GX 基于空间光调制器的空间频谱、滤波和数字全息实验

实验者: 周文斌 (　　)　陈敖宇 (　　)　指导老师: 陈文杰
中山大学物理学院，陆祐堂

摘　要: 本实验系统开展了基于空间光调制器 (SLM) 的空间频谱、滤波与数字全息实验研究，分为 GX1 空间频谱滤波与 GX2 数字全息两个核心部分。首先完成了 SLM 振幅调制曲线的测量，明确了其灰度值与透射光功率的非线性关系；基于 4f 光学信息处理系统，分别采用实物光栅与 SLM 虚拟光栅验证了阿贝成像原理的" 衍射分频-干涉合成" 两步傅里叶变换过程，观测到了 SLM 像素结构引入的二维杂散频谱现象；完成了低通、高通与方向滤波实验，验证了频谱改造对成像结果的调控规律，实现了图像去网纹、边缘增强与特定方向线条提取等图像处理功能。在数字全息部分，通过数值计算生成了振幅型傅里叶全息图并完成光学再现，搭建马赫曾德干涉光路完成了透明物体的全息图记录，利用 HolographicOpticsToolbox 软件实现了物光波前的数值再现，获得了清晰的物体像。实验结果完整验证了傅里叶光学与全息术的基础理论，掌握了 SLM 的光场调控特性与光学信息处理系统的搭建调试技能，为后续光学信息处理领域的研究与应用奠定了实验基础。

关键词: 空间光调制器；傅里叶光学；阿贝成像原理；空间滤波；计算全息；数字全息

Abstract: This experiment systematically conducted research on spatial spectrum, filtering and digital holography based on Spatial Light Modulator (SLM), which was divided into two core parts: GX1 spatial spectrum filtering and GX2 digital holography. Firstly, the amplitude modulation curve of SLM was measured, and the nonlinear relationship between its gray value and transmitted optical power was clarified. Based on the 4f optical information processing system, the two-step Fourier transform process of "diffraction frequency division-interference synthesis" of Abbe imaging principle was verified by using both physical grating and SLM virtual grating respectively, and the two-dimensional spurious spectrum phenomenon introduced by SLM pixel structure was observed. Low-pass, high-pass and directional filtering experiments were completed, which verified the regulation law of spectrum modification on imaging results, and realized image processing functions such as image de-screening, edge enhancement and specific direction line extraction. In the digital holography part, the amplitude-type Fourier hologram was generated by numerical calculation and optically reproduced. The Mach-Zehnder interferometer optical path was built to complete the hologram recording of transparent objects, and the numerical reconstruction of the object wavefront was realized by using HolographicOpticsToolbox software, obtaining clear object images. The experimental results fully verified the basic theories of Fourier optics and holography, and mastered the light field regulation characteristics of SLM as well as the construction and debugging skills of optical information processing systems, laying an experimental foundation for subsequent research and applications in the field of optical information processing.

Keywords: Spatial Light Modulator; Fourier Optics; Abbe Imaging Principle; Spatial Filtering; Computer-Generated Holography; Digital Holography

1 引言

随着信息时代对二维图像、视频等空间信息的高速、高精度处理需求日益增长，基于电子学的串行信号处理方法在数据吞吐量与并行处理能力上逐渐显现瓶颈，而以光波为信息载体的光学信息处理技术凭借超高并行性、超大信息容量、极短运算时间的核心优势，成为现代信息处理领域的重要研究方向。

傅里叶光学是现代光学信息处理的理论核心，其将傅里叶变换与光的衍射、成像过程相结合，首次通过频谱的概念诠释了相干光成像的物理本质。1873 年阿贝提出的成像理论，将相干成像过程分解为“衍射分频-干涉合成”的两次傅里叶变换，为空间滤波技术奠定了理论基础，也为光学图像的降噪、特征提取、边缘增强等处理提供了实现路径。空间光调制器作为可对光场振幅、相位等物理量进行实时调控的核心器件，突破了传统静态滤波片的限制，实现了光学信息处理的可编程化与动态调控，广泛应用于光计算、机器视觉、三维显示等领域。

全息术由伽伯于 1948 年提出，其通过干涉原理记录物光波的振幅与相位全部信息，再通过衍射原理实现波前再现，突破了传统光学成像仅能记录光强信息的限制，实现了真实的三维立体成像。传统光学全息依赖感光干版与化学湿处理，流程复杂且无法实时处理；而结合 SLM 的计算全息与基于 CCD 的数字全息技术，实现了全息图的数字化生成、记录与再现，大幅简化了实验流程，拓展了全息术在全息显微、精密测量、三维显示等领域的应用。

本实验分为 GX1 与 GX2 两个核心部分：GX1 基于 SLM 完成空间频谱与滤波实验，验证阿贝成像原理与空间滤波的核心规律；GX2 基于 SLM 完成计算全息与数字全息实验，掌握全息术的波前记录与再现原理。通过本实验，系统掌握傅里叶光学与全息术的基础理论，以及 SLM 的使用与光学系统搭建调试的核心技能。

2 实验目的

本实验分为空间频谱滤波与数字全息两大部分，核心实验目的如下：

1. 学习空间光调制器 (SLM) 的工作原理与使用方法，完成 SLM 振幅调制曲线的测量，掌握其光场调控特性；
2. 学习傅里叶光学的基础理论，理解阿贝成像原理的物理本质，通过实物光栅与 SLM 虚拟光栅完成阿贝成像原理的实验验证；
3. 掌握 4f 光学信息处理系统的搭建与调试方法，完成低通、高通、方向滤波等空间滤波实验，理解频谱改造对成像结果的调控规律；
4. 学习全息术的基本原理，掌握波前记录与波前再现的物理过程，理解计算全息与数字全息的技术特点与实现方法；
5. 完成计算全息图的数值计算、SLM 加载与光学再现，掌握振幅型傅里叶全息图的生成方法；
6. 搭建马赫曾德干涉光路完成数字全息图的光学记录，通过数值计算完成全息图的再现，掌握数字全息的实验与数据处理方法。

3 仪器用具

1. 光学平台及配套附件：凸透镜（焦距 50mm、70mm、150mm）、宽度可调狭缝、可变圆孔光阑、高通/低通/带通空间滤波器、一维光栅片、反射镜、分光棱镜、白屏、干版架、多维调整底座等；
2. 透射式液晶空间光调制器 (SLM)：分辨率 1024×768，像素大小 26μm×26μm；
3. 光纤耦合激光器：波长 650nm，功率 2mW，单模光纤耦合输出，纤芯直径 4μm，配套准直透镜与扩束镜；
4. CCD 相机：MER-310-12UC（分辨率 2048×1536，像素大小 3.2μm×3.2μm）、MER-630-60U3C-L（分辨率 3088×2064，像素大小 2.4μm×2.4μm）；
5. 光功率计，用于 SLM 调制曲线测量；
6. 实验测控用计算机 1 台

4 实验原理

4.1 傅里叶光学与空间滤波原理

4.1.1 光学傅里叶变换

在相干光学系统中，二维平面上的光场复振幅分布可通过傅里叶变换分解为不同空间频率的基元函数的线性叠加。设 XY 平面上的光场振幅分布为 $g(x,y)$，其傅里叶变换对为：

$$g(x,y)=\iint_{-\infty}^{+\infty} G\left(f_x,f_y\right)\exp\left[i2\pi\left(xf_x+yf_y\right)\right]df_xdf_y \tag{1}$$

$$G\left(f_x,f_y\right)=\iint_{-\infty}^{+\infty} g(x,y)\exp\left[-i2\pi\left(xf_x+yf_y\right)\right]dxdy \tag{2}$$

其中 f_x、f_y 分别为 x、y 方向的空间频率，量纲为 L^{-1}；$G(f_x,f_y)$ 为 $g(x,y)$ 的空间频谱，是同一光场在空间频率域的等效描述。对于周期性光栅结构，其空间频谱为分立的衍射级次，例如空间频率为 f_0 的一维光栅，振幅分布可展开为傅里叶级数：

$$g(x)=\sum_{n=-\infty}^{\infty} G_n\exp\left[i2\pi nxf_0\right] \tag{3}$$

对应空间频率为 $f=0\pm nf_0$。

4.1.2 阿贝成像原理

阿贝在研究显微镜相干成像时提出，相干光学系统的成像过程本质上是两次连续的傅里叶变换，分为两个核心步骤：

1. 分频过程：相干平面波入射到物平面后发生夫琅禾费衍射，在透镜的后焦面（频谱面）上形成物光场的空间频谱，完成第一次傅里叶变换，将物面的空间分布转换为频率域的频谱分布；
2. 合成过程：频谱面上不同空间频率的衍射光作为次波源，发出的次波在像平面发生干涉叠加，还原出物的像，完成第二次傅里叶逆变换，将频率域的频谱分布还原为空间域的像分布。

阿贝成像原理的核心意义在于首次引入频谱的概念，揭示了成像的物理本质，同时提出了空间滤波的核心思想：通过在频谱面放置滤波器，选择性地通过或阻挡特定空间频率成分，或改变其振幅/相位，即可改造物的频谱，从而实现对像的调控与处理。

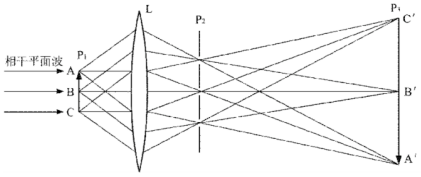


图 1: 阿贝成像原理

4.1.3 4f 系统与空间滤波

4f 系统是经典的光学信息处理系统，由两个焦距均为 F 的傅里叶变换透镜 L_1、L_2 共焦同轴组成，物平面 P_1 位于 L_1 前焦面，频谱面 P_2 位于 L_1 后焦面与 L_2 前焦面的重合处，像平面 P_3 位于 L_2 后焦面，物面到像面的总光程为 4 倍焦距，因此得名 4f 系统。

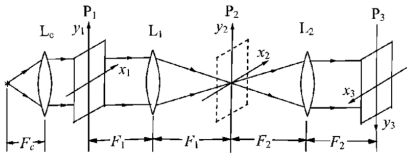


图 2: 三透镜光学信息处理系统光路图

在 4f 系统中，物平面光场 $g(x,y)$ 经 L_1 在频谱面 P_2 处完成第一次傅里叶变换，得到频谱分布 $G(f_x,f_y)$；若在频谱面放置透过率为 $H(f_x,f_y)$ 的空间滤波器，则出射光场变为 $G(f_x,f_y)\cdot H(f_x,f_y)$；该光场经 L_2 完成第二次傅里叶变换，在像平面得到输出光场：

$$r(u,v)=\iint_{-\infty}^{+\infty} G'(f_x,f_y)\exp\left[i2\pi(uf_x+vf_y)\right]df_xdf_y \tag{4}$$
$$G'(f_x,f_y)=G(f_x,f_y)H(f_x,f_y)$$

可见输出像由滤波器的透过率函数 $H(f_x,f_y)$ 决定，通过设计不同的滤波器，即可实现低通、高通、带通、方向滤波等图像处理操作：

- 低通滤波：仅允许零级附近的低频成分通过，滤除高频噪声，可实现图像平滑、去网纹、去斑点等效果；
- 高通滤波：阻挡低频成分，仅允许高频成分通过，可实现图像边缘增强、轮廓提取等效果；
- 方向滤波：仅允许特定方向的频谱成分通过，可提取图像中特定方向的线条特征。

4.2 全息术基本原理

4.2.1 全息术的波前记录与再现

全息术是一种两步成像技术，核心是通过干涉记录物光波的全部信息（振幅 + 相位），再通过衍射实现物光波前的再现，分为波前记录与波前再现两个过程。

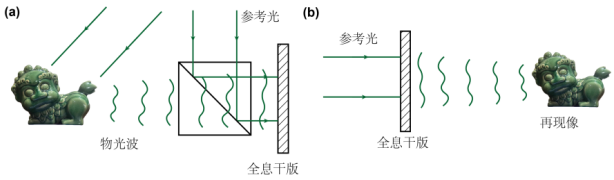


图 3: 全息术二步成像过程示意图 (a) 波前记录,(b) 波前再现

波前记录 引入与物光波相干的参考光，与物光波在记录平面发生干涉，记录干涉图样的强度分布。设物光波复振幅为 $O(x,y)=|O(x,y)|\exp[i\phi(x,y)]$，参考光复振幅为 $R(x,y)=|R(x,y)|\exp[i\psi(x,y)]$，则记录平面的干涉光强为：

$$I(x,y)=|O+R|^2=|O|^2+|R|^2+2|O|\cdot|R|\cos(\phi-\psi) \tag{5}$$

式中，$|O|^2+|R|^2$ 为直流项，$2|O|\cdot|R|\cos(\phi-\psi)$ 为干涉项，包含了物光波的振幅信息 $|O|$ 与相位信息 ϕ，实现了物光波全部信息的记录。

波前再现 用与原参考光相同（或共轭）的再现光照射记录的全息图，全息图的衍射光场将还原出原物光波。全息图的振幅透射率函数可表示为：

$$t_A(x,y)=t_b+\beta'\left(|O|^2+R^*O+RO^*\right) \tag{6}$$

其中 t_b 为偏置透射率，β' 为透射率-曝光量曲线的斜率。用原参考光 R 照射全息图时，透射光场为：

$$Rt_A(x,y)=t_bR+\beta'|O|^2R+\beta'|R|^2O+\beta'R^2O^* \tag{7}$$

式中，第一项为零级直射光；第二项为低频背景项；第三项正比于原物光波 O，为原始像项，可再现原物的三维波前；第四项为物光波的共轭像 O^*，为共轭像项。

4.2.2 全息术的分类

根据记录与再现的技术手段，全息术可分为以下三类：

1. 传统光学全息：通过光学方法完成波前记录与再现，以卤化银干版等为记录介质，需经过曝光、显影、定影等化学湿处理，流程复杂，对环境稳定性要求高；
2. 计算全息 (CGH)：通过数值计算的方法生成全息图，将全息图加载到 SLM 上，通过光学方法实现波前再现，可记录现实中不存在的虚拟物体，无需光学记录光路，广泛应用于三维显示、AR/VR 等领域；
3. 数字全息 (DH)：通过光学方法记录物光与参考光的干涉全息图，用 CCD/CMOS 相机替代传统干版，再通过数值计算在计算机中完成波前再现，无需化学处

理，可实时记录，且能定量获取物光场的复振幅信息，广泛应用于全息显微、精密测量等领域。

4.2.3 全息术的分类：菲涅尔全息与夫琅禾费全息

根据物体与记录介质之间的衍射或成像条件来划分，全息图可以分为菲涅尔全息图和夫琅禾费全息图。当记录介质位于物体的菲涅尔衍射区域时，所记录的全息图可以称为菲涅尔全息图；而当记录介质位于物体的夫琅禾费衍射区域时，所记录的全息图可以称为夫琅禾费全息图。

根据菲涅尔衍射公式，物体在全息图平面的衍射场分布可以描述为：

$$O_H(x,y)=\frac{\exp(ikz)}{i\lambda z}\iint_{-\infty}^{+\infty}O(\xi,\eta)\cdot \exp\left\{\frac{ik}{2z}\left[(x-\xi)^2+(y-\eta)^2\right]\right\}d\xi d\eta \tag{8}$$

其中，$O(\xi,\eta)$ 为物平面复振幅，$O_H(x,y)$ 为衍射光场在全息图平面的复振幅，$k=2\pi/\lambda$ 为波矢，(x,y) 为全息图平面的坐标，(ξ,η) 为物平面的坐标，z 为物平面与全息图平面之间的距离，并且满足菲涅尔近似条件：

$$z^3\gg\frac{\pi}{4\lambda}\left[(x-\xi)^2+(y-\eta)^2\right]_{max}^2$$

另一方面，对于满足夫琅禾费近似条件的情况，即：

$$z\gg\frac{k(\xi^2+\eta^2)_{max}}{2}$$

物光波及其衍射场分布可以由夫琅禾费衍射公式给出：

$$O_H(x,y)=\frac{\exp(ikz)}{i\lambda z}\exp\left(\frac{ik}{2z}(x^2+y^2)\right)\cdot \iint_{-\infty}^{+\infty}O(\xi,\eta)\exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda z}(x\xi+y\eta)\right)d\xi d\eta \tag{9}$$

从上式可以看出，对于夫琅禾费全息，物光波的复振幅与衍射场的复振幅满足傅里叶变换关系，因此，夫琅禾费全息图也常称为傅里叶全息图。考虑到薄透镜在光路中起到傅里叶变换的作用，夫琅禾费全息的记录和再现光路中常常使用薄透镜来实现傅里叶变换，从而大大缩短整个光路的尺寸。

4.2.4 全息术的分类：振幅型全息与相位型全息

按照记录或编码方式来划分，全息图可以分为振幅型全息图以及相位型全息图。

振幅型全息图 对于传统光学全息，通常采用卤化银感光材料或重铬酸盐明胶等作为记录介质，经过显影定影后，得到的全息片为振幅型全息图，其通过调制入射光的振幅分布来记录信息。对于计算全息，可以采用不同的编码方式来实现振幅型全息图。若物体为简单的二维平面图片，首先可以通过菲涅尔或夫琅禾费衍射公式根据给定的二维图片直接计算得到全息图平面衍射场的复振幅分布 O_H，再添加参考光 R（常为平面波），然后按照需要将干涉场复振幅 $H(x,y)=O_H(x,y)R^*(x,y)=|H(x,y)|e^{i\varphi(x,y)}$ 编码为振幅型全息图：

$$h(x,y)=0.5|H(x,y)|[1+\cos(\varphi(x,y))] \tag{10}$$

相位型全息图（相息图） 相位型全息图，也称为相息图 (kinoform)，只调制入射照明光的相位分布，而不影响其振幅，因此具有更高的衍射效率。对于传统光学全息，对振幅型全息图进一步作漂白工艺处理，即可获得相位型全息图；对于计算全息，只需取全息图平面干涉场的相位即可得到相息图，即：

$$h(x,y)=\pi+\varphi(x,y) \tag{11}$$

除了直接用公式计算外，对于相位型全息图还可以通过迂回相位编码、GS(Gerchberg-Saxton) 算法等相位恢复算法来实现。相比于振幅型全息图，相息图具有更高的衍射效率，因此，相息图广泛应用于三维显示等领域。

5 实验内容

本实验分为空间频谱和滤波实验（GX1）与数字全息实验（GX2）两部分，具体实验内容如下：

5.1 GX1 空间频谱与空间滤波实验

1. 学习 SLM 的使用方法，搭建光路测量 SLM 的振幅调制曲线，绘制灰度值-透射光功率关系曲线；
2. 搭建 4f 光学系统，采用实物一维光栅作为物，验证阿贝成像原理，观察频谱分布，分析不同衍射级次通过时的成像规律；
3. 用 SLM 替代实物光栅，加载一维光栅、棋盘格等图像，验证阿贝成像原理，对比虚拟光栅与实物光栅的频谱与成像差异；
4. 完成低通滤波与高通滤波实验，加载网格字图像，对比未滤波、低通、高通滤波的成像结果，分析滤波原理；
5. 完成方向滤波实验，加载二维正交光栅，通过不同方向的狭缝滤波器，观察成像变化，测量条纹间距并解释现象。

5.2 GX2 数字全息实验

1. 通过数值计算得到全息图，并搭建光路再现物体，了解计算全息的基本原理；

2. 通过搭建全息记录光路，并数值再现物体，了解数字全息的基本原理。

6 实验步骤

6.1 光路基础调整：等高同轴校准

本实验所有光路均需满足等高同轴要求,即所有光学元件的光学面中心处于同一高度,光轴重合且平行于光学平台工作面，校准步骤如下：

1. 激光水平调整：固定白屏高度，沿光路前后移动白屏，调节激光器的俯仰与偏转，使出射光斑在近场与远场的高度保持一致，确保激光束平行于光学平台台面；

2. 元件中心校准：将实验所需的透镜、偏振片、SLM、分光棱镜等光学元件依次靠近激光器出光口，调节各元件的高度与俯仰,使光斑始终从元件的中心位置通过，确保所有元件光轴与激光束重合；

3. 后续所有实验内容的光路搭建，均需在完成等高同轴校准的基础上进行。

6.2 GX1 空间频谱与滤波实验操作流程

6.2.1 SLM 振幅调制曲线测量

1. 按下图测量光路依次搭建光学元件：激光器 → 起偏器 P1→ 检偏器 P2→ 光功率计，旋转 P1 使透射光功率最大，再旋转 P2 使透射光功率最小，实现正交消光；

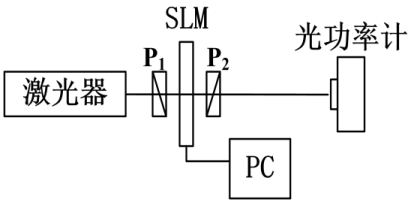


图 4: 空间光调制器振幅调制曲线测量光路

2. 在 P1 与 P2 之间放入 SLM，确保激光从 SLM 有效区域中心通过，连接 SLM 与计算机；

3. 打开计算机中“256 幅灰度图”文件夹，将灰度值从 0（全黑）到 255（全白）的图片依次设置为桌面居中背景，每隔 10 个灰度值记录一次光功率计的透射光功率数值；

4. 以灰度值为横坐标，透射光功率为纵坐标，绘制 SLM 的振幅调制曲线。

6.2.2 实物光栅验证阿贝成像原理

1. 搭建下图 4f 系统光路：激光器 → 扩束镜 → 准直透镜 → 物面 P1（一维实物光栅）→ 傅里叶透镜 L3（f=150mm）→ 频谱面 P2→ 白屏 P3；

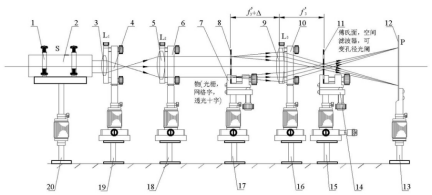


图 5: 以光栅为物的光信息处理光路

2. 确定傅氏面位置：将白卡纸安装在干版架上，在 L3 的后焦面附近沿光轴缓慢移动，直至卡纸上出现清晰的分立衍射光点，该位置即为傅氏面 P2，手描记录衍射光点的频谱分布图；

3. 零级光滤波：将可调狭缝安装在傅氏面处，调小狭缝宽度仅让 0 级光点通过，挡去其余级次，观察像平面的成像情况，记录是否存在干涉条纹；

4. 多级次滤波：逐步增大狭缝宽度，依次让 0 级 ±1 级、0 级 ±1 级 ±2 级…衍射光通过，直至完全移除狭缝，逐次观察并记录成像的清晰度、条纹间距、对比度等特征，用阿贝成像原理解释现象。

6.2.3 SLM 验证阿贝成像原理

1. 用 SLM 替代实物光栅，在 SLM 前放置起偏器，后放置检偏器，搭建下图光路：激光器 →起偏器 →SLM→ 傅里叶透镜（f=150mm）→ 频谱面 P2→CCD 相机，连接 CCD 与计算机；

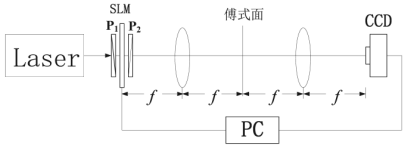


图 6: 光学信息处理系统

2. 在 SLM 中加载“16×12 棋盘格”图片，通过 CCD 画面校验光路准直性，调整 CCD 位置至像面，获得清晰的棋盘格像；

3. 更换 SLM 加载的图片为“128T 一维光栅”，观察傅氏面的频谱样式，记录与实物光栅频谱的异同点；

4. 在傅氏面放置可调狭缝，使狭缝刀口与竖直方向频谱平行，调节狭缝宽度，观察像的变化；当狭缝仅允许

0 级光通过时，分析竖直光栅变为水平光栅的物理原因；

5. 更换可变圆孔光阑作为低通滤波器，滤除 x、y 方向的高频成分，观察并记录成像变化。

6.2.4 低通与高通滤波实验

1. 在 SLM 中加载下图网格字图像，调整光路使 CCD 获得清晰的网格字像，观察图像的构成特征；

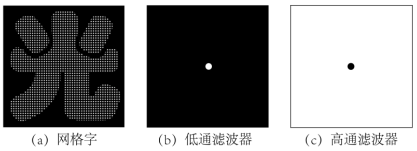


图 7: 网格图案及低/高通滤波器

2. 在傅氏面放置低通滤波器，仅让零级附近的低频光点通过，观察并记录像的变化，分析网格与文字的成像差异；

3. 更换高通滤波器，阻挡零级低频成分，仅让高频信号通过，观察并记录像的变化，分析边缘增强的原理；

4. 对比未滤波、低通滤波、高通滤波三种情况下的成像结果，结合傅里叶光学原理解释现象。

6.2.5 方向滤波实验

1. 在 SLM 中加载下图二维正交光栅图像，在傅氏面观察到二维点阵形式的空间频谱，像平面观察到正交光栅的清晰像；

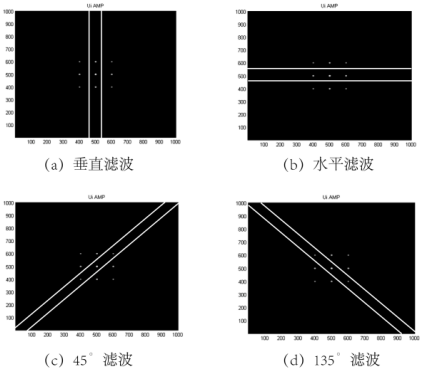


图 8: 狭缝滤波器及其放置方法

2. 将可调狭缝竖直放置在傅氏面，调节狭缝宽度仅让中间一列衍射光斑通过，观察像平面的成像效果并解释现象；

3. 将狭缝分别旋转至水平、45°、135° 方向，依次观察成像变化，用 CCD 拍摄图像，测量不同方向条纹的间距，计算横条纹与斜条纹的间距比值，结合傅里叶变换的性质解释现象。

6.3 GX2 数字全息实验操作流程

6.3.1 计算全息成像实验

1. 搭建下图计算全息再现光路：激光器 → 扩束镜 → 准直透镜 →SLM→ 傅里叶透镜 →CCD 相机，确保光路等高同轴；

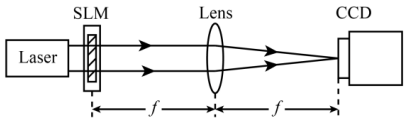


图 9: 计算全息再现光路

2. 将给定的全息图文件（HoloAlphabeta.bmp）加载到空间光调制器中，并用 CCD 拍摄对应的成像效果；

3. 在 HOT 软件中导入指定图片 SYSUlogo.jpg，生成振幅型傅里叶全息图，将全息图加载到 SLM，调整光路获得清晰的再现像，用 CCD 拍摄记录成像结果。

6.3.2 数字全息成像实验

1. 搭建下图马赫曾德干涉记录光路：激光器 → 扩束镜 → 准直透镜 → 分光棱镜 1，分为两束光：

   - 物光臂：分光棱镜 1→ 反射镜 3→ 物体 → 分光棱镜 2→CCD 相机；
   - 参考光臂：分光棱镜 1→ 反射镜 2→ 分光棱镜 2→CCD 相机；

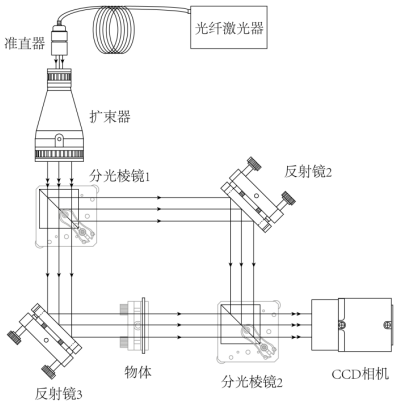


图 10: 数字全息图波前记录光路

2. 调整两臂光程近似相等，调节反射镜的角度，使物光与参考光在 CCD 靶面重合，获得清晰稳定的干涉条纹；
3. 记录物体到 CCD 成像面的距离，用 CCD 拍摄物光与参考光的干涉全息图，保存图像文件；
4. 打开 HOT 软件的数字全息界面，导入拍摄的全息图，设置参数，计算再现像，记录再现结果；
5. （选做）搭建再现光路，将上一步记录的全息图加载到空间光调制器中，拍摄全息成像效果。

7 实验结果与分析

7.1 SLM 的调制曲线

7.1.1 调节偏振片

首先调节 P_1 起偏器 (竖直：131°)，发现

$$when\ \theta = 208°/28°, \quad I = 3.17\mu W \quad MAX$$

之后调节 P_2 检偏器 (竖直：240°), 发现

$$when\ \theta = 196°/16°, \quad I = 0.001\mu W \quad MIN$$

7.1.2 灰度-光功率

取灰度从 4-254(每隔 10 灰度值记录一次), 最终得到数据如下表：

表 1: SLM 灰度值-透射光功率测量数据

灰度值	4	14	24	34	44	54	64	74
光功率/μW	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
灰度值	84	94	104	114	124	134	144	154
光功率/μW	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006
灰度值	164	174	184	194	204	214	224	234
光功率/μW	0.009	0.012	0.016	0.021	0.027	0.035	0.043	0.054
灰度值	244	254	-	-	-	-	-	-
光功率/μW	0.071	0.089	-	-	-	-	-	-

根据表1中数据画图得如下曲线图：

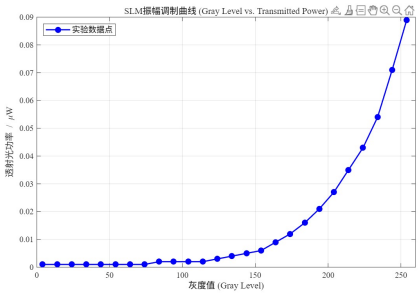


图 11: 灰度-光功率曲线

7.2 实物光栅验证阿贝成像

我们设置物距为 $u = 30cm$，根据凸透镜焦距 $f = 15cm$，得到像距为 $v = 30cm$，我们发现傅氏面距离透镜为 $16.2cm$

观察到傅氏面上频谱样式如下图，并手描记录

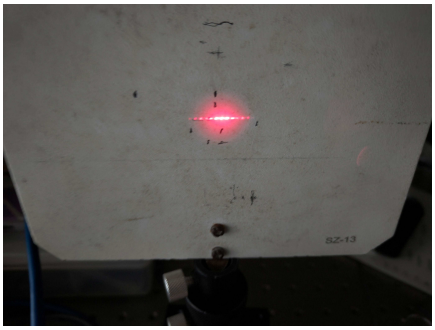


图 12: 实物光栅下观察到傅氏面频谱样式

根据阿贝成像原理，透镜的后焦面为物光场的傅里叶频谱面，理论上频谱面应位于透镜后 15 cm（透镜焦距）处，本次实验实测频谱面位于透镜后 16.2 cm，偏差源于本次实验物光栅放置于透镜前 $2f$（30 cm）处，而非严格的透镜前焦面，夫琅禾费衍射面会略微偏离后焦面，同时叠加光路准直误差、透镜球差的微小影响。本次观测到的频谱为沿水平方向分立的衍射光点，符合一维矩形光栅的傅里叶变换特性。

将可调狭缝调至很小后安装在傅氏面 P2 处二维底座上。调节底座位置和狭缝宽度的大小使 0 级光点刚好通过狭缝，挡去 0 级以外的各光点，观察 P 平面上的图形如下图

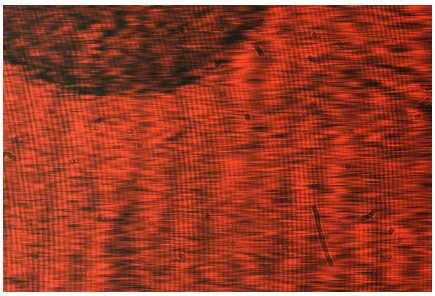


图 13: 0 级 P 平面上图形

此时理论上应不存在干涉条纹，应是点光源所形成的亮斑，但由于狭缝较小，并且傅氏面的光点并非理想点，而有一定的半径，则虽然此时狭缝令 0 级亮斑完全透过，但实际上遮挡了部分光，发生了一定的菲涅尔衍射，从而在 CCD 面上形成了类似圆环的衍射条纹。

之后增大狭缝宽度，使 0 级和 ±1 级光点通过，观察到 P 平面上所成像为下图

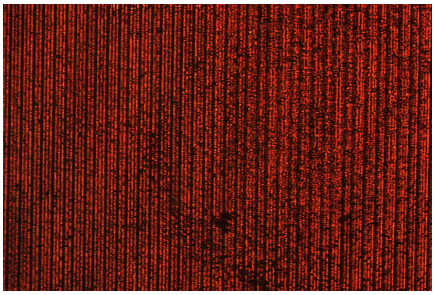


图 14: 0 级和 ±1 级 P 平面上图形

实验现象为像面出现了清晰、等间距的竖直周期性光栅条纹，对比度良好。±1 级衍射光决定光栅周期性结构的核心频率分量。0 级直流分量与基频分量共同参与第二步的干涉合成，经傅里叶逆变换后在像面叠加形成与原物光栅周期一致的正弦型条纹。同时可观察到，本次成像的条纹边缘平滑，无原光栅的锐利矩形边缘，这是因为矩形光栅的傅里叶级数由基频 + 奇次高频谐波组成，本次实验阻挡了 ±3 级及以上的高频分量，无法还原光栅边缘的突变信息，进一步验证了高频分量对应物的精细边缘结构的规律。

在逐渐增大狭缝宽度至完全拿开，观察到成像为：

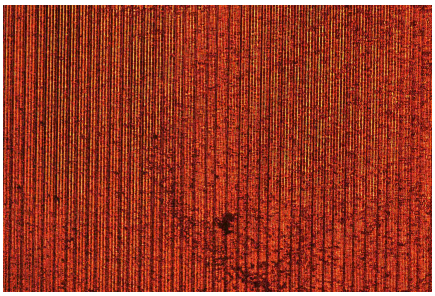


图 15: 狭缝完全拿开 P 平面上图形

实验现象为像面的光栅条纹边缘更锐利、对比度更高，条纹的精细结构与原物光栅完全一致。当狭缝完全移除后，物光场的全部空间频率分量（直流分量 + 基频 + 各次高频谐波）均参与成像，第二步傅里叶逆变换过程中，所有频率分量完整叠加，完美还原了原物光栅的矩形周期结构。对比仅 0+±1 级的成像结果，本次成像的条纹锐度显著提升，直接证明了高级次高频分量决定了物的边缘细节与精细结构。该组实验完整验证了阿贝成像原理的两步成像理论：相干光学成像的本质是“衍射分频-干涉合成”的两次傅里叶变换，像的质量完全取决于参与成像的频谱分量的完整度。

7.3 SLM 验证阿贝成像

首先将一维实物光栅换为空间光调制器，并在空间光调制器中加载“16×12 棋盘格”图片，由 CCD 画面成像为

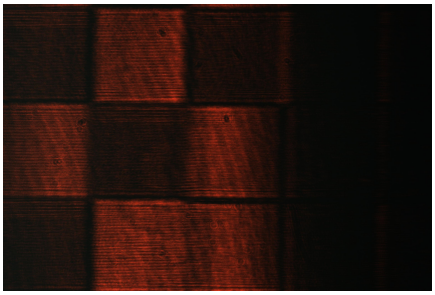


图 16: 棋盘格成像

棋盘格为标准二维周期性结构，只有当光路光轴完全重合、激光准直良好、各元件位置处于理想共轭面时，才能得到无畸变、格子方正、边缘清晰的棋盘格像。本次实验观测到的棋盘格像无梯形、枕形畸变，格子边缘锐利、行列均匀，说明光路的等高同轴校准合格，而右侧部分变暗，应为有意外情况导致部分遮光所致

7.3.1 加载 SLM 光栅并调节

然后我们加载了一维光栅至空间光调制器，观察其傅氏面，结果如下图

观测发现，该频谱除了 x 方向的主空间频谱外，还存在 y 方向的空间频谱分量，整体呈现二维点阵式分布。

结果分析 本次 SLM 加载的是竖直条纹的一维光栅，理论上其频谱应为沿 x 方向（水平方向）对称分布的分立衍射斑，y 方向无额外频谱分量。实验观测到的二维频谱分布，由 SLM 的固有结构特性决定：SLM 的显示区域由二维离散的矩形像素阵列构成，每个像素具有固定的尺寸与行/列间距，相当于在 x、y 方向均存在一个由像素结构引入的周期光栅。根据傅里叶变换的卷积定理，加载的一维光栅与 SLM 二维像素结构相乘，其频谱为两者频谱的卷积，因此除了一维光栅的 x 方向主频谱外，还会出现像素结构带来的 y 方向频谱分量。

之后在傅氏面上放置可调狭缝，观察如下图

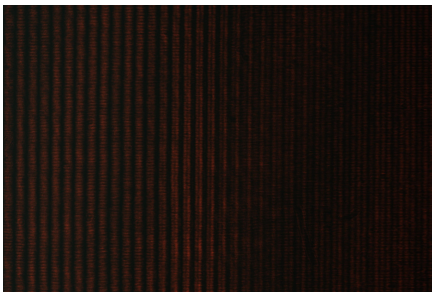


图 17: SLM 在傅氏面上放置狭缝后的图像

调节狭缝宽度的过程中，我们发现：随着狭缝逐渐变窄，成像的光栅条纹逐渐变宽变虚、对比度下降。

结果分析 根据阿贝成像原理，频谱面的可调狭缝为一维空间滤波器，狭缝宽度直接决定了参与成像的空间频率分量的多少：当狭缝宽度较大时，0 级、±1 级、±2 级等多个衍射级次均可通过，包含了光栅的基频与高频分量，成像条纹清晰锐利；随着狭缝宽度逐渐减小，高级次的高频衍射分量被逐步阻挡，仅低阶次的频率分量参与成像。由于高频分量决定了光栅条纹的边缘锐度与精细结构，缺少高频分量后，条纹的边缘逐渐模糊、对比度下降，呈现“变虚”的现象。

最后当缝调至很小但不为 0 时，竖直方向的条纹几乎消失 (如图18)，放大可发现变成了水平方向的条纹 (如图19)

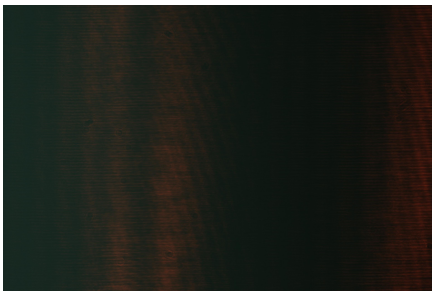


图 18: 狭缝很小时竖直条纹

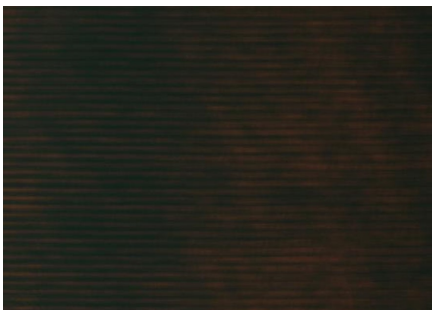


图 19: 狭缝很小时水平条纹

结果分析 本次实验观测到的“竖直光栅变为水平条纹”的现象，可通过阿贝成像原理与傅里叶变换的卷积定理得到完整解释：

1. 竖直条纹消失的原因：当狭缝调至极小宽度时，仅允许频谱面中心竖直方向的一列频谱分量（$f_x = 0$，仅 y 方向的频率分量）通过，完全阻挡了原一维光栅在 x 方向的基频与所有高频衍射分量。原光栅的竖直周期性结构对应的频率信息完全丢失，因此像面的竖直光栅条纹完全消失。

2. 水平条纹的来源：通过狭缝的 y 方向频率分量，来源于 SLM 二维像素阵列的行周期结构。SLM 的像素在 y 方向存在固定的行间距，形成了 y 方向的周期性载波结构，其对应的频谱为沿 y 方向的分立分量。当狭缝仅允许这部分频率分量通过时，经第二次傅里叶逆变换后，在像面形成了 y 方向的周期性结构，即水平方向的条纹。

该现象进一步验证了阿贝成像的核心结论：像的结构完全由频谱面通过的频率分量决定，改变频谱的滤波方式，即可完全改变最终的成像结果。

7.3.2 圆孔光阑情况

换成可变圆孔光阑，作为低通滤波器将 x 方向和 y 方向的高频成分滤掉，观察到如下图情况

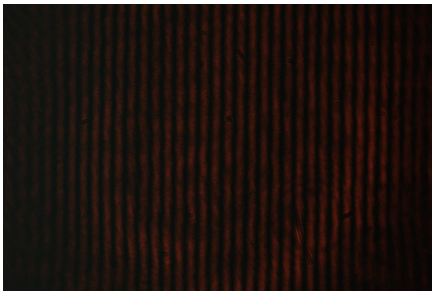


图 20: 圆孔光阑情况下图形变化

结果分析 可变圆孔光阑为典型的圆对称低通空间滤波器，仅允许频谱面中心零级附近的低频分量通过，阻挡 x、y 方向的高频分量，实验结果符合低通滤波的理论预期：

1. 原光栅的周期性条纹结构变弱。这是因为光栅的周期性结构对应的基频与高频分量均被圆孔光阑阻挡，仅零级直流分量与极低频分量参与成像；

2. 成像整体变得平滑均匀，SLM 像素结构带来的网格噪声变弱。这是因为像素网格对应的高频分量被低通滤波器被滤除，实现了图像的平滑去噪效果。

3. 同心环形条纹为菲涅尔衍射效应产生。波经过圆孔光阑时会发生菲涅尔衍射，形成同心环形的菲涅尔衍射波带，该衍射场经后续透镜傅里叶变换后，在像面呈现出同心环形干涉条纹。

4. 当圆孔直径极小时，仅零级附近的极低频分量可通过，菲涅尔衍射高级次环对应的高频分量被完全阻挡，因此环形条纹非常微弱、几乎不可见；随着圆孔直径逐渐增大，越来越多的高频衍射分量可通过光阑，菲涅尔衍射环形条纹的高频细节被完整保留，同时光栅的基频分量逐渐恢复，周期性条纹与环形衍射条纹叠加后对比度进一步提升，因此环形条纹会随圆孔增大变得越来越清晰。

7.4 低通/高通滤波实验

将空间光调制器的图案换成图7(a) 所示的网格光图案。在像平面 P 上观察像如下图

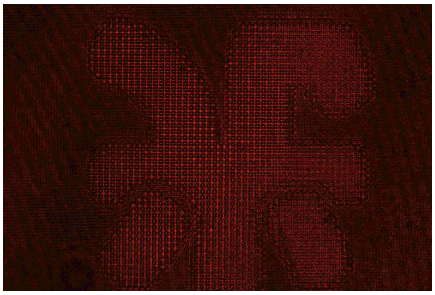


图 21: 光字在 P 平面所成像

本次观测到的未滤波原图像包含两类核心信息：一是清晰完整的“光”字笔画轮廓，二是均匀叠加在文字上的周期性网格纹理，整体成像对比度良好、细节清晰。

根据傅里叶光学原理，图像的不同结构对应傅氏面上不同的空间频率分量：叠加的网格为周期性空间结构，其频谱为傅氏面上有规律排列的分立点阵，属于高频空间信号；而“光”字的整体轮廓、笔画主体为非周期性的连续图案，其频谱集中在傅氏面中心零级附近，属于低频空间信号。

7.4.1 低通滤波实验

用干版架夹紧如图7(b) 所示的低通滤波器，放在傅氏面上，让低级光点通过，观察像的构成如下图：



图 22: 低通滤波后的光字图

实验现象：低通滤波后，原图像的网格纹理完全消失，仅保留光字轮廓，文字边缘平滑、锐度下降，且原高亮的光字变为暗调，出现对比度反转。

原理分析：圆孔低通滤波器仅允许傅氏面中心低频分量通过，阻挡外围高频分量。网格作为高频周期信号被完全滤除，实现讲义所述的去网纹效果；文字边缘的高频细节被同步滤除，因此笔画平滑。原图像的零级直流分量对应背景平均亮度，光字与背景的光强差由低频正负级次分量承载；当滤波器孔径较小时，仅保留零级与极弱的低频分量，零级直流分量主导像面均匀亮度，光字的对比度信息被大幅衰减，最终呈现光字变暗、背景变亮的反转效果。

7.4.2 高通滤波实验

用干版架夹紧如图7(c) 所示的高通滤波器，放在傅氏面上，挡住低级光点，让高频信号通过，观察像的构成如下图:

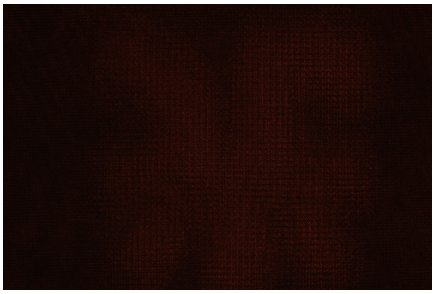


图 23: 高通滤波后的光字图

实验现象：高通滤波后，原图像中光字的主体笔画极不清晰，仅保留了文字的边缘轮廓与笔画的锐边细节；同时原图像中的周期性网格纹理被完整保留，整体成像呈现出明显的边缘增强效果。

原理分析：高通滤波器的核心作用是阻挡傅氏面中心的低频直流分量与低频信号，仅允许外围的高频分量通过。原图像中“光”字的主体亮度、连续色调由低频分量承载，被高通滤波器完全阻挡，因此文字主体几乎消失；而文字笔画的边缘、尖角处存在光强的剧烈突变，对应高频空间分量，可顺利通过滤波器，因此文字的轮廓边缘被完整提取并强化。同时，周期性网格纹理属于高频空间信号，其频谱可全部通过高通滤波器，因此网格纹理被完整保留。

7.5 方向滤波实验

在空间光调制器上加载二维正交光栅，在傅氏面上观察到衍射光的二维点阵，如下图

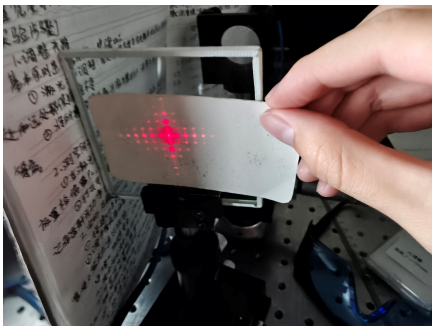


图 24: 二维正交光栅傅氏面空间频谱

同时在像平面 P 上可看到正交光栅的像，如下图：

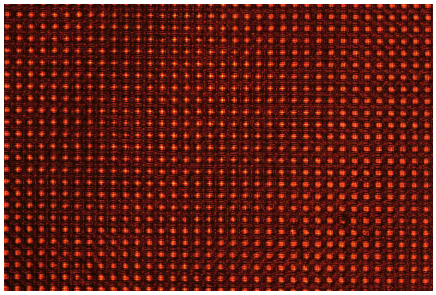


图 25: P 平面所成像

7.6 方向滤波对比

将可调狭缝放在傅氏面上，狭缝处于竖直方向，如图8(a)所示。调节狭缝的大小，使只有中间一列衍射光斑通过狭缝，观察到像平面的成像为：

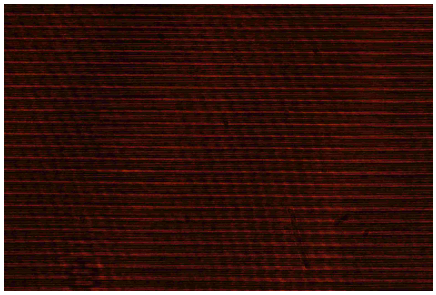


图 26: 狭缝竖直像平面成像

将狭缝调至水平方向，如图8(b) 所示。调节狭缝的大小，使只有中间一列衍射光斑通过狭缝，观察成像为：

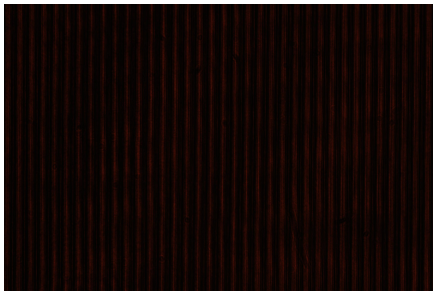


图 27: 狭缝水平像平面成像

再将狭缝调至 45° 方向，如图8(c) 所示。再次调节狭缝的大小，观察成像为：

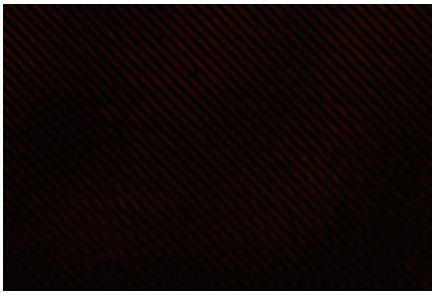


图 28: 狭缝 45° 像平面成像

再将狭缝调至 135° 方向，如图8(d) 所示。再次调节狭缝的大小，观察成像为：

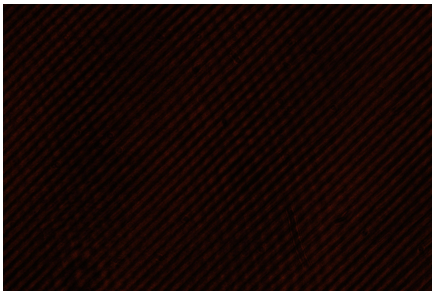


图 29: 狭缝 135° 像平面成像

结果分析

1. 二维正交光栅的频谱特性：未加滤波时，傅氏面观测到的是规则排列的二维点阵频谱，因为二维正交光栅可等效为 x 方向与 y 方向两个一维光栅的叠加，其频谱为两个一维光栅频谱的卷积，因此形成沿 x、y 方向对称分布的二维分立衍射点阵；像平面则呈现清晰的正交网格条纹，完整还原了原物的二维周期性结构。

2. 方向滤波的核心规律：实验观测到，无论狭缝处于竖直、水平、45° 或 135° 方向，最终像平面的光栅条纹方向均与狭缝方向严格正交：

   - 空间频率的方向定义：光栅条纹的空间频率方向为条纹光强变化的方向，与条纹本身的走向垂直。例如，水平条纹的光强沿竖直方向变化，对应空间频率方向为竖直方向。
   - 方向狭缝的滤波作用：傅氏面上的可调狭缝为一维方向滤波器，仅允许沿狭缝方向的空间频率分量通过，完全阻挡垂直于狭缝方向的频率分量。当狭缝竖直时，仅允许竖直方向的空间频率通过，对应水平方向的光栅条纹；当狭缝水平时，仅允许水平方向的空间频率通过，对应竖直方向的光栅条纹；同理，45° 与 135° 狭缝仅允许对应方向的空间频率通过，最终成像条纹方向与狭缝方向严格正交。

7.7 计算全息成像

首先严格准直光路，然后将给定的全息图文件（HoloAlphabeta.bmp）加载到空间光调制器中，并用 CCD 拍摄对应的成像效果，得到结果如下图

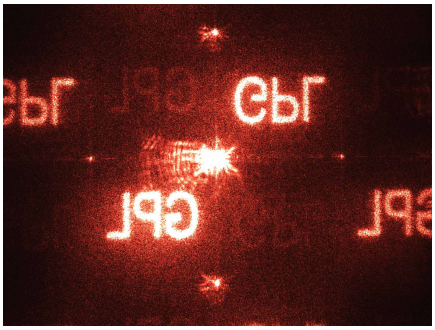


图 30: HoloAlphabeta.bmp 成像效果

接着打开实验软件（HolographicOpticsToolbox, HOT），然后将将指定图片（SYSUlogo.jpg）计算为振幅型傅里叶全息图

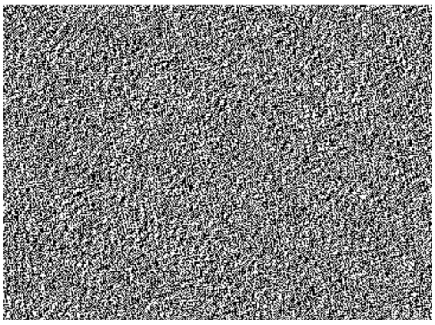


图 31: SYSUlogo.jpg 振幅型傅里叶全息图

加载到空间光调制器中，并用 CCD 拍摄成像效果，如下图

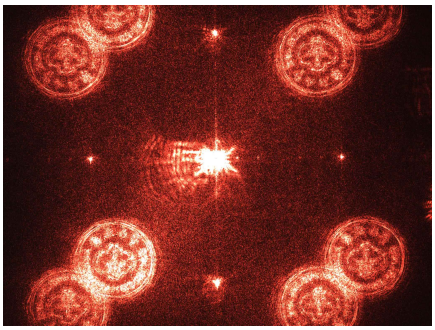


图 32: SYSUlogo 全息图 CCD 拍摄成像效果

实验观测效果良好，说明搭建的全息成像光路良好，验证了理论的合理性。

7.8 数字全息成像

7.8.1 全息图记录光路搭建

搭建全息图记录光路，记录光路，观察到如下图干涉条纹

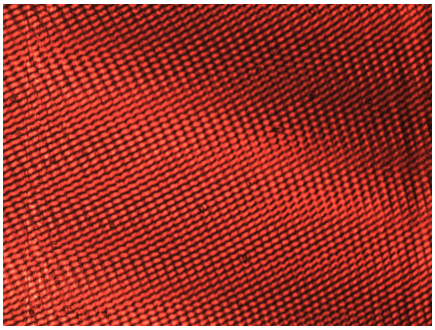


图 33: 全息图记录光路干涉条纹

干涉条纹质量分析 首先观察到了清晰、稳定的等间距平行干涉条纹，这是全息图成功记录的前提条件，表明：

1. 光路相干性良好：实验所用激光器的相干长度大于两臂光程差，物光与参考光能够发生稳定的干涉

2. 光路调整精度达标：两束光的光轴重合度高，波前匹配良好，未出现明显的条纹弯曲或畸变

3. 环境振动控制有效：实验过程中光学平台的隔振效果良好，干涉条纹未出现明显的漂移或抖动，保证了后续全息图记录的稳定性

光与参考光的夹角决定，本次实验中条纹间距适中，既保证了 CCD 能够有效采样，又避免了条纹过密导致的混叠现象，为高质量全息图的记录奠定了基础。

7.8.2 拍摄物体全息图

将印有字母的透明胶片作为物体放置到干涉仪的其中一臂，记录物体到 CCD 成像面的距离为

$$278mm$$

，拍摄记录此时的干涉条纹，即全息图，得到下图

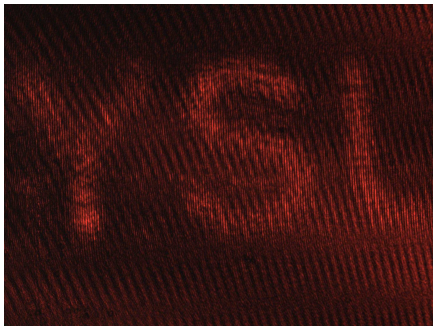


图 34: 透明胶片全息图

7.8.3 计算再现像

将 HolographicOpticsToolbox 软件切换至“数字全息”界面，将上一步获取的全息图导入 (成像距离:278mm)，设置相应参数，计算再现像得到如下图片



图 35: 全息图再现像

再现像质量评价 我们实验发现，我们的全息图实现了较好的全息结果图实现，其成像结果较为清晰，再现像的质量优点表现为：1. 成像清晰度高：字母的轮廓清晰，笔画分明，对比度良好，能够准确识别出字母的形状和细节，表明数值再现过程中波前重建准确；2. 无明显畸变：再现像的几何形状与原始物体一致，未出现明显的拉伸、扭曲或色差，说明光路的共轴性良好，且再现参数（尤其是成像距离）设置准确；3. 零级像与共轭像干扰小：离轴全息的光路设计使得零级像、原始像和共轭像在空间上分离，再现像区域未受到明显的干扰，进一步提高了成像质量。

8 结论

本实验系统完成了基于空间光调制器的空间频谱、滤波与数字全息实验的全部内容，通过理论分析与实验验证相结合的方式，深入探究了傅里叶光学与全息术的核心原理，掌握了空间光调制器的使用方法与光学信息处理系统的搭建调试技能。实验取得的主要结论如下：

一、空间频谱与滤波实验（GX1）结论

1. SLM 光场调控特性：成功测量了透射式液晶空间光调制器的振幅调制曲线，得到了灰度值与透射光功率的非线性关系。实验结果表明，在灰度值 0-74 范围内，透射光功率基本保持不变；在灰度值 74-254 范围内，透射光功率随灰度值近似线性增长，该特性为后续 SLM 的精确光场调控提供了实验依据。

2. 阿贝成像原理验证：分别采用实物一维光栅与 SLM 虚拟光栅完成了阿贝成像原理的验证实验。实验观测到，相干光学成像的本质是” 衍射分频-干涉合成” 的两次傅里叶变换过程，像的质量完全取决于参与成像的频谱分量的完整度：仅 0 级光通过时无法形成光栅像；0 级与 ±1 级光通过时形成正弦型光栅条纹；全部频率分量通过时才能还原出原光栅的矩形周期结构。同时发现，SLM 虚拟光栅的频谱除了 x 方向的主频谱外，还存在 y 方向的杂散频谱，这是由 SLM 二维像素阵列的固有结构特性决定的。

3. 空间滤波规律验证：完成了低通、高通与方向滤波实验，验证了频谱改造对成像结果的调控规律：

- 低通滤波可滤除高频噪声，实现图像平滑与去网纹效果，但会导致图像边缘模糊
- 高通滤波可阻挡低频直流分量，实现图像边缘增强与轮廓提取
- 方向滤波可选择性地通过特定方向的频谱分量，提取图像中特定方向的线条特征，且成像条纹方向与狭缝方向严格正交

二、数字全息实验（GX2）结论

1. 计算全息成像：利用 HolographicOpticsToolbox 软件成功生成了振幅型傅里叶全息图，并通过 SLM 加载实现了光学再现，获得了清晰的字母与校徽图像。实验结果表明，计算全息技术可实现虚拟物体的波前再现，无需复杂的光学记录光路，具有灵活性高、可实时调控的优势。

2. 数字全息成像：搭建了马赫曾德干涉光路，完成了透明字母胶片的全息图记录，并通过数值计算实现了物光波前的再现。实验获得了清晰的字母再现像，验证了全息术” 干涉记录振幅与相位信息、衍射再现物光波前” 的核心原理。离轴全息的光路设计使得零级像、原始像与共轭像在空间上有效分离，显著提高了再现像的质量。

三、实验误差分析与改进方向

本次实验的主要误差来源包括：1. 光路准直误差：光学元件的等高同轴校准存在微小偏差，导致波前匹配不佳，影响成像质量；2. SLM 调制非线性：SLM 的灰度-透射光功率关系存在非线性，导致全息图的衍射效率降低；3. 环境干扰：光学平台的微小振动与空气流动会导致干涉条纹漂移，影响全息图记录的稳定性；4. 主观判断误差：消光位置与干涉色的判断依赖人眼主观感受，引入了一定的随机误差。

为进一步提高实验精度，后续可从以下方面进行改进：1. 采用自动准直系统提高光路校准精度；2. 对 SLM 的调制曲线进行预校正，补偿非线性误差；3. 增加光学平台的隔

振措施，缩短曝光时间，减小环境干扰；4. 采用图像识别算法自动判断消光位置与干涉色，提高测量的客观性。

四、实验意义

本实验将傅里叶光学的抽象理论与具体的光学信息处理技术相结合，通过亲手搭建光路、调试仪器与分析实验现象，不仅加深了对阿贝成像原理、空间滤波与全息术等核心概念的理解，还掌握了空间光调制器、CCD 相机等现代光学器件的使用方法。实验中观测到的 SLM 像素杂散频谱、方向滤波正交条纹等独特现象，进一步丰富了对光学信息处理过程的认识，为后续在光计算、三维显示、全息显微等领域的深入研究奠定了坚实的实验基础。

9 思考题

9.1 GX1 思考题

问题 1：运用阿贝成像原理，说明实物一维光栅与空间光调制器输入的一维光栅的频谱差异原因，综合解释两个实验所看到的现象。

答：根据阿贝成像原理，相干成像本质是“衍射分频-干涉合成”的两次傅里叶变换，物的频谱特性直接决定成像结果。二者频谱差异核心原因：1. 实物光栅为连续均匀的周期性结构，频谱是纯净的分立衍射级次；SLM 虚拟光栅为离散像素拼接，存在像素结构引入的高频杂散频谱与衍射旁瓣。2. 实物光栅为理想二元振幅透过率，衍射级次符合 sinc 函数包络；SLM 受液晶调制非线性、偏振系统影响，透过率非理想分布，衍射级次光强偏离理论值。3. SLM 有限矩形孔径使频谱展宽，零级直流背景更显著。实验现象对应：频谱面实物光栅衍射光点锐利纯净，SLM 光栅存在杂散频谱；成像面仅 0 级光通过时二者均无光栅条纹，符合阿贝成像原理；多级次光通过时，实物光栅像更均匀锐利，SLM 光栅存在像素化噪声，滤波效果更差，均与频谱特性一一对应。

问题 2：如何从阿贝成像原理来理解显微镜 (或望远镜) 的分辨本领? 为什么说一定孔径的显微镜只能具有有限的分辨本领，不能用增大放大倍数的办法来无限制提高其分辨样品细节的能力?

答：根据阿贝成像原理，显微镜相干成像的核心是物光场的傅里叶分频与合成，物的精细细节由高频衍射光携带。物镜的孔径有限，仅能接收衍射角小于截止角的低频成分，对应截止空间频率 $f_{max} = \frac{NA}{\lambda}$，最小分辨距离 $\delta y = \frac{0.61\lambda}{NA}$，即阿贝衍射极限，这是显微镜分辨本领的理论上限。增大放大倍数仅能对已成像的内容进行几何放大，无法恢复被物镜孔径阻挡的高频细节信息；超过衍射极限对应的放大倍数为无效放大，仅会放大模糊的像，无法突破衍射极限，因此不能通过增大放大倍数无限制提高分辨本领。

9.2 GX2 思考题

问题 1：分析影响计算全息成像效果的因素。

答：影响计算全息成像效果的核心因素可分为三类：1. 全息图设计因素：编码算法的衍射效率与收敛精度、全息图采样率是否满足奈奎斯特采样定理、物光波与参考光的参数设置与计算精度，直接决定全息图对物波前的还原度。2. 空间光调制器 (SLM) 因素：SLM 的分辨率与像素尺寸决定再现像的分辨率上限，振幅/相位调制非线性、入射光偏振匹配度、像素填充率不足，会降低成像对比度、增加背景噪声。3. 光学系统与环境因素：光路准直性、激光相干性、光学元件像差，以及光学平台振动、气流温度扰动等环境因素，均会影响波前再现精度，恶化成像质量。

问题 2：尝试编写计算全息及数字全息的代码。

答：以下为基于 MATLAB 的振幅型傅里叶计算全息图生成代码，以及数字全息菲涅尔数值再现代码，可直接运行实现核心功能。

1. 振幅型傅里叶计算全息图生成代码

```
% 振幅型傅里叶计算全息图生成代码
clear; clc; close all;

%% 1. 读取并预处理原始图像
img = imread('SYSUlogo.jpg'); % 读取原始图像
img_gray = rgb2gray(img); % 转换为灰度图
img_resize = imresize(img_gray, [512, 512]); % 调整尺寸为512×512
img_double = im2double(img_resize); % 转换为双精度

%% 2. 参数设置
lambda = 650e-9;    % 激光波长650nm
pixel_pitch = 26e-6; % SLM像素尺寸26 m
N = size(img_double, 1);% 图像像素数
L = N * pixel_pitch; % SLM有效区域尺寸

%% 3. 物光场的傅里叶变换（频谱面光场）
img_fft = fftshift(fft2(ifftshift(img_double))); % 傅里叶变换

%% 4. 添加平面参考光，生成振幅型全息图
k = 2 * pi / lambda; % 波矢
theta_x = 1 * pi / 180; % 参考光x方向入射角1度
theta_y = 0;          % 参考光y方向入射角0度
% 参考光相位分布
[x, y] = meshgrid(linspace(-L/2, L/2, N), linspace(-L/2, L/2, N));
ref_phase = k * (x * sin(theta_x) + y * sin(theta_y));
ref_wave = exp(1i * ref_phase); % 参考光复振幅

% 物光与参考光干涉，生成振幅型全息图
hologram = abs(img_fft + ref_wave).^2;
```

```
    % 归一化到0-255灰度级
    hologram_norm = uint8(255 * (hologram -
        min(hologram(:))) / (max(hologram(:))
        - min(hologram(:))));

    %% 5. 全息图数值再现验证
    recon_fft =
        fftshift(fft2(ifftshift(hologram_norm)));
    recon_img = abs(recon_fft);

    %% 6. 结果显示与保存
    figure;
    subplot(1,3,1); imshow(img_resize);
        title('原始图像');
    subplot(1,3,2); imshow(hologram_norm);
        title('生成的振幅型全息图');
    subplot(1,3,3); imshow(recon_img, []);
        title('数值再现像');

    imwrite(hologram_norm,
        'CGH_Amplitude.bmp'); % 保存全息图
```

运行结果为：

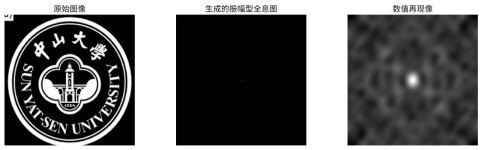


图 36: 傅里叶计算全息图生成代码运行

2. 数字全息菲涅尔数值再现代码

```
    % 数字全息菲涅尔数值再现代码
    clear; clc; close all;

    %% 1. 读取全息图
    hologram = imread('CGH_Amplitude.bmp'); %
        读取拍摄的全息图
    hologram_gray = im2gray(hologram);
    hologram_double = im2double(hologram_gray);
    N = size(hologram_double, 1); % 全息图像素数
    M = size(hologram_double, 2);

    %% 2. 实验参数设置
    lambda = 650e-9;    % 激光波长650nm
    pixel_pitch = 3.2e-6; % CCD像素尺寸3.2μm
    z = 0.2;            %
        物距（物体到CCD的距离，单位m）
    k = 2 * pi / lambda; % 波矢

    %% 3. 坐标网格构建
    Lx = N * pixel_pitch;
    Ly = M * pixel_pitch;
    [x, y] = meshgrid(linspace(-Lx/2, Lx/2, N),
        linspace(-Ly/2, Ly/2, M));
    [fx, fy] =
        meshgrid(linspace(-1/(2*pixel_pitch),
        1/(2*pixel_pitch), N), ...
    linspace(-1/(2*pixel_pitch),
        1/(2*pixel_pitch), M));

    %% 4. 菲涅尔衍射积分数值再现
    % 菲涅尔衍射传递函数
    H = exp(-1i * pi * lambda * z * (fx.^2 +
        fy.^2));
    % 频谱域菲涅尔变换
    recon_spectrum =
        fftshift(fft2(ifftshift(hologram_double)))
        .* H;
    recon_wave =
        fftshift(ifft2(ifftshift(recon_spectrum)));
    % 再现像的振幅与相位
    recon_amplitude = abs(recon_wave); %
        振幅像（强度像）
    recon_phase = angle(recon_wave); % 相位像

    %% 5. 结果显示
    figure;
    subplot(1,3,1); imshow(hologram_gray);
        title('原始全息图');
    subplot(1,3,2); imshow(recon_amplitude,
        []); title('再现振幅像');
    subplot(1,3,3); imshow(recon_phase, []);
        title('再现相位像');
```

运行结果为：

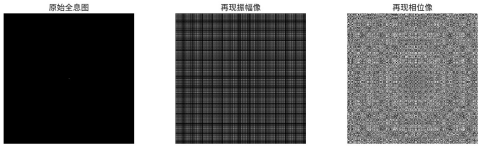


图 37: 菲涅尔数值再现代码所得结果

参考文献

[1] 宋菲君. 近代光学信息处理 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2014.

[2] 苏显渝, 吕乃光, 陈家璧. 信息光学原理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.

[3] 张以谟. 应用光学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.

[4] Gabor D. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161(4098): 777-778.

[5] Gabor D, Bragg W L. Microscopy by reconstructed wavefronts[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1949, 197(1051): 454-487.

[6] Ash E A. Dennis gabor, 1900-1979[J]. Nature, 1979, 280(5720): 431-433.

[7] Goodman J W. Introduction to Fourier Optics[M]. New York: Macmillan Learning, 2017.

[8] Bjelkhagen H I. Silver-halide recording materials for holography and their processing[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1995.

[9] Blanche P A, Bablumian A, Voorakaranam R, et al. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer[J]. Nature, 2010, 468(7320): 80-83.

[10] Tay S, Blanche P A, Voorakaranam R, et al. An updatable holographic three-dimensional display[J]. Nature, 2008, 451(7179): 694-698.

[11] Blanche P. Optical Holography: Materials, Theory and Applications[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2019.

[12] Lugt A V. Signal detection by complex spatial filtering[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1964, 10(2): 139-145.

[13] Goodman J W, Lawrence R W. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. Applied Physics Letters, 1967, 11(3): 77-79.

[14] Lesem L B, Hirsch P M, Jordan J A. The kinoform: A new wavefront reconstruction device[J]. IBM Journal of Research and Development, 1969, 13(2): 150-155.

[15] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. Optik, 1972, 35(2): 237-246.

[16] Christopher P J, Kadis A, Gordon G S, et al. Hologen: An opensource toolbox for high-speed hologram generation[J]. Computer Physics Communications, 2022, 270: 108139.

[17] Poon T C, Liu J P. Introduction to Modern Digital Holography: With Matlab[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[18] Breckinridge J B, Voelz D G. Computational Fourier Optics: A MATLAB Tutorial[M]. Bellingham: SPIE Press, 2011.

[19] Trolinger J D. The language of holography[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2: 1-9.

附录 A: 签名页及原始数据

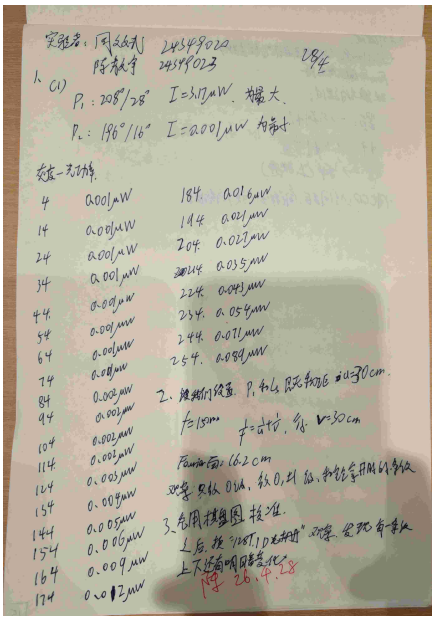


图 38: GX1 签名页即实验记录

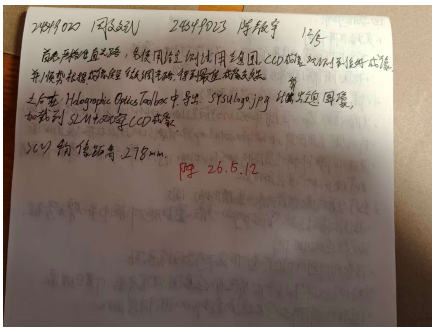


图 39: GX2 签名页即实验记录

附录 B: 源代码

Listing 1: MATLAB 源代码

```
% SLM灰度-光功率关系曲线绘制代码
clear; clc; close all;

%% 1. 输入实验数据
gray_level =
    [4,14,24,34,44,54,64,74,84,94,104,114,124,134
             164,174,184,194,204,214,224,234,244
                 % 灰度值
power_uW =
    [0.001,0.001,0.001,0.001,0.001,0.001,0.001,0.
            0.002,0.002,0.002,0.002,0.003,0.004,
            0.009,0.012,0.016,0.021,0.027,0.035,
            0.071,0.089]; % 光功率/ W

%% 2. 绘制曲线图
figure('Color','w','Position',[100,100,800,500]);
plot(gray_level, power_uW, 'b-o',
    'LineWidth',1.5, 'MarkerSize',6,
    'MarkerFaceColor','b');
hold on;

%% 3. 图像标注与美化
xlabel('灰度值 (Gray
    Level)','FontSize',12,'FontName','Times
    New Roman');
ylabel('透射光功率 /
    \muW','FontSize',12,'FontName','Times
    New Roman');
title('SLM振幅调制曲线 (Gray Level vs.
    Transmitted
    Power)','FontSize',14,'FontName','Times
    New Roman');
legend('实验数据点','Location','northwest','FontSize',10);
grid on;
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Times New
    Roman');
xlim([0,260]);

%% 4. 保存图片（300dpi
    JPG，可直接插入LaTeX）
saveas(gcf,'SLM_Modulation_Curve.jpg');
fprintf('曲线图已保存为
    SLM_Modulation_Curve.jpg\n');
```