

阿贝成像原理和空间 调制伪彩色编码实验 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

实验一 阿贝成像原理和空间滤波实验

一、引言

阿贝所提出的显微物镜成像原理以及随后的阿贝——波特实验在傅里叶光学早期发展历史上具有重要地位。这些实验简单漂亮，对相干成像的机理、对频谱的分析和综合的原理做出了深刻的解释。同时，这种简单模板作滤波的方法，直到今天在图像处理中仍然有广泛的应用价值。

二、实验目的

- 1、理解阿贝成像原理
- 2、完成阿贝实验光路搭建
- 3、完成频谱选择，观察不同频谱对应成像的影响，完成低频和方向滤波

三、基本原理

1、空间频谱

任何一个物理真实的物平面上的空间分布函数 $g(x, y)$ 可以表示成无穷多个基元函数 $\exp[i2\pi(f_x x + f_y y)]$ 的线性叠加，即

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G(f_x, f_y) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y \quad (1)$$

式中， f_x 、 f_y 是基元函数的参量，成为该基元函数的空间频率， $G(f_x, f_y)$ 是该基元函数的权重，称为 $g(x, y)$ 的空间频谱。数学上 $G(f_x, f_y)$ 可通过 $g(x, y)$ 的傅里叶变换得到，即

$$G(f_x, f_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \quad (2)$$

公式(1)实质上是傅里叶变换(2)的逆变换。物理上可利用凸透镜实现物平面分布函数 $g(x, y)$ 与其空间频谱的变换。具体做法是把振幅透过率为 $g(x, y)$ 的图像作为物放在凸透镜的前焦面上，用波长为 λ 的单色平面波照射该物。平行光经物的衍射成为许多方向不同的平行光束，每一束平行光用空间频率 (f_x, f_y) 和权重 $G(f_x, f_y)$ 表征，衍射角越大 (f_x, f_y) 也越大。空间频率为 (f_x, f_y) 的平行光经凸透镜后汇聚在后焦面的某一点 (x_1, y_1) ，形成一个复振幅分布，它就是 $g(x, y)$ 的空间频谱 $G(f_x, f_y)$ ，而且 $f_x = x_1 / \lambda F$ ， $f_y = y_1 / \lambda F$ ，其中 F 为透镜的焦距。

2、阿贝成像原理和空间滤波

阿贝成像理论认为，物体通过透镜成像过程是物体发出的光波经物镜，在其后焦面上产生夫琅和费衍射的光场分布，即得到第一次衍射的像（物的傅里叶频

谱)；然后该衍射像作为新的波源，由它发出次波在像面上干涉而构成物体的像，称为第二次衍射成像，如图 1 所示。

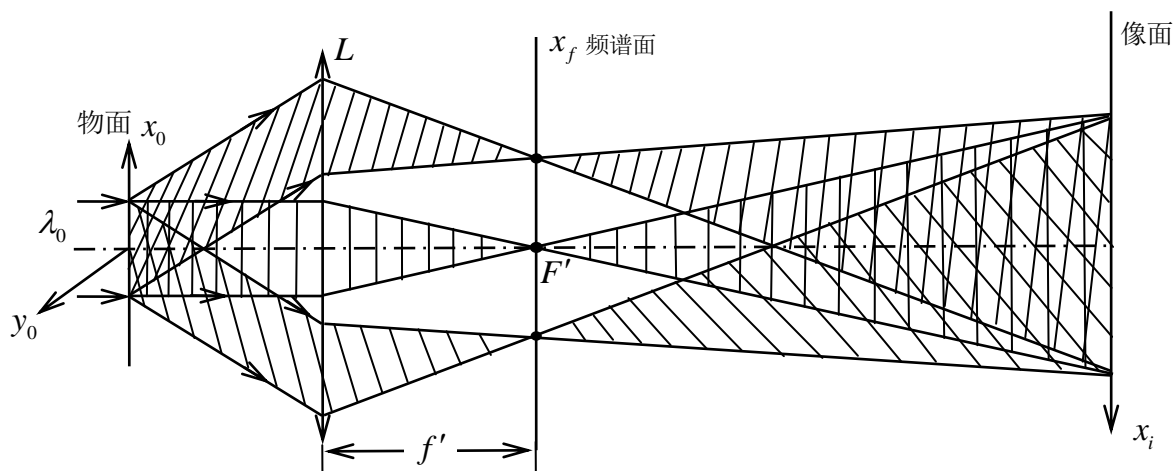


图 1 阿贝成像理论示意图

进一步解释，物函数可以看作由许多不同空间频率的单频（基元）信息组成，夫琅和费衍射将不同空间频率信息按不同方向的衍射平面波输出，通过透镜后的不同方向的衍射平面波分别汇聚到焦平面上不同的位置，即形成物函数的傅里叶变换的频谱，频谱面上的光场分布与物函数（物的结构）密切相关。不难证明，夫琅和费衍射过程就是傅里叶变换过程，而光学成像透镜即能完成傅立叶变换运算，称傅里叶变换透镜。

阿贝成像理论由阿贝一波特实验得到证明：物面采用正交光栅（网格状物），用平行单色光照明，在频谱面放置不同滤波器改变物的频谱结构，则在像面上可得到物的不同的像。实验结果表明，像直接依赖频谱，只要改变频谱的组份，便能改变像。这一实验过程即为光学信息处理的过程，如图 2 所示。

如果对物或频谱不进行任何调制（改变），物和像是一致的，若对物函数或频谱函数进行调制处理，由图 2 所示的在频谱面采用不同的频谱滤波器，即改变了频谱则会使输出的像发生改变而得到不同的输出像，实现光学信息处理的目的。

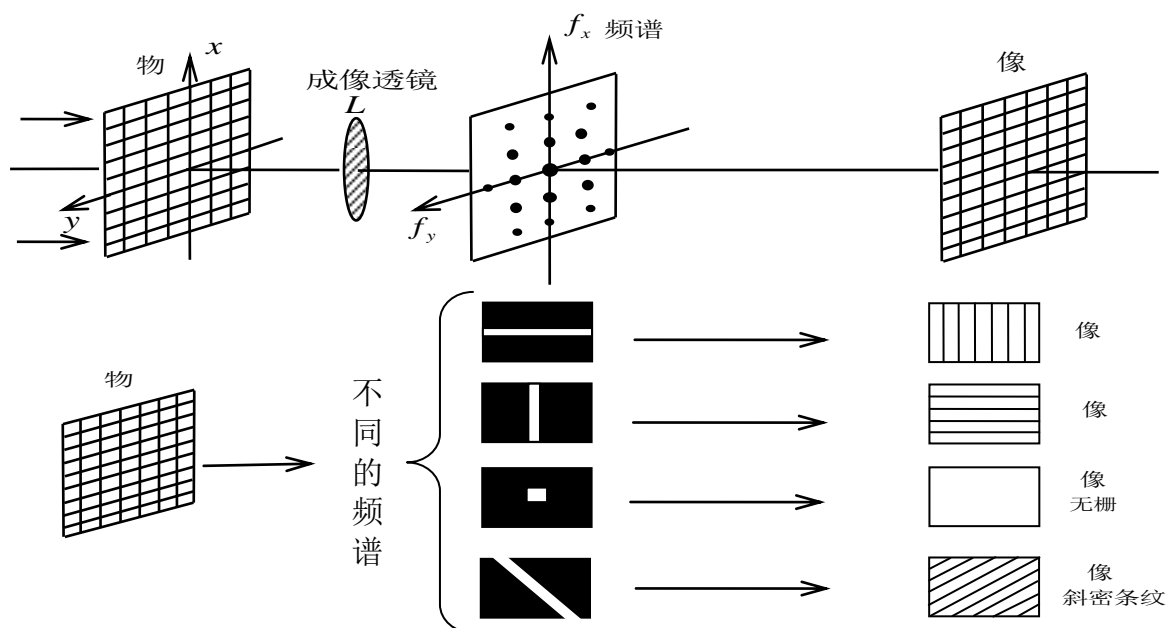


图2 阿贝-波特实验示意图

典型的光学信息处理系统为如图3所示的4f傅里叶变换系统：光源S经扩束镜L（如果是激光一般需要先扩束再准直才能获得平行光）产生平行光照射物面（输入面），经傅里叶透镜L1变换，在其后焦面F处产生物函数的傅里叶频谱，再通过透镜L2的傅里叶逆变换，在输出面上将得到所成的像(像函数)。

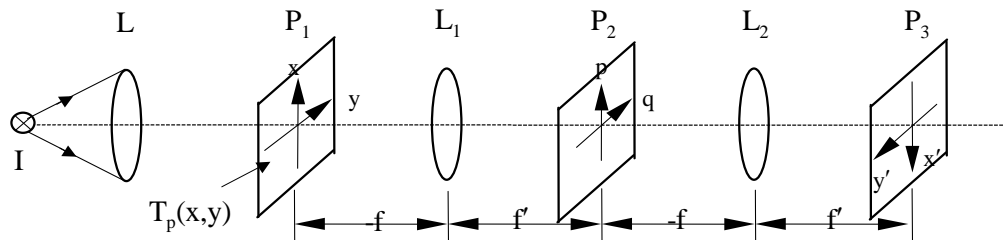


图3 4f光学信息处理系统

四、实验内容

1、软件安装

(1) 将相机连接到电脑上

(2) 在文件夹中运行“彩色相机安装程序”，按照安装提示点击“下一步”，最后完成安装，在桌面上会生成一个“MindVision 演示程序”；双击可以进入采集界面，点击采集即可以接收图像信息。

2、光路搭建

(1)参照图4搭建光路，自左向右依次为激光器组件(波长650nm,功率10mw)、扩束组件(f-10mm)，准直组件(f80mm)，光阑(可不用)，目标物(光栅字)，变换透镜1(f200mm)，滤波器，变换透镜2(f100)；具体调整过程如下。



图 4 阿贝成像原理及空间滤波原理实物图

(2) 安装激光器，以白屏刻线为参考，并调整白屏刻线适当高度，将光阑在激光器近处，调整激光器高低，让激光与刻线中心同高，将白屏移动远处，调整激光让激光通过再次与白屏刻线中心同高，反复两次调整按此法调整和俯仰，反复调节使激光在近处和远处均能打在参考高度位置，视为激光器调整完成。这样认为激光与台面平行。

(3) 安装扩束镜，上下调整支杆使扩束光斑中心与参考中心（白屏的中心位置）重合，然后固定。

(4) 安装准直镜，准直镜距扩束镜大概 70mm（共焦调整）即可获得平行光，上下调整支杆使平行光束与参考中心重合，然后固定。

(5) 安装光栅字，上下调整支杆使光斑正入射“光”字，然后固定。光栅字位置尽可能靠近准直镜。

(6) 安装变换透镜 1，上下调整支杆使入射“光”字从变换透镜中心通过，变换透镜 1 距离“光”字约 200mm，此时在变换透镜 1 后焦面上可以看到光栅字的点阵频谱。

(7) 安装变换透镜 2，上下调整支杆使入射光中心通过透镜中心，透镜放置在频谱点后约 100mm 位置，即频谱点位于透镜的前焦面上。

(8) 安装相机，调整相机位置，在透镜 2 的后面上可以看到光栅字的像。调整相机采集时间约 15ms-30ms，调整激光器强度和曝光时间，以及微调相机前后位置即可获取清晰像。

(8) 安装滤波器，沿导轨前后移动滤波器，选择变换透镜的频谱面即可实现滤波。

3、结果观察及记录

(1)、光栅字频谱

实验中使用的“光”字是用空间频率为 12L/mm 的正交光栅调制的，在变换透镜的频谱面上即可观察到如图 3 所示的频谱点，根据目标物分析频谱。

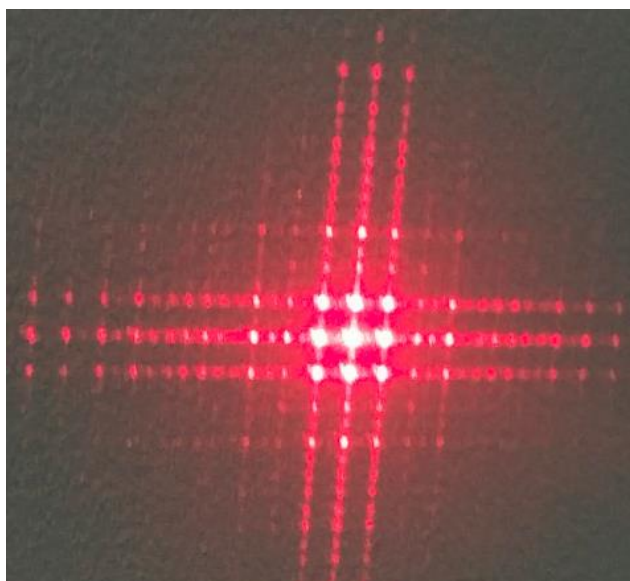


图 5 “光” 栅字的频谱点

(2) 观察方向滤波实际效果：

1) 选择滤波器中的“缝”，在频谱面水平放置，使包括 0 级在内的一排点通过，我们可以观察到“光”的像中间充满竖向条纹，如图 6 所示；



图 6 水平滤波对应的像

2) 将“缝”旋转 90 度竖直放置，使包括 0 级在内的一排点通过，我们可以

观察到“光”的像中间充满横向条纹，滤波效果如图 7 所示；

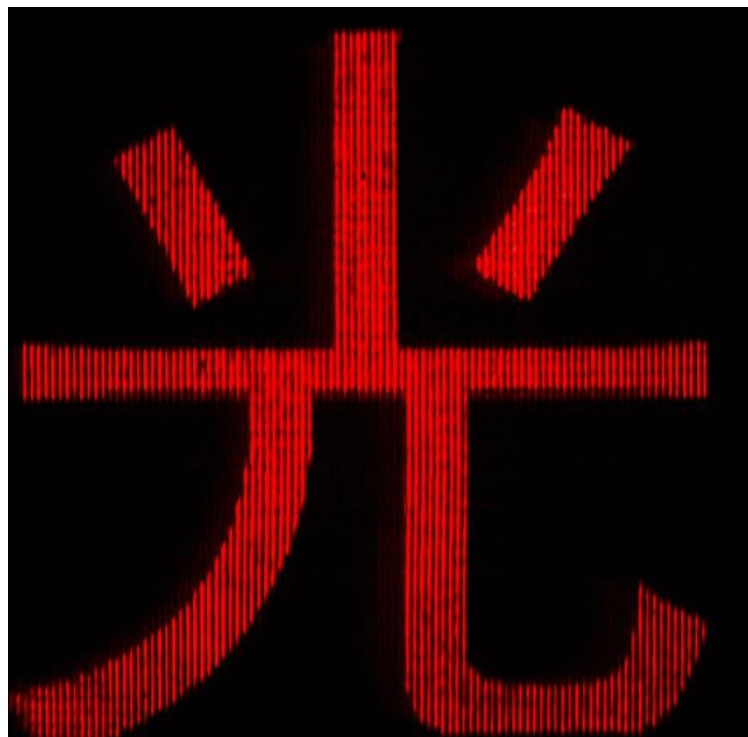


图 7 竖直滤波对应像

3) 将“缝”调整 45 度，使包括 0 级在内的一排倾斜点通过，我们可以观察到如图 8 所示斜条纹像；

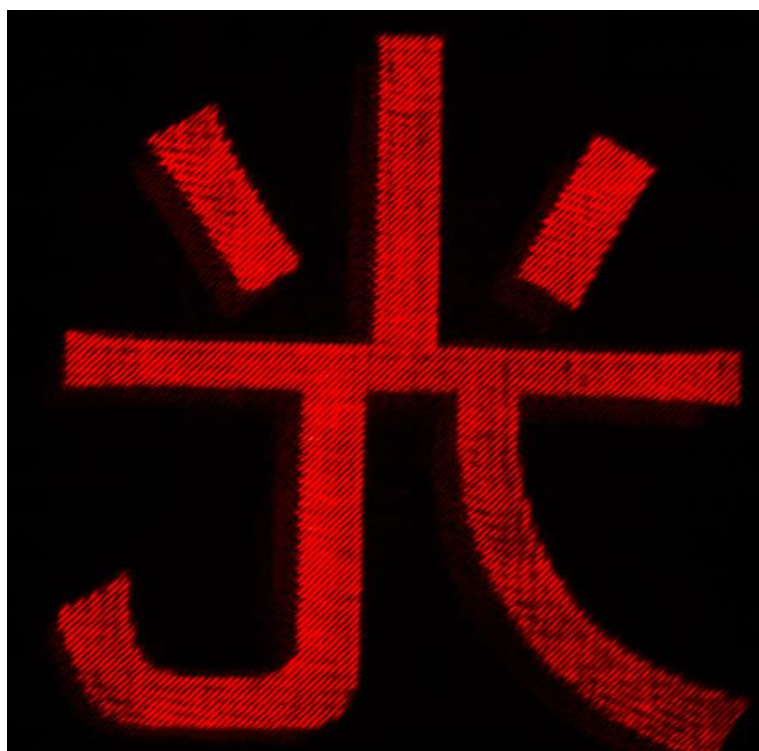


图 8 45 度方向滤波对应像

(3) 观察低通滤波和高通滤波实际效果：

1) 将滤波器中的“孔”放置在频谱面，只让 0 级点通过，我们即可以观察到“光”的像中间没有条纹，如图 9 所示；



图 9 低通滤波效果

2) 将滤波器中的“孔”放置在频谱面，调整孔位置，可以选择通过某些高频信号，我们可以看到中心较暗，边缘较为突出，如图 10 所示；

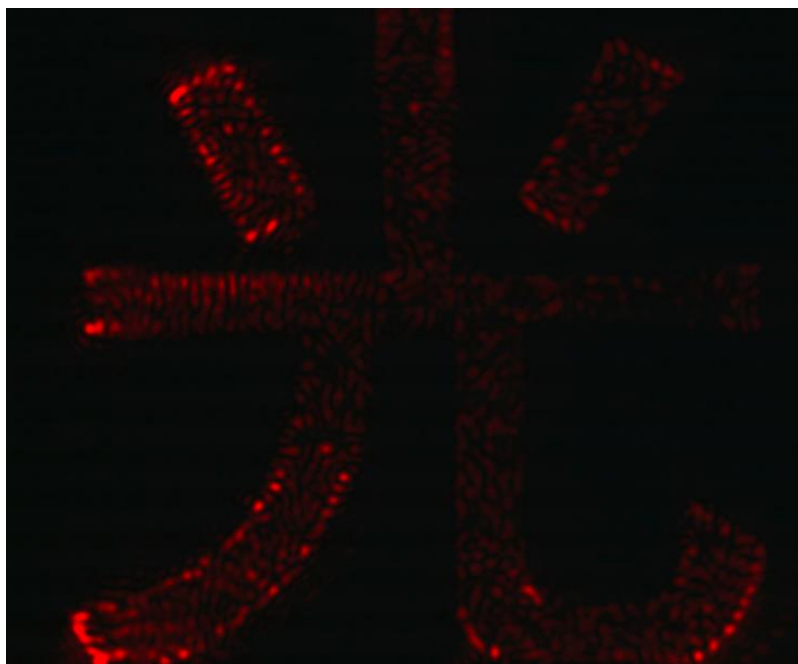


图 10 高通滤波效果

实验二 调制空间假彩色编码实验

一、引言

一张黑白图像有相应的灰度分布。人眼对灰度的识别能力是不高的，最多有 15~20 个层次。但是人眼对色度的识别能力却很高，可以分辨数十种乃至上百种色彩。若能将图像的灰度分布转化为彩色分布，势必大大提高人们分辨图像的能力，这项技术称之为光学图像的假彩色编码。假彩色编码方法有若干种，按其性质可分为等空间频率假彩色编码和等密度假彩色编码两类；按其处理方法则可分为相干光处理和白光处理两类。

等空间频率假彩色编码是对图像的不同空间频率赋予不同的颜色，从而使图像按空间频率的不同显示不同的色彩；等密度假彩色编码则是对图像的不同灰度赋予不同的颜色。前者用以突出图像的结构差异，后者则用来突出图像的灰度差异，以提高对黑白图像的视判读能力。黑白图片的假彩色化已在遥感、生物医学和气象等领域的图像处理中得到了广泛的应用。

二、实验目的

- 1、掌握 θ 调制假彩色编码的原理；
- 2、巩固和加深对光栅衍射基本理论的理解；获得假彩色编码图像。

三、基本原理

对于一幅图像的不同区域分别用取向不同(方位角 θ 不同)的光栅预先进行调制，经多次曝光和显影、定影等处理后制成透明胶片，并将其放入光学信息处理 $4f$ ，系统中的输入面，用白光照明，则在其频谱面上，不同方位的频谱均呈彩虹颜色。如果在频谱面上开一些小孔，则在不同的方位角上，小孔可选取不同颜色的谱，最后在信息处理系统的输出面上便得到所需的彩色图像。由于这种编码方法是利用不同方位的光栅对图像不同空间部位进行调制来实现的，故称为 θ 调制空间假彩色编码。具体编码过程如下：

1、被调制物

物的样品如图 1 所示。若要使其中草地、天安门和天空 3 个区域呈现 3 种不同的颜色，则可在一胶片上曝光 3 次，每次只曝光其中一个区域(其他区域被挡住)，并在其上覆盖某取向的光栅，3 次曝光分别取 3 个不同取向的光栅，如图中线条所示。将这样获得的调制片经显影、定影处理后，置于处理光路的输入平面 P1，用白光平行光照明，并进行适当的空间滤波处理。

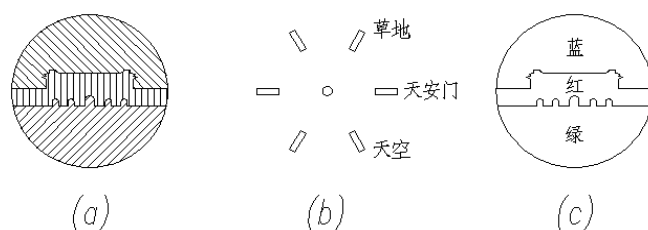


图 1 被调制物示意图

2、空间滤波

空间滤波处理光路，可以使用单透镜成像光路，如图 2 所示，图中输入面 P1、变换透镜 L1 和输出面满足成像光系，可以根据成像关系控制像的大小，频谱面在变换透镜 1 后的焦面，通过对频谱面的处理可以获得彩色像。

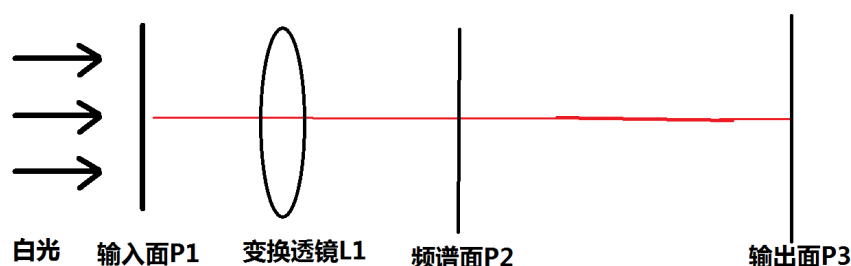


图 2 θ 调制空间假彩色编码单透镜成像光路示意图

滤波过程也可以采用 4f 成像光路，如图 3 所示。图中输入面 P1 在变换透镜的前焦面上，在频谱面后方放置变换透镜 2，变换透镜 2 的后焦面即可以看到输出面的像，频谱位置位于变换透镜的后焦面 P2 位置，通过对频谱的处理，即可以看到彩色像。

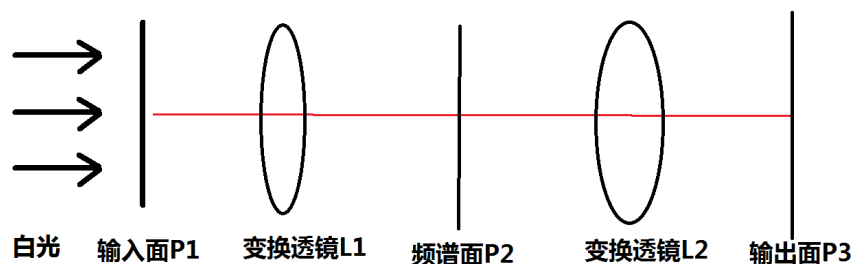


图 3 θ 调制空间假彩色编码 4F 成像光路示意图

由于物被不同取向的光栅所调制，所以在频谱面上得到的将是取向不同的带状谱(均与其光栅线垂直)，物的 3 个不同区域的信息分布在 3 个不同的方向上，互不干扰，当用白光照明时，各级频谱呈现出的是色散的彩带，由中心向外按波长从短到长的顺序排列。在频谱面上选用一个带通滤波器，实际是一个被穿了孔

的光屏或不透明纸。

θ 调制所用的物是一个空间频率为 100L/mm 的正弦光栅，并把它剪裁拼接成一定图案，如图 1 (a) 中的天安门图案。其中天安门用条纹竖直的光栅制作，天空用条纹左倾 45 度的光栅，地面用条纹右倾 45 度的光栅制作。因此在频谱面上得到的是三个取向不同的正弦光栅的衍射斑，如图 1 (b) 所示。由于用白光照明和光栅的色散作用，除 0 级保持为白色外，正负 1 级衍射斑展开为彩色带，蓝色靠近中心，红色在外。在 0 级斑点位置、条纹竖直的光栅正负 1 级衍射带的红色部分、条纹左倾光栅正负 1 级衍射带的蓝色部分以及条纹右倾光栅正负 1 级衍射带的绿色部分分别打孔进行空间滤波。然后在像平面上将得到蓝色天空下，绿色草地上的红色天安门图案，如图 1 (c)。

四、实验内容

1、光路搭建（以 4f 光路为例）

(1) 根据图 3 布置光路，自左向右依次为光源组件（白光 LED）、准直镜组件（ $\Phi 40\text{mm}$, $f100\text{mm}$ ）、调制物组件（三个方向被调制的天安门光栅）、变换透镜 1 组件（ $\Phi 50\text{mm}$, $f200\text{mm}$ ）、滤波器组件、变换透镜 2 组件（ $\Phi 50\text{mm}$, $f200\text{mm}$ ）和白屏组件。

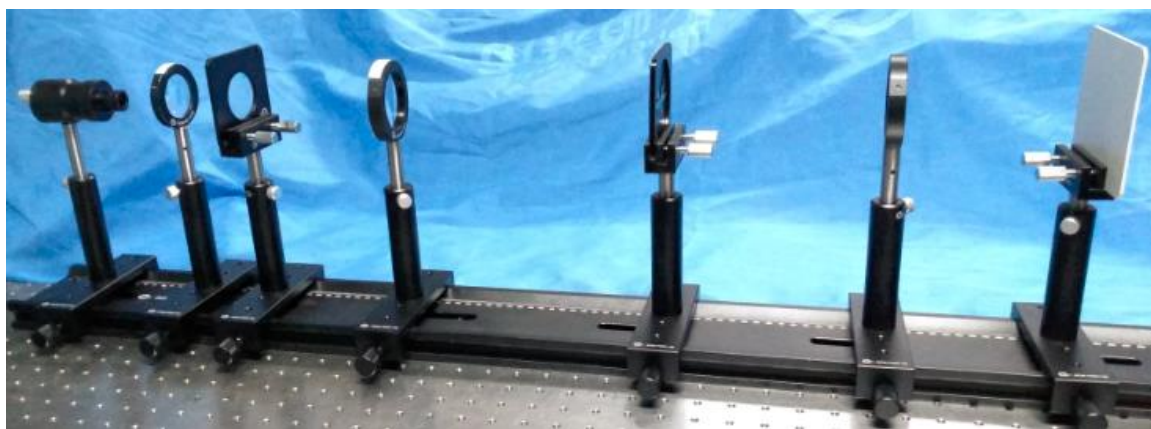


图 4 θ 调制空间假彩色编码实际光路

(2) 安装 LED 及准直透镜，将 LED 调整合适高度，并将 LED 出光口正对前方（后续光路偏移可以需要微调），然后将其固定在导轨上；

(3) 将准直镜靠近 LED 出光口，调整准直镜高度，让准直镜中心基本与 LED 的出光位置同高，然后正调整准直镜到 LED 出光位置约 100mm，此时可以在导轨另外一端的白屏上看到约 50mm 大小的光斑，基本准直光路。

(4) 安装天安门光栅，上下调整支杆使光斑正入射，然后将其固定。

(5) 安装变换透镜 1，上下调整支杆使入射光尽可能从变换透镜中心通过，调整变换透镜 1 距离天安门光栅距离约 200mm，然后将其固定。

(6) 安装变换透镜 2，上下调整支杆使入射光尽可能重变换透镜中心通过，调整变换透镜 2 距离变换透镜 1 约 300mm 位置，并固定。

(7) 前后移动白屏，当白屏在变换透镜 2 后焦面位置处可以看到天安门的像，此时没有滤波可以看到天安门的边缘。

(8) 安装滤波器，沿导轨前后移动滤波器，选择变换透镜的频谱面即可实现滤波。

2、 θ 调制及实验结果观察

(1) 使用 θ 调制滤波器 根据预想的各部分图案所需要的颜色，调整滤波器上的三组光，在天安门对应的一组谱点中，让这组频谱的红色通过，在草地对应的一组谱点中让绿色通过，天空对应的频谱中让蓝色通过。再在输出平面上观看经编码得到的假彩色像，效果如图 5。

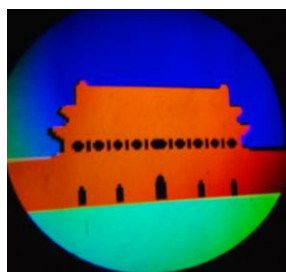


图 5 θ 调制实验效果图

(2) 在实验过程中，老师可以使用公司提供的 θ 调制滤波器，也可以在实验室中找一张硬纸片，将硬纸片放在频谱面上并分别标记三个方向需要滤波的颜色，然后在标记点扎孔，重新放回频谱面，即可观察滤波效果。

实验三 数字编码及颜色滤波实验

一、引言

阿贝—波特实验形象直观的观察频谱，并通过频谱的滤波解释了不同位置的频谱信息对成像的贡献不同。这个实验是信息光学中比较经典的实验。获取不同取向调制物体，传统方法一般采用全息方法，拍摄光栅并调制不同方向的目标物，处理光过程较为复杂，一般均需要显影定影漂白处理。

空间光调制的出现极大方便了调制目标物的产生。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，或者把非相干光转化成相干光。

二、实验目的

- 1、了解空间光调制器工作原理
- 2、完成光路设计及数字编码过程
- 3、完成滤波及图像采集

三、基本原理

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)；按照调制方式分为振幅调制、相位调制和混合调制。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。

如需要分析空间光调制器对光的振幅和相位调制特性，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1所示。

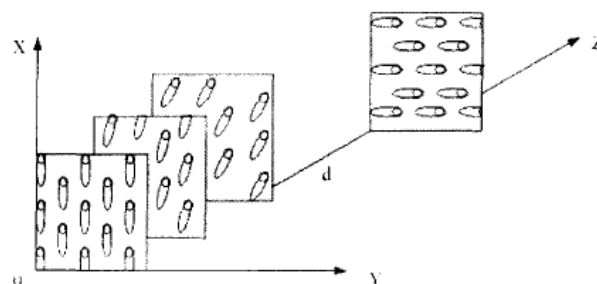


图1 TNLC 分层模型

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 2 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。

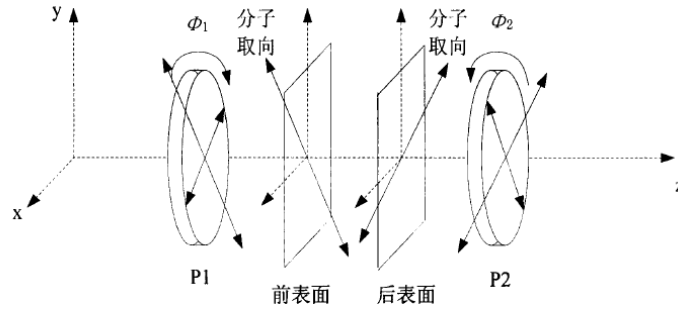


图 2 SLM 光路示意图

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 3 所示。

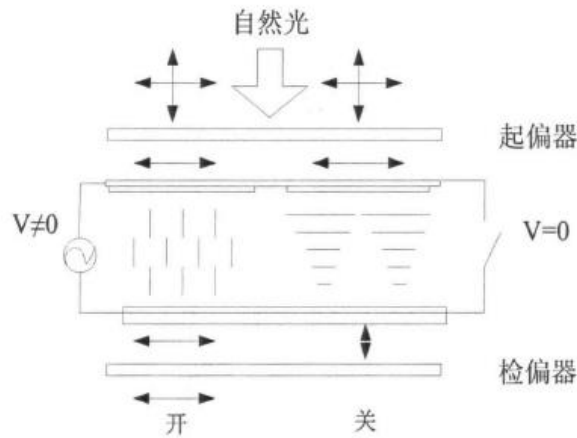


图 3 液晶屏的透光原理

图 3 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。

实验目标物可以通过实验软件完成调制，然后将调制好的图像加载到空间光调制器上（空间光调制器的显示灰度显示），如想将一幅图像的不同区域分别用取向不同（方位角 θ 不同）的光栅预先进行调制，将其放入光学信息处理系统中的输入面，用复色光照明，则在其频谱面上，不同方位的频谱均呈不同颜色。

如果在频谱面上可选取不同颜色的谱，最后在信息处理系统的输出面上便得到所需的彩色图像。由于这种编码方法是利用不同方位的光栅对图像不同空间部位进行调制来实现的，故称为 θ 调制空间假彩色编码。具体编码过程如下：

物的样品如图 4 所示。若要下箭头、横横剪头和方形分别为横向光栅、竖向光栅和斜光栅调制，在频谱面上通过颜色滤波即可将这样获得彩色图像。

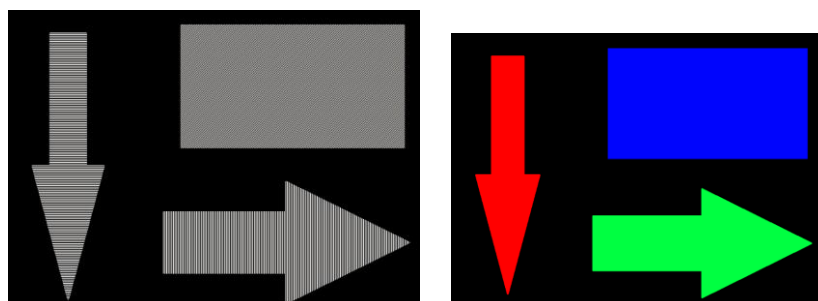


图 4 被调制物示意图

四、实验内容

1、软件安装及电脑设置

（1）将相机连接到电脑上。

（2）在文件夹中运行“彩色相机安装程序”，按照安装提示点击“下一步”，最后完成安装，在桌面上会生成一个“MindVision 演示程序”；双击可以进入采集界面，点击采集即可以接收图像信息。

（3）将加密锁（蓝色 u 盘）插入电脑，运行“实验软件 \GrandDogRunTimeSystemSetup（宏狗驱动）.exe”，按照提示安装。

（4）安装库函数“实验软件\MCRInstaller（首先安装）.exe”按照提示安装。

（5）将空间调制器连接到电脑显卡的 HDMI 接口，打开电源开关；在桌面上右击“屏幕分辨率”，将电脑显示调整为“扩展模式”。②屏即为空间光调制器，并将其分辨率调整为 1280*720，XP 电脑和 win7 电脑显示如图 5 和图 6；



图 5



图 6

2、光路搭建

(1) 光路分为两个部分，一部分是自左向右，一部分是自右向左；如图 7 所示，第一部分自左向右依次为白光 LED，准直镜镜（ $\Phi 40\text{mm}$ ， $f80\text{mm}$ ），光阑，空间光调制器；第二部分为自右向左依次为空间光调制器，变换透镜 1（ $\Phi 50\text{mm}$ ， $f200\text{mm}$ ），滤波器，变换透镜 2（ $\Phi 40\text{mm}$ ， $f100\text{mm}$ ）和数字相机；



图 7 数字编码成像实物图

(2) 安装 LED 及准直透镜，将 LED 调整合适高度，并将 LED 出光口正对前方（后续光路偏移可以需要微调），然后将其固定在导轨上；

(3) 将准直镜靠近 LED 出光口，调整准直镜高度，让准直镜中心基本与 LED 的出光位置同高，然后正调整准直镜到 LED 出光位置约 80mm，此时可以在导轨另外一端的白屏上看到约 50mm 大小的光斑，基本准直光路。

(4) 在准直镜后安装光阑，为减小球差，调整光阑约 13mm 左右，光斑大小会覆盖整个空间光调制器的整个靶面；

(5) 安装空间调制器，调制空间光调制器高度，并适当调整反射角度，让空间光调制器的反射光与入射光有一定夹角。

(6) 安装变换透镜 1，在距离空间光调制器约 200mm 位置放置透镜，并调整透镜让反射光入射透镜中心并与透镜表面垂直。

(7) 安装变换透镜 2，在距离变换透镜 250mm 左右放置变换透镜 2（变换透镜需要放置在频谱后），调整透镜位置，保证光入射透镜中心并与透镜垂直。

(8) 安装相机，调整相机位置，在变换透镜 2 后约 100mm 可以接收像（具体像的情况可以在电脑上观察）。

(9) 安装滤波器，由于空间光调制器自身有“栅格”结构，所以频谱位置出了有加载图片信号的频谱分布，还有空间光调制器的频谱。如图 3 所示，频谱位置的频谱如图 8（a），其中黑色是空间光调制器的 0 级和 1 级，中间的除黑色以外的才是物体信息的频谱，所以滤波过程不但要将空间光调制的频谱滤掉（黑点），还需要进一步选择每个方向的颜色，完成颜色滤波，如图 8（b）为制作滤波器样子，图 8（c）为经过滤波器的频谱。

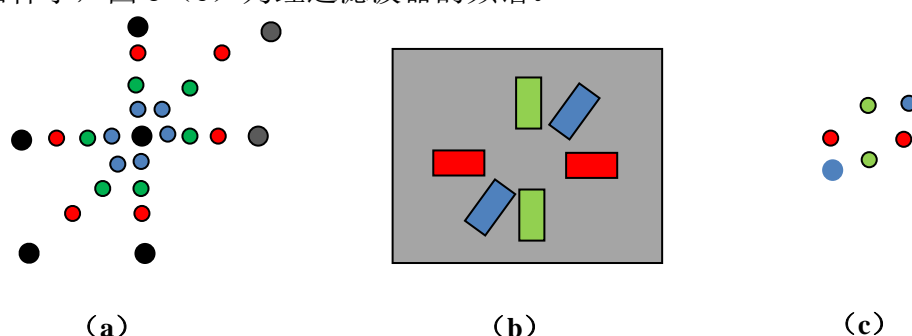


图 8 原始频谱及滤波之后频谱示意图

3、图像的观测

(1) 点击运行“实验软件\彩色编码实验软件.EXE”，如图 9 所示，点击“读取图片”，选择需要的加载的图片，默认红色为“横直光栅”，绿色为“竖直光栅”，蓝色为“斜直光栅”；

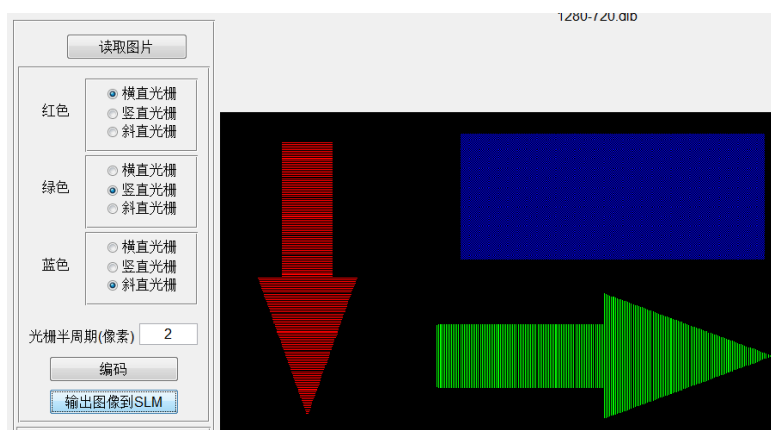


图 9 彩色编码实验软件

(2) 在“光栅半周期”填 2，点击“编码”，右边显示编码图片；点击“输出图像到 SLM”，在电脑扩展模式下，这个调制图像即可加载到空间光调制器上。

(3) 运行“MindVision 演示程序”，出现图 10 所示，点击开始采集，将相

机曝光时间调整在 15ms 左右，可以观察到图样。

(4) 在频谱位置安装滤波器，可以看到图 10 中的滤波效果。

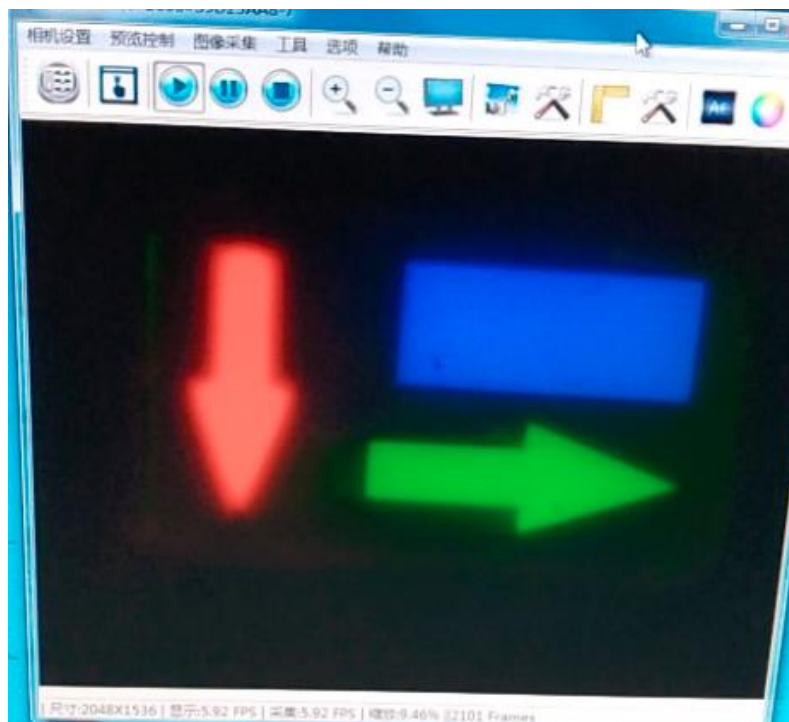


图 10 相机采集滤波后的图样

(5) 如果选择其他方向的调制光栅，那可以看到不同的效果，如果将红色改为“竖直光栅”，编码之后输出 SLM，那可以看到如图 11 所示图样；



图 11 下箭头调制横向光栅图样