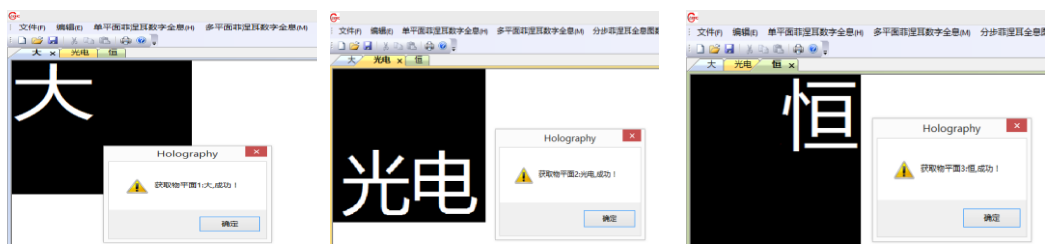


图 24

2) 点击“多平面菲涅尔全息”→“多平面菲涅尔全息数字模拟”出现如图 25 所示参数表，根据记录平面，记录距离分别选择 1000mm，800mm，1200mm 等，点击“确定”即可获得多平面全息图。

单色数字全息参数					
记录距离1:	1000	mm	光波长:	532	nm
记录距离2:	800	mm	模拟物光场宽度:	102.3	mm
记录距离3:	1200	mm	模拟物光场高度:	102.3	mm
CCD宽度:	1024	pixels	参考光与Z轴夹角:	2	°
CCD高度:	1024	pixels	参考光与X轴夹角:	88.58	°
CCD像素尺寸:	5.2	um	参考光与Y轴夹角:	88.58	°
参考光参数					
参考光类型: 平面波					
取消			确定		

图 25

3) 点击“单平面菲尔涅数字全息→一步菲涅尔全息数字重建”会弹出参数对话框，根据想再现的文字，选择记录距离，如果再现距离为 1000mm，那么再现为“大”，如图 26 所示。



4) 以此类推可以选择不同的再现距离获得不同的物信息, 完成多平面菲涅尔全息, 即完成以距离加密的数字全息。

六、 参考文献

- 1、宋菲君, 信息光子学物理[北京大学物理学丛书], 北京大学出版社, 2006
- 2、李俊昌 熊秉衡, 信息光学教程, 科学出版社, 2010 年 6 月
- 3、苏显渝 李继陶, 信息光学, 科学出版社, 2008
- 4、聂志红 宫爱玲, 云南民族大学学报, 数字全息中直透光和共轭像的去除方法 2007