



北京杏林睿光科技有限公司 (RealLight®)

# 傅里叶变换相关图像识别实验

## RLE-CH03

# 实 验 讲 义

版本: 2013

发布日期: 2013 年 9 月

**版权声明：**

本手册中所提及的软硬件产品的商标与名称，都属于相应公司所有。

本手册的版权属于北京杏林睿光科技有限公司所有。未得到本公司的正式许可，任何组织或个人均不得以任何手段和形式对本手册内容进行复制或传播。

本手册的内容若有任何修改，恕不另行通知。



北京杏林睿光科技有限公司联系方式：

电话：010-67889536/67887073/67872350

传真：010-67889536/67887073/67872350 转 872

邮箱：Sales@real-light.com

网址：www.real-light.com

# 前 言

光学相关器是一个通过光学手段从给定的众多目标信息中提取所需要的信息或检测某一特定信息是否存在的光信息处理系统，广泛地应用于光学图像识别领域。光学联合变换相关器作为特征实时识别和目标实时检测的一个重要处理系统，在遥感、医学、军事、自动化生产检测等领域有着广泛的应用。本实验适用于高校光电专业本科生《信息光学》、《工程光学》等相关课程配套专业实验。

# 目 录

实验 1 二维线性系统傅里叶分析实验.....	1
1.1 实验目的 .....	1
1.2 实验原理 .....	1
1.3 实验仪器 .....	5
1.4 实验步骤 .....	5
实验 2 基于傅里叶变换的光学相关器实验.....	7
2.1 实验目的 .....	7
2.2 基本原理 .....	7
2.3 实验仪器 .....	9
2.4 实验步骤 .....	9
实验 3 傅里叶光学在光学图像加密的应用实验.....	13
3.1 实验目的 .....	13
3.2 实验原理 .....	13
3.3 实验仪器 .....	15
3.4 实验步骤 .....	15
实验 4 光学相关器信息提取实验.....	19
4.1 实验目的 .....	19
4.2 实验原理 .....	19
4.3 实验仪器 .....	19
4.4 实验步骤 .....	19
参考文献.....	22

## 实验 1 二维线性系统傅里叶分析实验

### 1.1 实验目的

掌握傅里叶变换基本原理，了解 SLM 在信息光学中的应用。

### 1.2 实验原理

#### 傅里叶变换及傅里叶透镜

光学信息处理中最重要的一个理论是傅里叶变换效应，傅里叶变换形式如下

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)e^{-j2\pi fx} dx \quad (1-1)$$

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f)e^{j2\pi fx} df \quad (1-2)$$

这两个积分即傅里叶积分。 $G(f)$ 称为 $g(x)$ 的傅里叶变换，或频谱。若 $g(x)$ 表示某空间域的物理量， $G(f)$ 则是该物理量在频率域的代表形式。 $G(f)$ 作用即作为各种频率成分的权重因子，描述各复指数分量的相对幅值和相移。当 $G(f)$ 是复函数，可以表示为

$$G(f) = A(f)e^{j\Phi(f)} \quad (1-3)$$

非周期函数的频谱不是离散的，而是频率 $f$ 的连续或分段连续的函数。所有适当加权的各种频率的复指数分量叠加起来就得到原函数 $g(x)$ ，称它为 $G(f)$ 的傅里叶逆变换。

$g(x)$ 和 $G(f)$ 构成傅里叶变换对。

二维傅里叶变换只是一维傅里叶变换的推广

$$G(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (1-4)$$

$$G(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} G(u, v) \exp[j2\pi(ux + vy)] du dv \quad (1-5)$$

式中， $\sqrt{u^2 + v^2}$ 为空间频率，对图像信号而言，空间频率是指单位长度内亮度做周期性变化的次数。

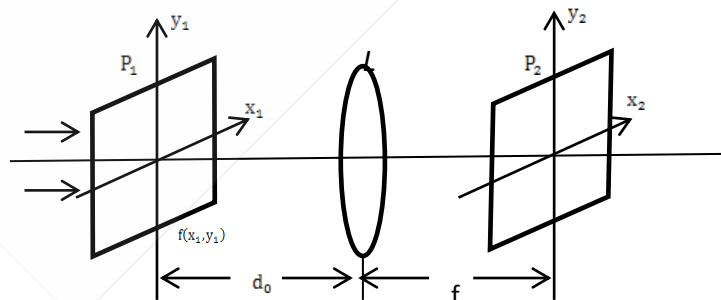


图 1-1 傅里叶变换光路

我们知道, 对一个平面透射物体进行傅里叶变换运算的物理手段是实现它的夫琅和费衍射。为了能在较近的距离观察到物体的远场衍射图, 通常利用传统的光学元件—透镜, 也就是说透镜可以用来实现物体的傅里叶变换。透镜的这一性质是光学方法模拟计算机的基础, 也是相干光学信息处理的基础。

透镜的傅里叶变换原理图如图 1-1 所示。图中  $P_1$  表示输入平面,  $P_2$  表示变换平面, 它们的坐标分别为  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$ , 物体位于透镜  $L$  的前方, 与透镜之间的距离为  $d_0$ 。在单位振幅的平面光波垂直照射下, 平面  $P_1$  上的复振幅分布  $f(x_1, y_1)$  可表示如下

$$f(x_1, y_1) = A(x_1, y_1) \exp[-j\Phi(x_1, y_1)] \quad (1-6)$$

式中  $A(x_1, y_1)$  表示振幅, 是一个确定的实数量。 $(x_1, y_1)$  为输入图像的相位经过透镜  $L$  变换之后, 在变换平面  $P_2$  上的光场分布  $U_f(x_2, y_2)$  可表示为

$$U_f(x_2, y_2) = \frac{1}{j\lambda f} \exp\left[j\frac{k}{2f}\left(1 - \frac{d_0}{f}\right)(x_2^2 + y_2^2)\right] F\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \quad (1-7a)$$

其中,

$$F\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) = F(u, v) = \iint (x_1, y_1) \exp[-j2\pi(x_1 u + y_1 v)] dx_1 dy_1 \quad (1-8)$$

式中  $u = x_2/\lambda f$ ,  $v = y_2/\lambda f$  为平面  $P_2$  的空间频率坐标,  $\lambda$  为照射光波的波长,  $f$  为变换透镜  $L$  的焦距。

可见透镜  $L$  后焦面上的复振幅分布正比于输入物体的傅里叶变换, 由于变换式前的二次相位因子存在, 使物体的频谱产生一个相位弯曲。当物体位于透镜的前焦面时, 即  $d_0 = f$ , 则(1-7a)式变为

$$U_f(x_2, y_2) = \frac{1}{j\lambda f} F\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \quad (1-7b)$$

显然这时二次相位因子完全消失, 后焦面上的光场分布是物体准确的里叶变换。当利用透镜对物体进行傅里叶变换运算时, 图 1-1 所示的光正是我们通常所选用的光路。

当然, 无论物体相对于透镜的距离  $d_0$  为何值, 相位弯曲对于后焦面上的强度分布都没有影响, 它仍然是物体的傅里叶变换功率谱。

用 MATLAB 仿真几个典型的傅里叶变换对图像

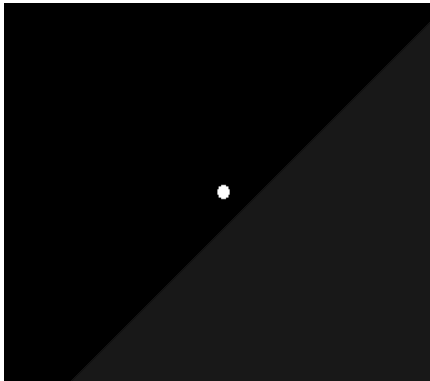


图 1-2-1 SLM 上加载的图像

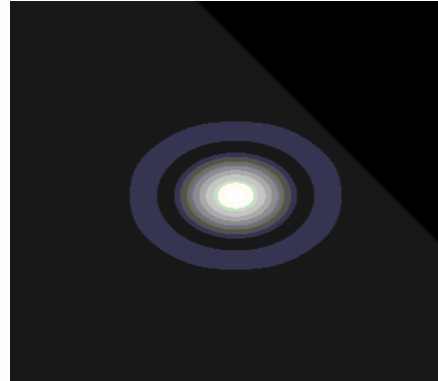


图 1-2-2 傅里叶变换后的频谱图

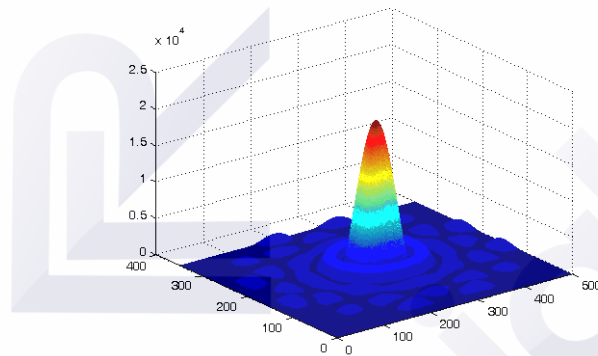


图 1-2-3 三维功率分布图

图 1-2 圆孔仿真效果



图 1-3-1 SLM 上加载的图像



图 1-3-2 傅里叶变换后的频谱图

图 1-3 纵向双缝仿真效果

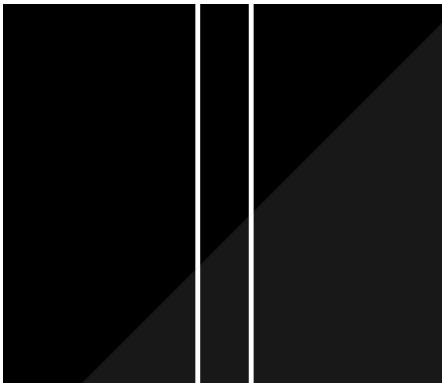


图 1-4-1 SLM 上加载的图像

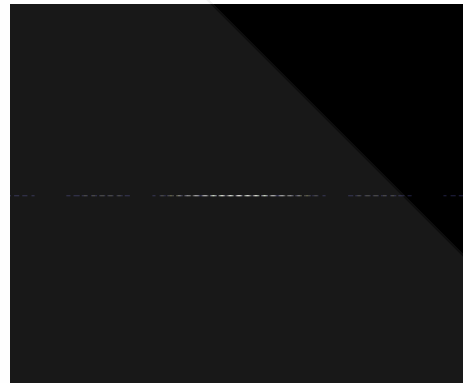


图 1-4-2 傅里叶变换后的频谱图

图 1-4 横向双缝仿真效果



图 1-5-1 SLM 上加载的图像

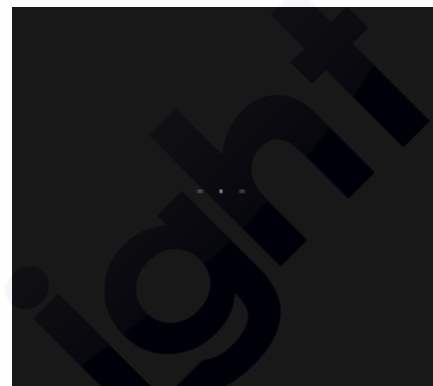


图 1-5-2 傅里叶变换后的频谱图

图 1-5 正弦仿真效果

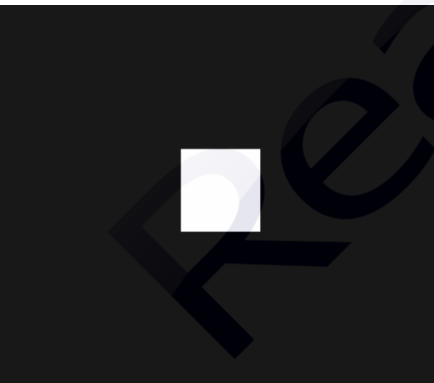


图 1-6-1 SLM 上加载的图像

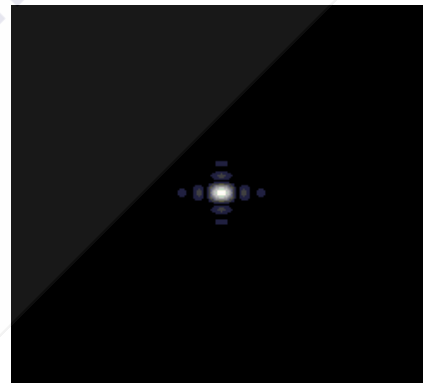


图 1-6-2 傅里叶变换后的频谱图

图 1-6 方孔仿真效果

### 空间光调制器(SLM)在信息光学中的应用

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。

空间光调制器有反应快，应用方向高等优势，本次实验中，利用一款透射式空间光调制器替代了传统的光栅、光刻板等，学生可利用软件加载不同图像到 SLM，观察效果。空间光调制器应用很广泛，可应用于多个实验，一些很贵重的透镜等都可用 SLM 替代，它是现代信息光学实验中重要的器件。

### 1.3 实验仪器

He-Ne 激光器、可调光阑、CMOS 数字相机、空间光调制器、空间滤波器、可调衰减片、透镜、计算机、傅里叶变换相关图像识别实验软件

### 1.4 实验步骤

本实验要求：观察加载不同图像后的傅里叶变换图，与仿真图像比较，掌握傅里叶变换的原理。

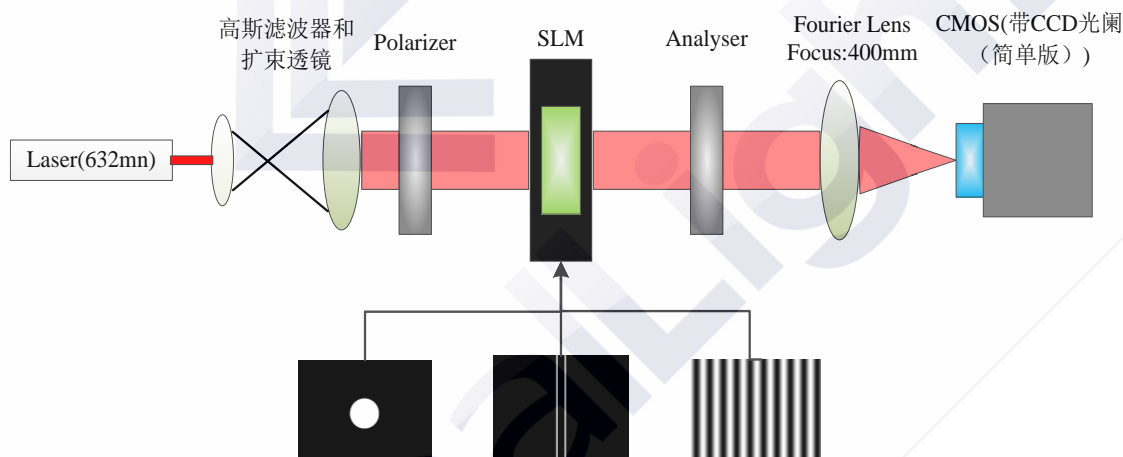


图 1-7

步骤 1、按照“二维线性系统傅里叶分析实验”安装实验设备。调整激光管夹持器水平，固定可变光阑的高度和孔径，使出射光在近处和远处都能通过可变光阑（注：固定可变光阑高度，此可变光阑将在以下实验步骤中作为光路调整高度标尺）。

步骤 2、调整所有元件(空间滤波器、透镜、目标物、CMOS 相机等等)的高度，使它们的中心与激光光束同轴。

步骤 3、加入空间滤波器，使用可变光阑作为高度标尺，调整空间滤波器的高度（不加针孔），使得激光通过显微物镜后的扩束光斑中心与可变光阑中心重合，此时锁定空间滤波器高度，及平移台水平移动旋钮；加入针孔，旋转螺纹付推动物镜靠近针孔，在此过程中不断调整针孔位置旋钮，保证透过光的光强最大，当透过光无衍射环且光强最强时，空间滤波器调整完毕（注：物镜靠近针孔时，切忌用力旋转螺纹，以免物镜撞到针孔，使针孔堵塞）。

步骤 4、调整准直用的双凸透镜与空间滤波器的距离，使出射光的光斑在近处和远处直径大致相等（注：因为准直透镜的焦距是 150mm，所以该透镜应放在针孔后 150mm

左右的位置)。

步骤 5、起偏器、空间光调制器、检偏器依次放置到准直透镜后端，调整这三个器件高度与激光光束同轴（注：调节起偏器和检偏器，使出射检偏器的光强最弱，此时空间光调制器为振幅调制状态）。

步骤 6、放置 CMOS 相机在傅里叶透镜的后焦面上（注：傅里叶变换透镜的焦距为 400mm，所以应将相机与傅里叶变换透镜距离调至 400mm）。微调傅里叶透镜下的 X 向滑块，使傅里叶透镜焦点正处于 CMOS 相机的采集靶面。

步骤 7、打开联合识别软件，点击“二维傅里叶分析”，选择实验模块区下的“圆孔”，在“圆孔半径”像素或毫米内输入想要的尺寸，（注：圆孔尺寸在 25~40 像素之间效果最佳），点击绘图，即可在左端绘制出对应的圆孔。点击“输出 SLM”。

步骤 8、重复步骤 7 的操作，分别选择“方孔”“双缝”“正弦”，观察结果。其中方孔可以自由选择产生方形孔或者矩形孔。双缝可以选择水平或垂直方向。以观察不同结果。

## 实验 2 基于傅里叶变换的光学相关器实验

### 2.1 实验目的

1. 了解联合傅里叶变换在光学上的实现及有关效应；
2. 了解传统光学傅里叶联合变换相关原理；
3. 掌握光学傅里叶联合变换相关仿真；
4. 掌握现代光学傅里叶联合变换相关方法。

### 2.2 基本原理

#### 互相关

两个函数  $f(x, y)$  和  $g(x, y)$  的互相关的定义为含参变量的无穷积分

$$R_{fg}(x, y) = \int \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\alpha - x, \beta - y)g(\alpha, \beta)d\alpha d\beta = f(x, y) \star g(x, y) \quad (2-1a)$$

或

$$R_{gf}(x, y) = \int \int_{-\infty}^{\infty} g^*(\alpha - x, \beta - y)f(\alpha, \beta)d\alpha d\beta = g(x, y) \star f(x, y) \quad (2-1b)$$

式中, \*代表函数的复共轭,  $\star$  代表相关运算。

互相关是两个信号间存在多少相似性或关联性的量度。两个完全不同的、毫无联系的信号, 对所有的位置, 他们的互相关值为零。如果两个信号由于某种物理上的联系在一些部位存在相似性, 则在相应位置上就存在非零相关值。

#### 自相关

当  $f(x, y) = g(x, y)$  时, 即得到函数  $f$  的自相关定义式

$$R_{ff}(x, y) = \int \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\alpha - x, \beta - y)f(\alpha, \beta)d\alpha d\beta = f(x, y) \star f(x, y) \quad (2-2a)$$

和

$$R_{ff}(x, y) = f^*(-x, -y) * f(x, y) \quad (2-2b)$$

上式成为两个相同函数的自相关。自相关是两个相同函数图象重叠的量度。当两个相同函数完全重叠时, 自相关有一极大峰值, 称为自相关峰。由于只有相同函数的图形才能完全重合, 故, 相同函数间的自相关比不同函数间的互相关, 其相关程度要高得多。

#### 相关定理

在连续和离散两种情况下, 下面的相关定理都成立

##### 1) 互相关定理

$FT\{f(x, y)\} = F(u, v), FT\{g(x, y)\} = G(u, v)$ , 则有

$$F\{f(x, y) \star g(x, y)\} = F^*(u, v)G(u, v) \quad (2-3a)$$

式中  $FT\{\bullet\}$  表示傅里叶变换。习惯上人们称  $F^*(u, v)G(u, v)$  为函数  $f(x, y)$   $g(x, y)$  的互谱能量密度或简称互谱密度。因此，互相关定理表明，两个函数的互相关与其互谱密度构成傅里叶变换对。

2) 自相关定理

$FT\{f(x, y)\} = F(u, v)$ ，则有

$$F\{f(x, y) \star f(x, y)\} = |F(u, v)|^2 \quad (2-3b)$$

$|F(u, v)|^2$  称为  $f(x, y)$  的能谱密度。自相关定理表明一个函数的自相关函数与其能谱密度构成傅里叶变换对。

### 联合变换相关识别

联合变换相关方法于 1966 年提出，80 年代后期，由于实时光电转换器件的发展，给这种方法带来新的活力，近年来，有关的研究日趋活跃，联合变换相关器(JTC)已成为模式识别的重要手段。

联合变换先关识别与匹配空间滤波相关识别在原理和方法上存在明显的差异。在这种方法中，参考图像和待识别图像同时置于输入平面上，对称的放在光轴两侧，在傅里叶平面上可以记录下其干涉功率谱。如果对频谱图像进行傅里叶变换，则在输出平面上可以得到自相关和互相关输出，图 2-1 是联合变换相关的原理图。

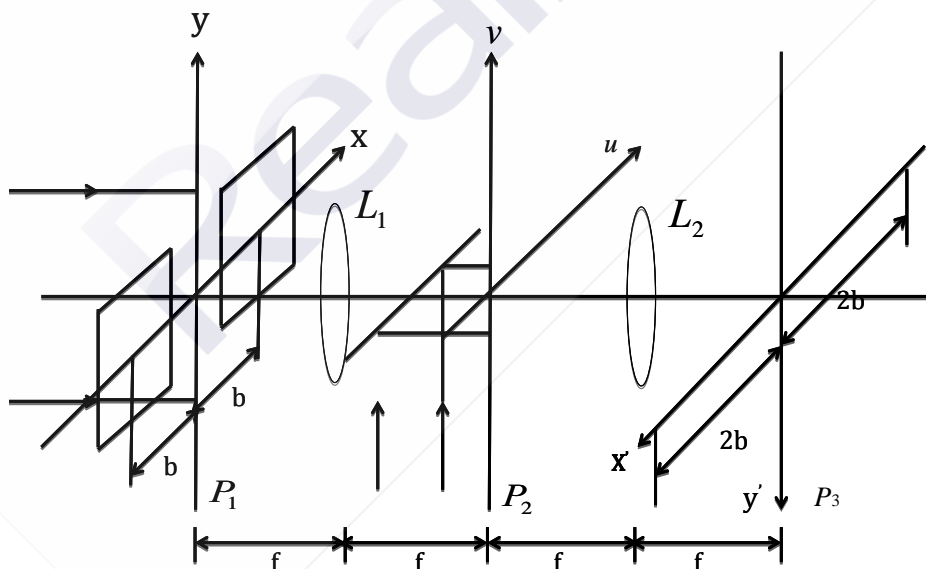


图 2-1 联合相关变换原理

设输入面  $P_1$  上并排放置着目标图像和参考图像  $f(x, y)$  和  $h(x, y)$ ，则输入函数可记为

$$g(x, y) = f(x + b, y) + h(x - b, y) \quad (2-4)$$

经傅里叶透镜  $L_1$  变换后，其联合频谱为

$$G(u, v) = F(u, v) \exp[j2\pi bu] + H(u, v) \exp[-j2\pi bu] \quad (2-5)$$

式中  $G(u, v)$ ， $F(u, v)$ ， $H(u, v)$  分别为  $g(x, y)$ ， $f(x, y)$ ， $h(x, y)$  的傅里叶变换。在  $P_2$  平面上的记录介质，例如全息干板，在本实验中创新性的利用了空间光调制器（SLM）代替了全息干板。它作为振幅调制器件，仅对光强有响应，则

$$|G(u, v)|^2 = |F(u, v)|^2 + |H(u, v)|^2 + F^*(u, v)H(u, v) \exp(-j4\pi bu) + F(u, v)H^*(u, v) \exp(j4\pi bu) \quad (2-6)$$

在空间光调制器处于纯振幅调制状态下，并忽略透过率函数中的均匀偏置和比例系数，用单位振幅的平面波读出，则经  $L_2$  的逆傅里叶变换后，在输出平面  $P_3$  得到

$$g'(x', y') = f(x', y') \star f(x', y') + h(x', y') \star h(x', y') + f(x', y') \star h(x', y') * \delta(x' - 2b, y') + h(x', y') \star f(x', y') * \delta(x' + 2b, y') \quad (2-7)$$

式中，符号  $\star$  表示相关运算， $*$  表示卷积预算。前两项表示  $f(x', y')$  和  $h(x', y')$  的分别自相关运算，位于输出平面中心；后两项表示  $f(x', y')$  和  $h(x', y')$  的互相关，其中心位于  $(x' = \pm 2b, y' = 0)$  处，因此，该实验结果为：如果目标图像  $f(x, y)$  和参考图像  $h(x, y)$  越相似，一级谱就越明显；反则，一级谱越弱。

### 2.3 实验仪器

氦氖激光器、导轨(1.2M)及调整组件、目标物(胶片或玻璃镀铬光刻板)透镜(150mm 准直透镜×1, 400mm 傅里叶透镜×1)、空间光调制器、偏振片×2、CMOS 相机、傅里叶变换相关图像识别实验软件

### 2.4 实验步骤

#### 傅里叶联合变换相关实验

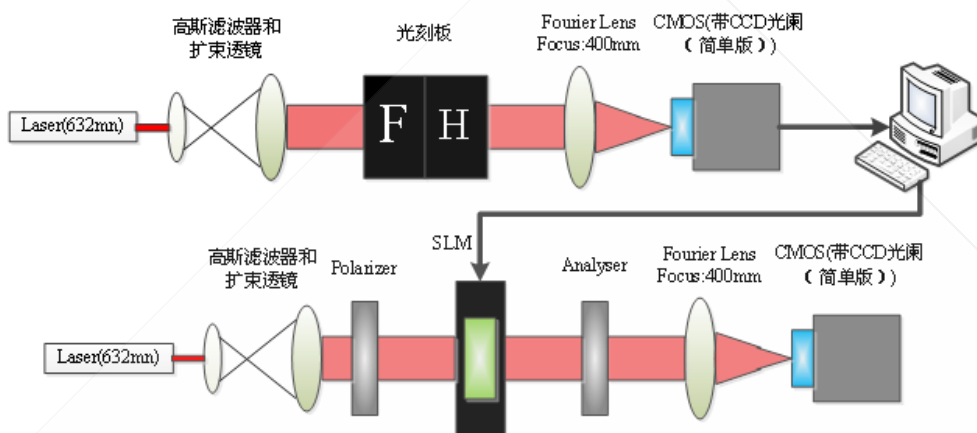


图 2-2

### 软件模拟傅里叶相关图像识别

步骤 1、打开傅里叶变换相关识别软件，点击左侧“JTC 仿真”，分别输入目标图和对比图，调整目标图和对比图的位置，（图片的不同位置会对应不同位置的相关峰）。

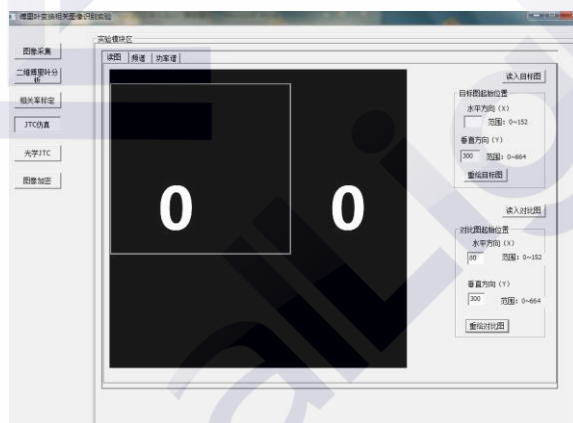


图 2-3 JTC 仿真实验读图

步骤 2、选择实验模块区下面的“频谱”，点击计算频谱，数秒后软件将自动计算出两图片的频谱图。

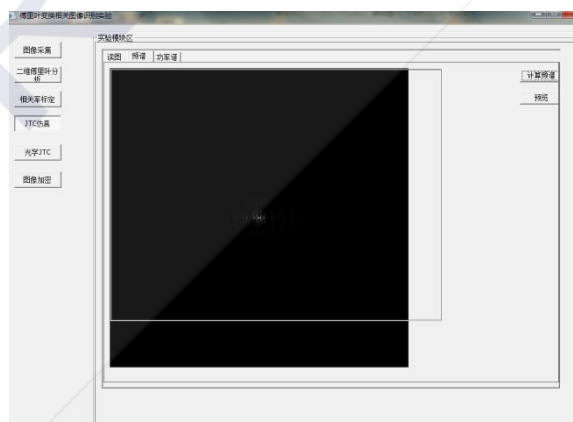


图 2-4 JTC 仿真实验频谱

步骤 3、选择实验模块区下面的“求相关峰”，即可得到两图片识别的相关峰。通过滤除零级峰还可改变两个一级峰的亮度。

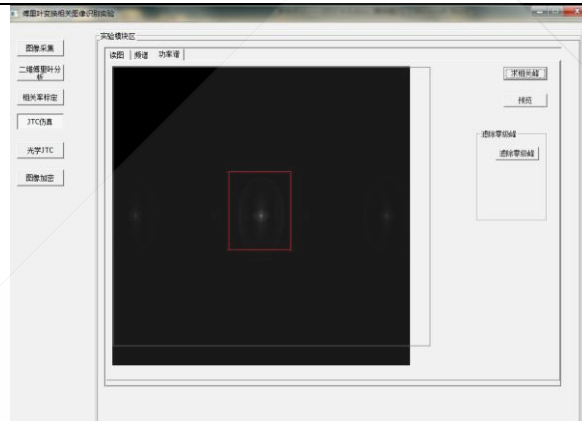


图 2-5 JTC 仿真实验读图求相关峰

### 傅里叶联合变换相关图像识别实验

步骤 1、调整激光管夹持器水平，固定可变光阑的高度和孔径，使出射光在近处和远处都能通过可变光阑（注：固定可变光阑高度，此可变光阑将在以下实验步骤中作为光路调整高度标尺。）

步骤 2、调整所有元件(空间滤波器，透镜，目标物，CMOS 相机等等)的高度，使它们的中心与激光光束同轴。

步骤 3、加入空间滤波器，使用可变光阑作为高度标尺，调整空间滤波器的高度（不加针孔），使得激光通过显微镜后的扩束光斑中心与可变光阑中心重合，此时锁定空间滤波器高度及平移台水平移动旋钮；加入针孔，旋转螺纹付推动物镜靠近针孔，在此过程中不断调整针孔位置旋钮，保证透过光的光强最大，当透过光无衍射环且光强最强时，空间滤波器调整完毕。

步骤 4、调整作为准直用的双凸透镜与空间滤波器的距离，使出射光的光斑在近处和远处直径大致相等。（注：因为准直透镜的焦距是 150mm，所以该透镜应放在针孔后 150mm 左右的位置）。

步骤 5、在准直透镜后端放置待识别的目标物（刻有不同图案的光刻板），将可变光阑插入到准直透镜与目标物中间，调整可变光阑大小，使激光光束能完全照射到目标物表面。

步骤 6、调节 CMOS 相机采集靶面在傅里叶透镜的后焦面上，并将 CMOS 相机与电脑连接，打开联合识别软件，点击“图像采集”，此时即可观察到两个目标物经过傅里叶变换的功率谱。在“分辨率设置”下选择“1024×768”，点击“停止采集”，“保存图像”。

（注：傅里叶变换透镜的焦距为 400mm，所以应将相机与傅里叶变换透镜距离调至 400mm）。

步骤 7、点击傅里叶变换相关识别实验软件的“光学 JTC”，在实验模块区的选择“频谱”，点击右侧的“读入频谱”，读取刚刚采集到的频谱图，然后点击“输出 SLM”。这时在相机采集程序里选择采集图像，即可观察到目标图案的相关峰。将此时的相关峰图，保存为 1280×1024 大小的图像。

步骤 8、在求相关峰中，点击“求相关峰”，读入刚才采集到的功率谱相关峰的图。

由于一般能量集中在零级峰上，可以通过点击“滤除零级峰”，然后在图像上划出需要滤除的零级峰区域。从而提高正负一级峰的对比度。

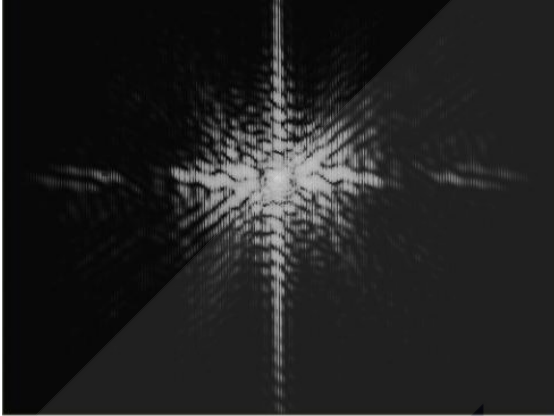


图 2-6 汉字“光”和“光”的功率谱

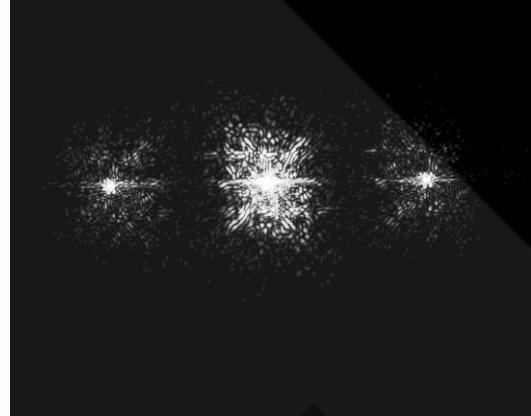


图 2-7 汉字“光”和“光”的相关峰



### 实验 3 傅里叶光学在光学图像加密的应用实验

#### 3.1 实验目的

1. 掌握双随机位相编码加解密技术原理；
2. 了解傅里叶光学原理在信息加密的应用；
3. 了解信息安全技术。

#### 3.2 实验原理

##### 光学图像加密

近十几年来, 光学图像加密技术吸引了很多中外研究者的兴趣. 其中很多算法中用到了随机位相作为密码, 如比较经典的双随机位相编码. 而多图像加密算法是近些年来才出现的一种图像加密方式, 因为它能同时加密多幅图像而得到人们的关注. 同时这种图像加密方式在信息的安全快速传输方面具有潜在的应用. 本实验采用了一种双图像加密算法, 其原理是把两幅原始图像作为加密系统输入复函数的振幅和相位分布函数进行图像编码, 然后对输入复函数进行随机分数傅里叶变换得到一个频域的复函数分布, 分离出振幅作为加密图像而相应的位相部分则作为加密算法的密码。

##### 双随机位相编码原理

分数傅里叶变换定义为

$$\begin{aligned}
 F^P[f(x, y)] &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) B(x, y; \alpha, \beta; P) dx B(x, y; \alpha, \beta; P) \\
 &= C_p \exp\{i\pi[(x^2 + y^2 + \alpha^2 + \beta^2) \cot \alpha - 2(x\alpha + y\beta) \csc \alpha]\}
 \end{aligned}
 \tag{3-1}$$

式中  $P$  为分数傅里叶变换的级次,  $C_p$  为相位常量项,  $\alpha = P\pi/2$  分数傅里叶变换可以通过简单的光学系统实现, 因而在光学信息处理研究中有广泛的应用. 我们所提出的光学图像加密方法是采用分数傅里叶变换替换原系统中的傅里叶变换. 光学实现的简单框图如图 3-1 所示

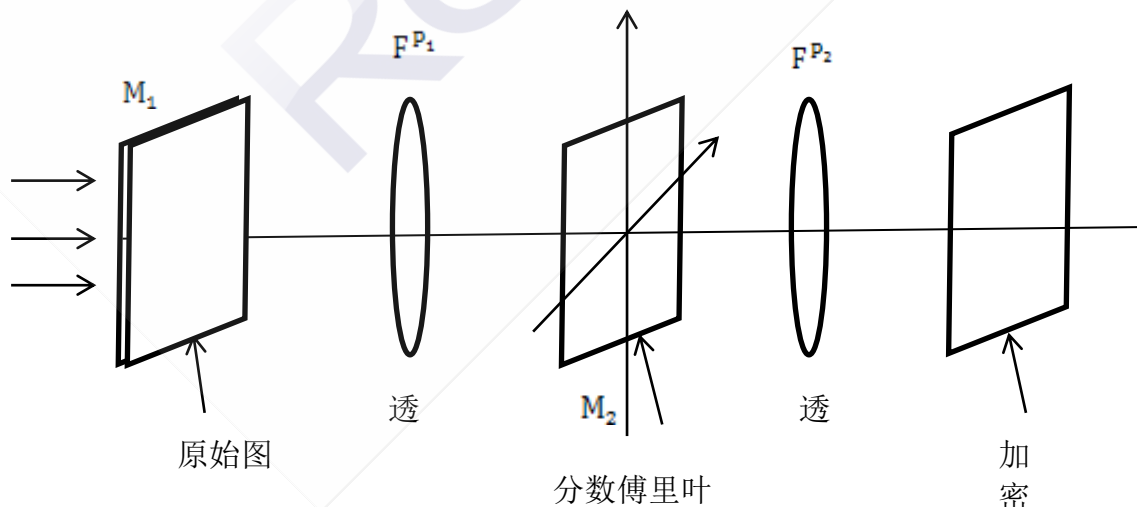


图 3-1 分数傅里叶加密过程

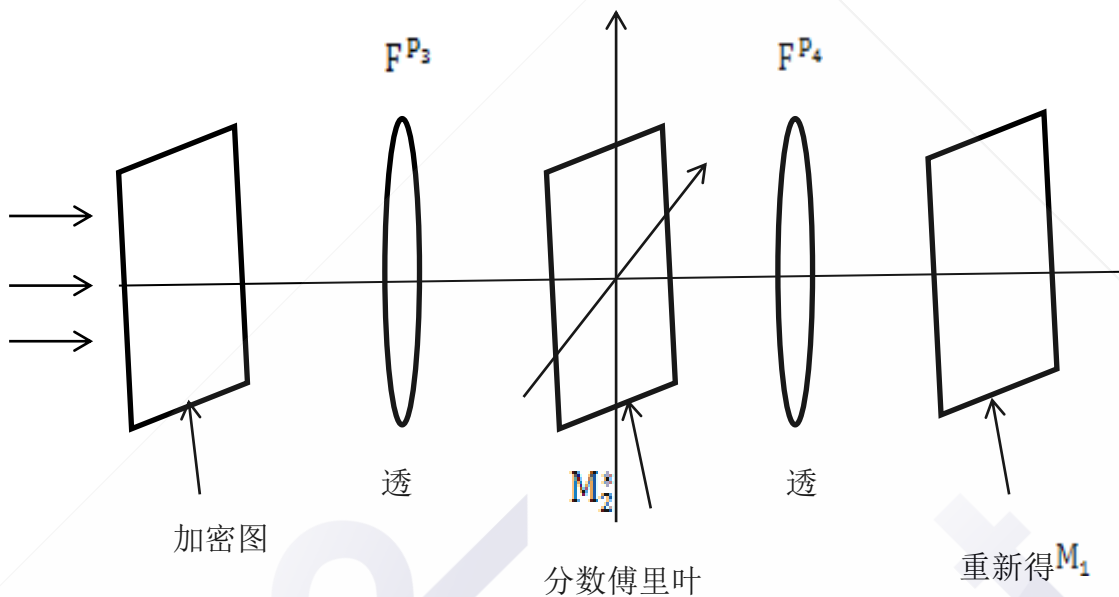


图 3-2 分数傅里叶解密过程

该输入图像函数为  $f(x, y)$ ，两个随机相位掩膜分别是  $M_1 = \exp[in(x, y)]$  和  $M_2 = \exp[ib(\alpha, \beta)]$ ，其中  $n(x, y)$  和  $b(\alpha, \beta)$  分别代表均匀分布在  $[0, 2\pi]$  的独立的白光噪声，这里  $x, y$  代表相应的空间域， $\alpha, \beta$  代表相应的频谱域。

图像的编码在数学上表示为两步操作：首先，用相位掩膜  $M_1$  乘以输入图像函数  $f(x, y)$ ，而后进行级次为  $P_1$  的分数傅里叶变换后乘以随机相位函数  $M_2$  得

$$\phi(\alpha, \beta) = F^{P_1} \{f(x, y) \exp[in(x, y)]\} \cdot \exp[ib(\alpha, \beta)] \quad (3-2)$$

再经级次为  $P_2$  的分数傅里叶变换得

$$\begin{aligned} \phi(x', y') &= F^{P_2} \{\phi(\alpha, \beta)\} \\ &= F^{P_2} \{F^{P_1} \{f(x, y) \exp[in(x, y)]\} \cdot \exp[ib(\alpha, \beta)]\} \end{aligned} \quad (3-3)$$

为了将初始图像  $f(x, y)$  恢复，保密图像  $\phi(x', y')$  需要先进行级次为  $P_3 = -P_2$  的分数傅里叶变换，然后用解码相位掩膜  $M_3 = \exp[-ib(\alpha, \beta)]$  滤波。在数学上表示为

$$F^{P_3} \{\phi(x', y')\} \exp[-ib(\alpha, \beta)] = F^{P_1} \{f(x, y) \exp[in(x, y)]\} \quad (3-4)$$

再次进行级次为  $P_4 = -P_1$  分数傅里叶变换以后，从而在输出面上  $f(x, y) \exp[in(x, y)]$  被恢复。如果  $f(x, y)$  为复函数，则完全恢复  $f(x, y)$  还学要用  $M_4 = \exp[-in(x, y)]$  来消除随机相位的影响。但如果  $f(x, y)$  为正的实函数，相位函数  $\exp[in(x, y)]$  可以通过光强敏感的探测器消除。

$$F^{P_4} \{F^{P_3} \{F^{P_1} \{f(x, y) \exp[in(x, y)]\}\} \exp[-ib(\alpha, \beta)]\} = f(x, y) \exp[in(x, y)] \quad (3-5)$$

当  $P_1 = 1, P_2 = -1$  时，基于分数傅里叶变换的双相位编码就变成了传统的双相位编码。

### 加密过程（效果图）

如图 3-3 所示，表示的是 4f 系统的双随机相位编码光学加密系统。读入预定加密目标图，以相位方式乘上随机噪声（密钥一），经过傅里叶变换，得到频谱信息，在频域上以相位方式乘上另一随机噪声（密钥二），经过傅里叶逆变化，得到密文。此时密文含有目标图和两次密钥的信息。此密文可以分别以振幅和相角两个数据分别保存传输。

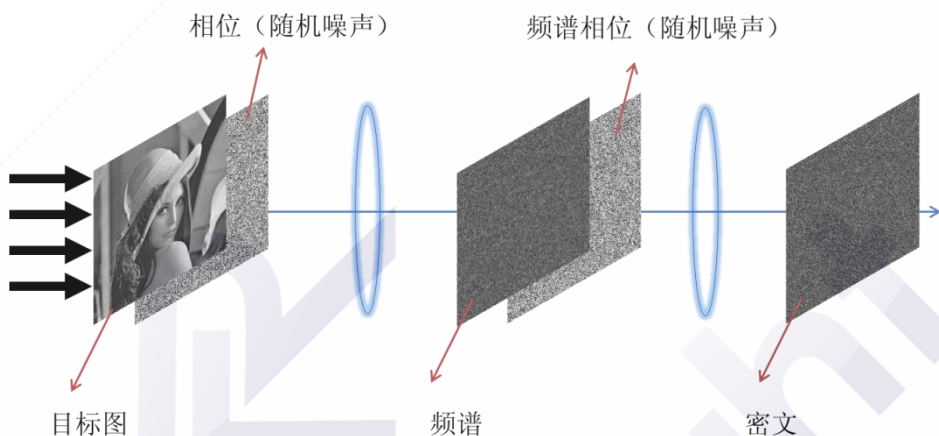


图 3-3 加密过程

### 解密过程（效果图）

如图 3-4 所示，解密过程与加密为互逆过程。将完整的密文信息（振幅和相位）进行傅里叶变换，得到的密文频谱，乘上对应的频谱相位（密钥二的复共轭），然后进行逆傅里叶变换，最终得到的振幅为目标图。若没有正确的密钥二，则无法正确解密得到目标图。

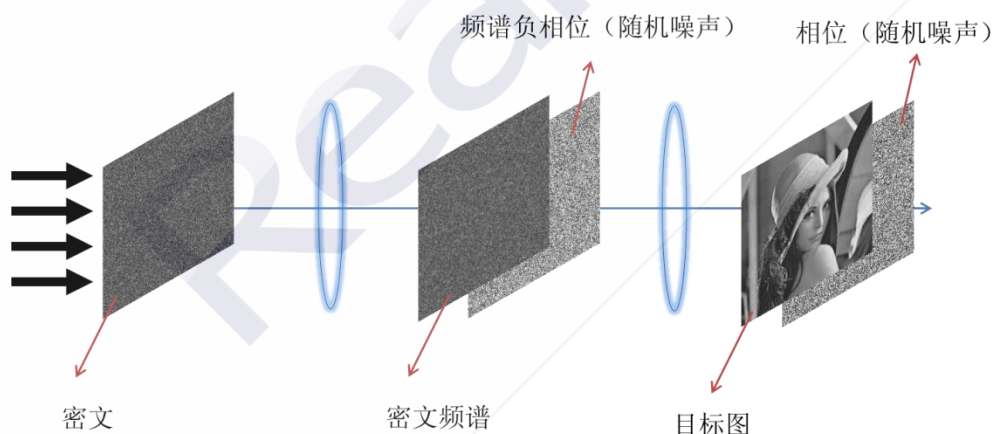


图 3-4 解密过程

### 3.3 实验仪器

电脑主机及显示器一套、傅里叶变换相关图像识别实验软件

### 3.4 实验步骤

步骤 1、打开图像加密选项。进入图像加密分实验中。

步骤 2、打开加密选项卡。进入加密实验。软件界面中，上方为光学加密的光路的

示意图，下方为不同区域光场显示的图像。

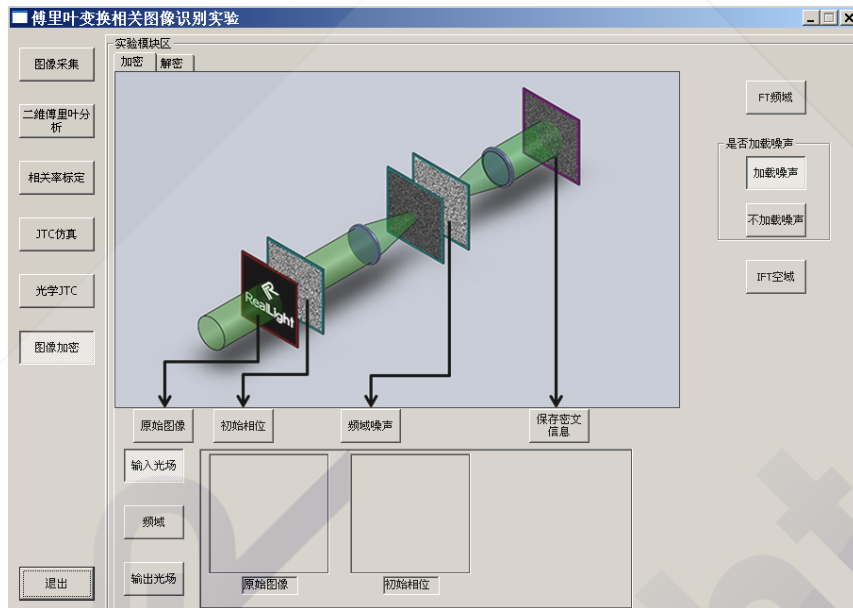


图 3-5

步骤 3、依次读入：原始图像、初始相位、频域噪声

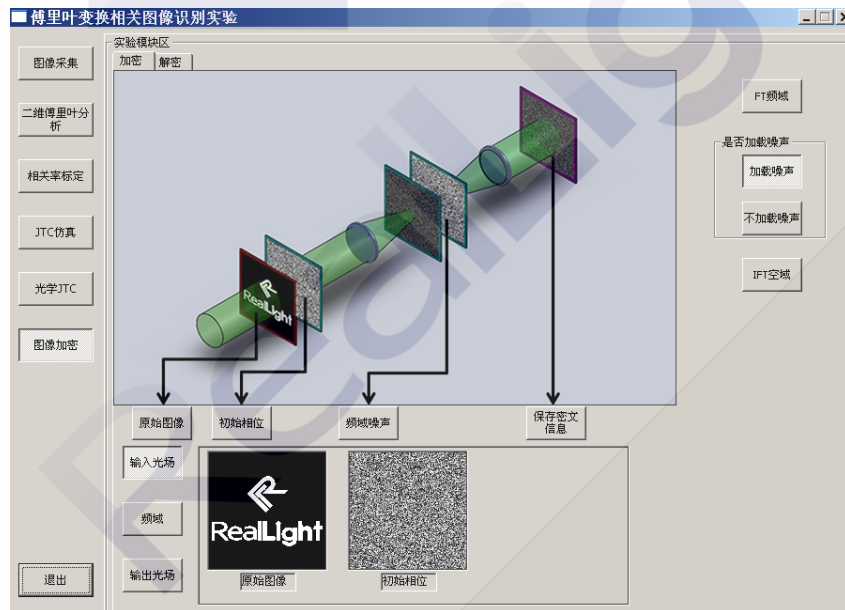


图 3-6

步骤 4、点击“**FT 频域**”进行傅里叶变换，得到频域结果。然后加入频域相位噪声，对图像进一步置乱，加密。

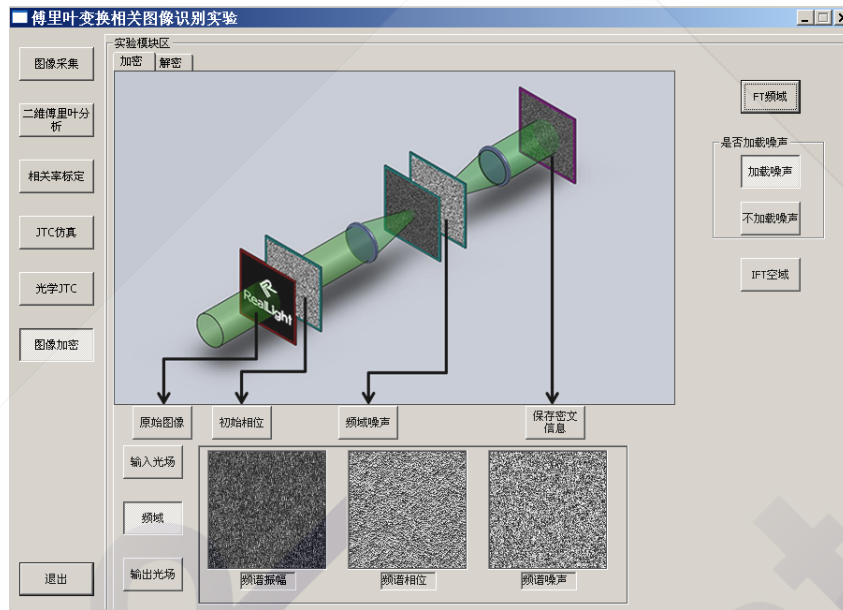


图 3-7

步骤 5、然后点击“IFT 空域”，进行逆傅里叶变换，得到密文信息。点击保存，由于密文为复光场，同时保存密文振幅与密文相位（以相角形式保存）。

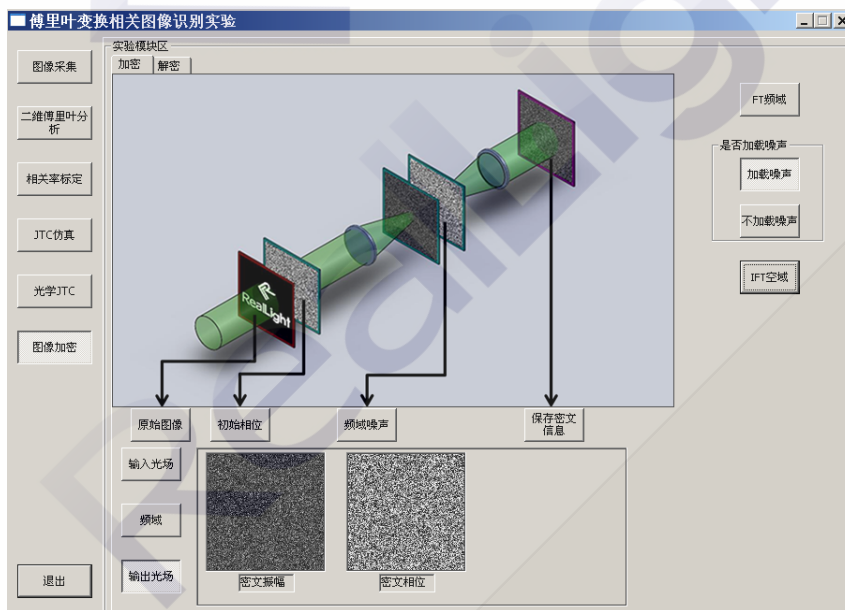


图 3-8

步骤 6、打开解密选项卡，进行解密实验

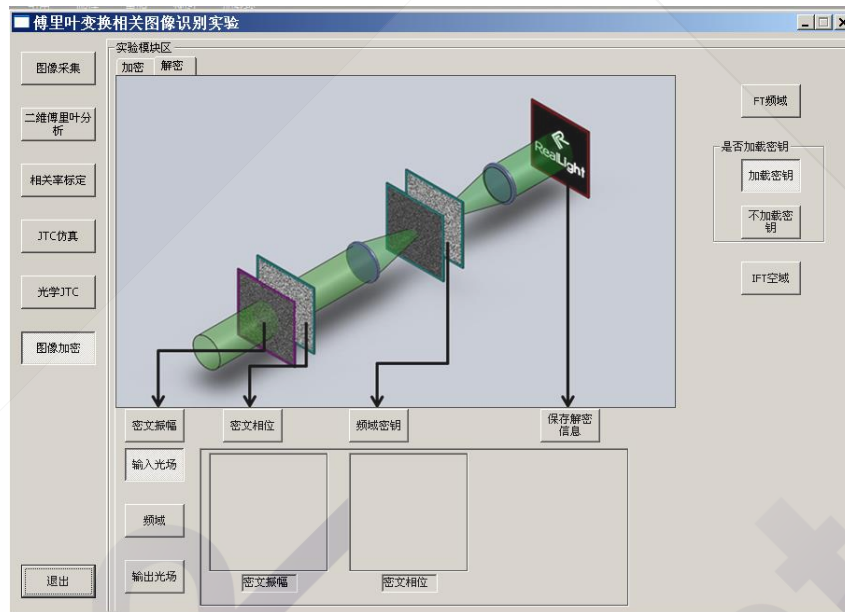


图 3-9

步骤 7、将之前计算得到的密文信息，依次输入。在加密实验中的频域噪声，在解密中充当密钥的功能，作为频域密钥输入。

步骤 8、与加密实验类似，同样进行“FT 频域”计算和“IFT 空域”计算，最终得到正确结果。

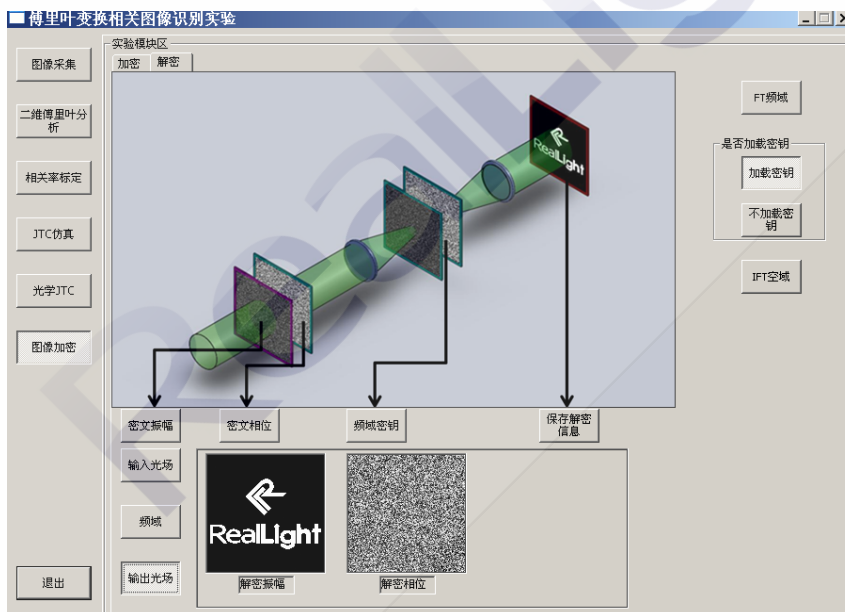


图 3-10

步骤 9、重复整个加密、解密实验，可以在加密或解密中，不加载噪声、密钥，看结果是否相同，也可以选择不同噪声加密。增加学生对双随机相位编码的光学加密知识理解。

## 实验 4 光学相关器信息提取实验

### 4.1 实验目的

1. 了解图像识别原理；
2. 掌握傅里叶光学联合变换相关图像识别原理。

### 4.2 实验原理

光学图像识别是对所有采样点并行处理，并以光速进行傅里叶变换，提高了处理速度。光学图像识别是一门新兴的技术，具有广泛的实际意义和应用前景。光学图像识别的研究发展十分迅速，从较早的匹配滤波器到联合变换相关器(JTC)，从纯光学系统发展到计算机控制的光电混合系统，既有光学的并行处理，大容量和高速度的优点，又有计算机处理的灵活性及可编程性。较早的匹配滤波器要求对于每一幅目标图像，都要在傅里叶谱面事先放置匹配滤波器，这就使得系统不能进行实时处理。正是由于这一最大缺点，使匹配滤波相关向联合变换相关发展。由于联合变换相关不需要事先制作匹配滤波器，对参考图像和目标图像同时进行处理，故系统能实现实时处理。

图像识别是指检测和判断图像中是否包含某一特定信息的图像。例如：从许多指纹中鉴别有无某人的指纹；从许多文字中找出所需的文字；在病理照片中识别出癌变细胞等等。

此实验借助实验二中联合变换相关识别的原理，采用空间光调制器分别作为输入和联合谱记录的实时光学联合变换相关器，用于信息的提取。

### 4.3 实验仪器

氦氛激光器、导轨(1.2M)及调整组件、透镜（150mm 准直透镜×1，400mm 傅里叶透镜×1）、空间光调制器、偏振片×2、CMOS 相机、傅里叶变换相关图像识别实验软件。

### 4.4 实验步骤

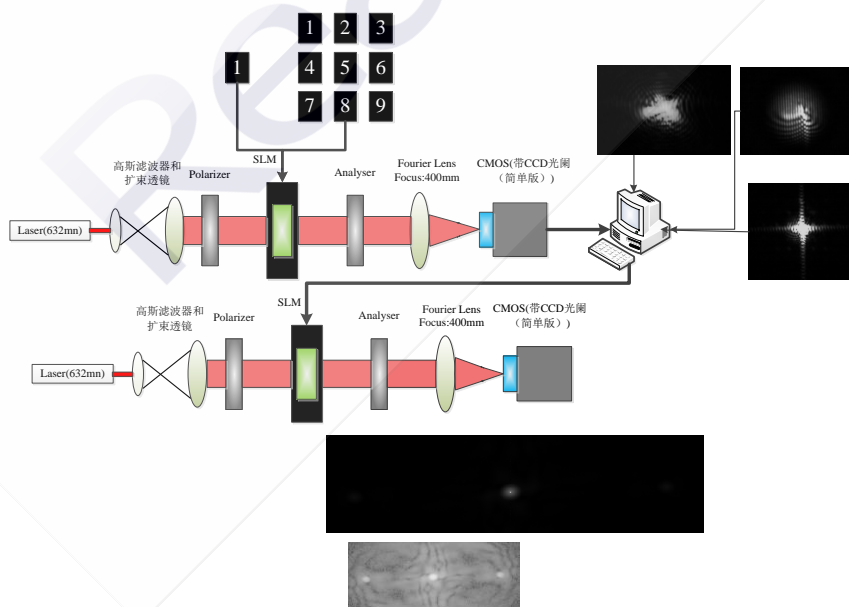


图 4-1

步骤 1、打开傅里叶变换相关图像识别软件，点击相关率标定。分别读入目标图“数

字 1” 和对比图“数字 0~9”，点击“求相关率”，记录下目标图“数字 1” 和对比图“数字 0~9” 之间的相关率数值。

步骤 2、点击“光学 JTC”，选择实验模块区下的“读图”，目标图的位置读入图片“1”，分别在对比图的位置读入图片“1”，修改目标图起始位置的水平和垂直方向，使激光光束通过空间光调制器时能完全照射到目标图和对比图上（注：A 图水平方向 100 像素垂直方向为 300 像素，B 图水平方向为 0 像素，垂直方向为 300 像素时，可以出现最佳效果，调整以后需再点击输出 SLM）。

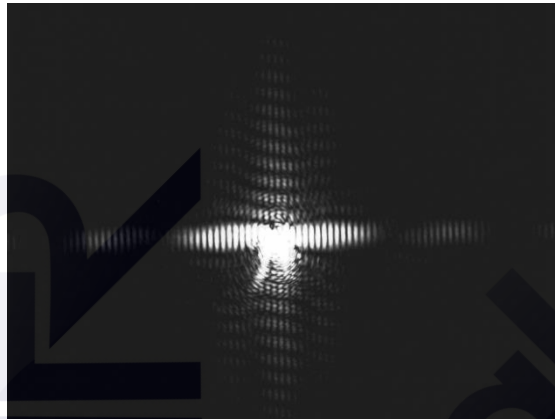


图 4-2

步骤 3、点击“采集图像”，在相机采集程序中选择“采集图像”，这时即可观察到两图像的频谱图，在“分辨率设置”下选择“1024×768”，点击保存图像。

步骤 4、在傅里叶变换相关图像识别的“光学 JTC” 模块下选择实验模块区下的“频谱”，点击输入频谱，在图像模块区看到频谱后，点击输出 SLM。

步骤 5、这时通过图像采集软件即可观察到两图像的相关峰。选择全屏模式，保存图片（注：求解相关峰时只能输入 1280×1024 的图片）。

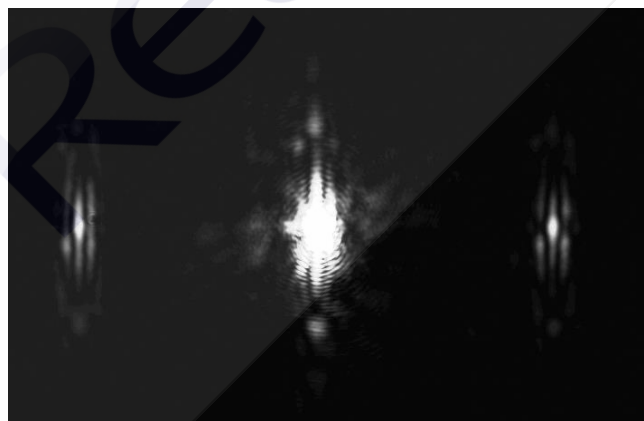


图 4-3



图像	标定相关率	实际光学一级峰均值
对比图 1		
对比图 0		
对比图 2		
对比图 3		
对比图 4		
对比图 5		
对比图 6		
对比图 7		
对比图 8		
对比图 9		

## 参考文献

- [1] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 104-127.
- [2] 贺顺忠. 工程光学实验教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 183-188.
- [3] 宋菲君, S. Jutamulia, 近代光学信息处理, 北京大学物理学丛书, 2001.
- [4] 苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科技出版社, 1999.

