

信息光学实验

实验1 透镜的 FT 性质及图形的光学频谱分析

一、实验目的

1. 了解透镜对入射波前的相位调制原理。
2. 加深对透镜复振幅传递函数透过率物理意义的认识。
3. 应用光学频谱分析系统观察常见图形的傅里叶 (FT) 频谱, 加深空间频率域的概念。

二、实验原理

理论基础: 波动方程、复振幅、光学传递函数。

透镜由于本身厚度变化, 使得入射光在通过透镜时, 各处走过的光程不同, 即所受时间延迟不同, 因而具有位相调制能力, 下图为简化分析, 假设任意点入射的光线在透镜中的传播距离等于该点沿光轴方向的透镜的厚度, 并忽略光强损失, 即通过透镜的光波振幅分布不变, 仅产生大小正比于透镜各点厚度的位相变化, 透镜传递函数记为:

$$t(x, y) = \exp[j\Phi(x, y)] \quad (1)$$

$$\Phi(x, y) = kL(x, y)$$

$L(x, y)$: 表示光程 MN

$$L(x, y) = nD(x, y) + [D_0 - D(x, y)] \quad (2)$$

D_0 : 透镜中心厚度。

D : 透镜厚度。

n : 透镜折射率。

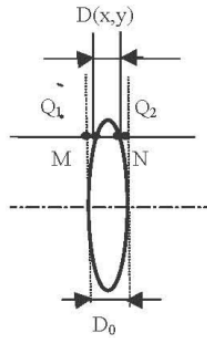


图1 透镜相位变换原理图

可见只要知道透镜厚度函数 $D(x, y)$ 可得出其位相调制, 在球面透镜傍轴区域, 用抛物面近似球面, 可得到球面透镜的厚度函数:

$$D(x, y) = D_0 - \frac{1}{2}(x^2 + y^2) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3)$$

R_1, R_2 : 构成透镜的两个球面的曲率半径。

$$t(x, y) = \exp(jknD_0) \cdot \exp \left[-jk(n-1) \frac{1}{2}(x^2 + y^2) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \right] \quad (4)$$

引入焦距 f , 其定义式为 $\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$ 代入 (4) 得:

$$t(x, y) = \exp(jknD_0) \exp \left[-j \frac{k}{2f} (x^2 + y^2) \right]$$

此即透镜位相调制的表达式。第一项位相因子仅表示透镜对于入射光波的常量位相延迟，不影响位相的空间分布，即波面形状。第二项起调制作用的因子，它表明光波通过透镜时的位相延迟与该点到透镜中心的距离平方成正比。而且与透镜的焦距有关，其物理意义在于，当入射光波 $u_i(x, y) = 1$ 时，略去透镜的常量值相位延迟后，紧靠透镜之后的平面上复振幅分布为 $u'(x, y) = u(x, y) \cdot t(x, y) = \exp\left[-j\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right]$

傍轴近似下，这是一个球面波。对于正透镜 $t > 0$ ，这是一个向透镜后方距离 f 处的F会聚的球面波。对于负透镜 $f < 0$ ，这是一个由透镜前方距离 $|f|$ 处的虚焦点F发散的球面波。可见波面的变化，正是透镜具有 $\exp\left[-j\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right]$ 的位相因子。当然，在非傍轴条件下，会有波像差。考虑透镜孔径后，

$$t(x, y) = \exp\left[-j\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right] \cdot p(x, y)$$

$p(x, y)$ 为透镜的光瞳函数

$$p(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{孔径内} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

三、实验光路

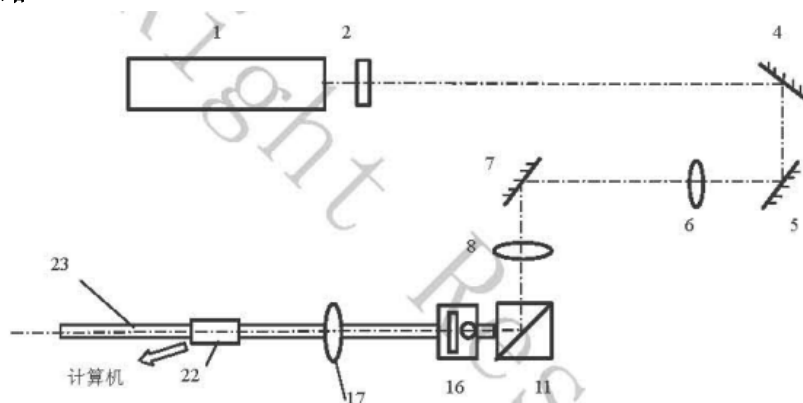


图2 实验光路图

四、实验步骤

1. 扩束
2. 在试件夹 16 中装入任一件 FT 试件
3. 在 FT 透镜 17 的焦面附近移动 CCD22，使成像清晰，锁定 22
4. 切换 FT 试件（微孔系列，口孔形波片，网状波片或光栅波片），观测频谱，记录频谱图。

FT 试件	频谱图

五、回答下列问题

1. 光学 FT 的特点是什么？
2. 光学 FT 有什么应用领域？

实验 24f 光学系统 FT 及 IFT 系统

1、实验目的

1. 进一步掌握透镜的 FT 性质，学习 FT 光路的原理；
2. 应用 4f 光学 FT 系统观察常见图样的反傅氏变换（IFT）图像，并与 FT 频谱的试件图样比较；
3. 观察渐晕效应。

2、实验原理

理论基础：衍射理论，角谱理论

透镜之所以能够做 FT，根本原因在于透镜的二次位相因子对入射波前起到位相调制作用。若以透镜后焦面为观察平面，物体相对于会聚透镜 d_0 发生变化时，可以研究透镜的 FT 性质。

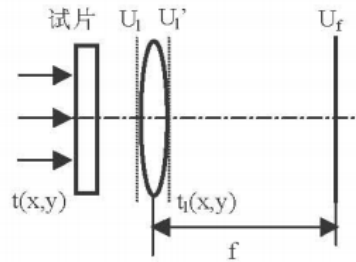


图 1

图 1 表示物体紧靠透镜旋转 FT 逃跑，物体指透射型薄平面试片。采用振幅 A 的单色平面波照明，为求出透镜后焦面上的光强分布 U_f ，须逐面求出透镜前后平面光场分布 U_l 、 U_l' （指 lens）设物体的复振幅透过率 $t(x, y)$ ，则有

$$U_l(x, y) = A \cdot t(x, y) \quad (1)$$

不计透镜孔径作用，透镜的复振幅透过率

$$t_l(x, y) = \exp \left[-j \frac{k}{2f} (x^2 + y^2) \right] \quad (2)$$

$$\text{那么 } U_l'(x, y) = U_l(x, y) \cdot t_l(x, y) \quad (3)$$

光波从透镜传播 f 距离后，根据菲涅尔衍射公式

$$U_f(x_f, y_f) = \frac{1}{j\pi f} \exp \left[j \frac{k}{2f} (x^2 + y^2) \right] \times \mathfrak{F} \left\{ U_l'(x, y) \exp \left[j \frac{k}{2f} (x^2 + y^2) \right] \right\} \quad (4)$$

式中 $f_x = \frac{x_f}{f}$ ， $f_y = \frac{y_f}{f}$ ，不计常量相位因子

将 1，2，4 式代入 3 式，得

$$u_f(x_f, y_f) = \frac{A}{j\lambda f} \exp \left[j \frac{k}{2f} (x^2 + y^2) \right] \cdot T \left(\frac{x_f}{\lambda f}, \frac{y_f}{\lambda f} \right) \quad (5)$$

式中 $T(f_x, f_y) = \mathfrak{F}\{f(x, y)\}$

式 5 表明，透镜后焦面上的光场分布正比于物体的 FT，其频率取值后焦面坐标，其值是 $f_x = \frac{x_f}{\lambda f}$ ， $f_y = \frac{y_f}{\lambda f}$ 。

当然，由于变换式前存在位相因子 $\exp \left[j \frac{k}{2f} (x^2 + y^2) \right]$ ，后焦面上的位相分布与物体频谱的位相分布并不相同。但对光强响应型光电转换显示器件及目视效果来说，这一位相弯曲

并无影响，所以 $I_f(x_f, y_f) = \left(\frac{A}{\lambda f}\right)^2 T\left(\frac{x_f}{\lambda f}, \frac{y_f}{\lambda f}\right)$ 的物理意义在于其后焦面上光强分布，恰恰是物体的功率谱。

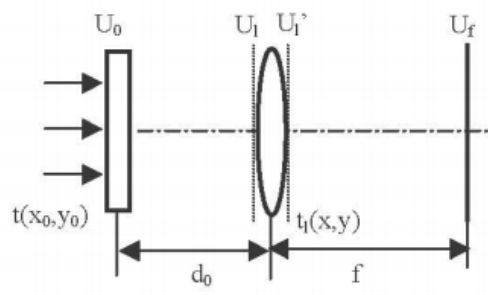


图 2

图 2 表示物体放置在透镜前方 d_0 距离，可推得

$$U_f(x_f, y_f) = \frac{A}{j\lambda f} \exp\left[j\frac{k}{2f}\left(1 - \frac{d_0}{f}\right)(x^2 + y^2)\right] \cdot T\left(\frac{x_f}{\lambda f} + \frac{y_f}{\lambda f}\right) \quad (6)$$

可见后焦面上的复振幅分布仍然正比于物体 FT。而变换式前面的二次位相因子使物体频谱产生一个位相弯曲。

当 $d_0 = 0$ 时，公式 (6) 与图 1 情况完全一致，

$$\text{当 } d_0 = f \text{ 时，公式 (6) 变为 } U_f(x_f, y_f) = \frac{A}{j\lambda f} \cdot T\left(\frac{x_f}{\lambda f} + \frac{y_f}{\lambda f}\right)$$

此时，位相弯曲效应消失，后焦面上光场分布是物体准确的 FT。这正是我们所用的 FT 运算光路。

物体旋转在透镜后方，后焦面上仍然得到到物体的 F 和（相差一个二次位相因子）。当 $d = f$ 时，即物体紧靠透镜后表面时，与紧靠透镜前方旋转效果一样。

若需要对所得的物体频谱 $T\left(\frac{x_f}{\lambda f} + \frac{y_f}{\lambda f}\right)$ 利用透镜再作一次变换，例如物体频谱位于透镜前焦面，观察平面选在透镜后焦面，即 x', y' 平面。透镜焦距不变。略去常系数，可以得到

$$U(x', y') = \iint T\left(\frac{x_f}{\lambda f} + \frac{y_f}{\lambda f}\right) \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda f}(x_f x' + y_f y')\right] dx_f dy_f = Ct(-x', -y') \quad (7)$$

式中，C 为常数。于是连续两次变换的结果是在空间域还原一个物体，它是原物体的一个倒像。如果采用反射坐标系，即令 $x'' = -x$ ， $y'' = -y$ ，则

$$U(x'', y'') = Ct(x'', y'') \quad (8)$$

此时，透镜的作用可看作是实现了对物体频谱的傅里叶反变换（IFT）。

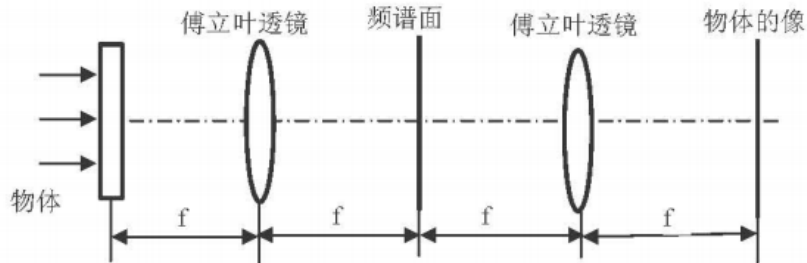
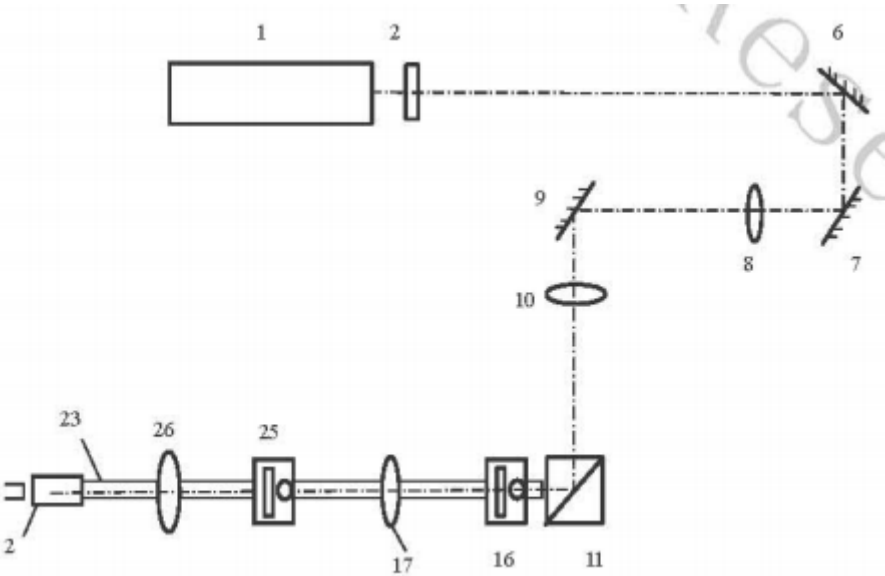


图 3

图 3 所示为 $4f$ 系统原理图，物体经过第一傅立叶透镜后，在傅立叶透镜后焦面上形成物体的频谱，物体的频谱经过在距频谱面 f 距离的位置放置第二个傅立叶透镜后，经过逆傅立叶变换，在第二个傅立叶透镜的后焦面上就可以得到物体相同大小的像。

必须指出的是，当点光源位于有限距离，即采用球面波照明方式，透镜仍然可起 FT 作用，频谱面位于光源的像面位置，而不再后焦面上。另外，透镜孔径对 FT 变换有影响。原因是参与变换的频率成分有滤波作用，通低频，阻高频，产生渐晕效应。孔径越大，越靠近物体，渐晕效应小。

三、实验光路



四、实验步骤

1. 扩束
2. 在试件夹 16 中装入任一件 FT 试件
3. 在 FT 透镜 26 的焦面附近移动 CCD，使成像清晰，锁定 22，同时锁定 7
4. 在试件夹 25 上装入图像处理试片（IFT 不需装试片），微调 FT 透镜 17，观测计算机上 IFT 的图像和图像处理效果。
5. 切换图像处理试件，观测计算机上不同的图像处理效果。
6. 记录 IFT 图像，结合实验结果，整理出试件图样、FT 图、滤波等处理效果图

五、实验记录

FT 图形	IFT 图形

实验 3 图像信息处理的光学实现

一、实验目的：

1. 利用 4f 光学系统进行频谱分析和滤波
2. 利用 4f 光学系统对图形图像信息调制*
3. 利用 4f 光学系统进行模式识别*
4. 利用 4f 光学系统进行图像消模糊

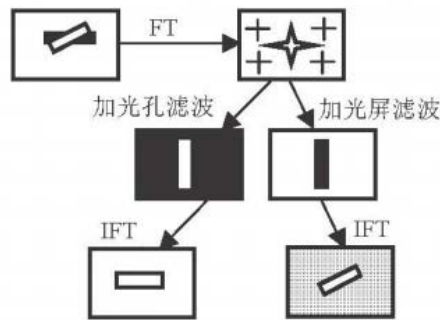


图 1 图像信息处理原理图

二、实验原理：

大多数光学系统都是线性系统，即系统传递函数具有线性。利用这一性质，可以对透镜焦平面上形成的光分布进行简单操作，取舍分离，而实现滤波和选择性滤波。

选择性滤波原理：

对于 2-D 频谱面，较小的 f_x, f_y 值域对应低频，较大的对应高频。常见的高通滤波，低通滤波都是在低频区或高频区加屏蔽光阑。如果事先获得某试片的频谱照相负片，而预先把它从噪声中提取出来，就可以用该负片作滤波器实现图像提取。

三、实验光路

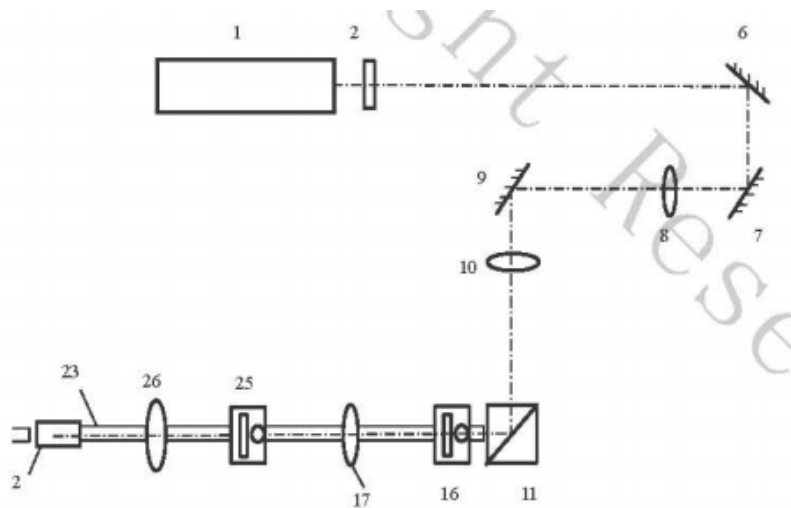


图 2 实验光路图

四、实验步骤

1. 扩束
2. 在试件夹 16 中装入待处理图像试件

3. 在 FT 透镜 17 的焦面附近移动 CCD，使成像清晰，锁定 23，同时锁定 21
4. 在试件夹 25 上先后装上光孔滤波和光屏滤波试片（IFT 不需装试片），微调 FT 透镜 26，观测计算机上 IFT 图像和图像处理效果。
5. 切换图像处理试件，观测计算机上不同的图像处理效果
6. IFT 图像，结合实验结果，整理出试件图像、FT 图、IFT 图、滤波等处理效果

五、实验记录

实验 4 光学系统的 PSF 及 MTF 评价

一、实验目的

1. 了解光学系统的 PSF 及 MTF 的基本物理概念
2. 掌握利用干涉法测波差求 PSF 及 MTF 的基本方法
3. 掌握光学系统的 PSF 及 MTF 的评价方法

二、实验原理

光学系统相对于理想物点的成像点的质量,可作为光学系统成像质量的评价指标。实验中为形成理想物点,对一般光学系统,通常选择理想物点位于光轴上的无穷远处,即采用平行光入射被测光学系统的方法,这时所要考察的像方焦点的分布即为点扩散函数 PSF。根据光学系统的傅里叶变换性,点扩散函数 PSF 可直接由波差计算得到

$$ASF(x, y) = C \iint \exp[ikW(\xi, \eta)] \exp[-ik \frac{D}{2f} (\xi x + \eta y)] d\xi d\eta \quad (1)$$

式中, $ASF(x, y)$ 为点振幅分布函数, C 为常数, D 为光学系统的口径, f 为光学系统的焦距, ξ, η 取单位圆中的归一化坐标。则点扩散函数为

$$PSF(x, y) = ASF(x, y) ASF^*(x, y) \quad (2)$$

一般使 PSF 归一化, 即

$$PSF_{normal}(x, y) = \frac{PSF(x, y)}{PSF(0, 0)} \quad (3)$$

调制传递函数 (MTF) 反映了光学系统对不同分辨率的物点在其相应的像点中对比度的下降情况。可通过对点扩散函数进行傅里叶反变换求得。

$$OTF(u, v) = \iint PSF(x, y) \exp[i2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (4)$$

式中 $OTF(u, v)$ 为光学传递函数。归一化后的调制传递函数为

$$MTF(u, v) = \left| \frac{OTF(u, v)}{OTF(0, 0)} \right| \quad (5)$$

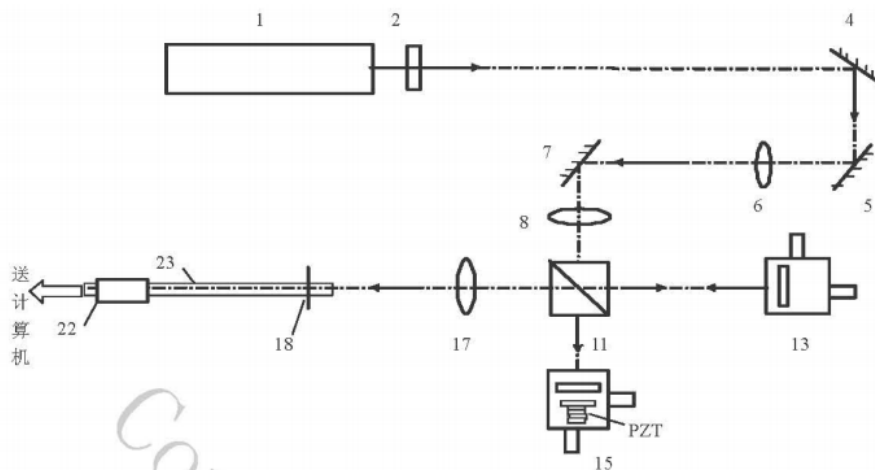
调制传递函数也用自相关方法从波差求得

$$MTF(u, v) = \frac{\iint_{\sigma} \exp \{ik[W(\xi + \lambda f u, \eta + \lambda f v) - W(\xi, \eta)]\} d\xi d\eta}{\iint_{\Sigma} d\xi d\eta} \quad (6)$$

式中, σ 表示两错开光瞳的重迭区, Σ 表示出瞳孔径范围。

本实验采用波差实验方案 (参考有关实验讲义), 在获得波差的前提下, 进一步由程序按上述方法自动计算 PSF 与 MTF。

三、实验光路



激光器 1 发出的激光经衰减器 2 (用于调节激光强度) 后, 经反射镜 4, 5 进入扩束准直物镜 6, 8 (即实验四图 1 中的 L_1), 由分光镜 11 (即实验四图 1 中 BS) 分成二束光, 分别由反射镜 13 (即实验四图 1 中的 M_1), 15 (M_2) 反射形成干涉条纹并经成像物镜 17 (即实验四图 1 中 L_2) 将条纹成于 CCD 22 上, 这样在计算机屏上就可看到干涉条纹, 由计算机软件驱动压电陶瓷作微小位移驱动。

四、实验步骤

1. 调整扩束系统的物镜和透镜, 使激光平行入射到分光棱镜 11; 并调整分光棱镜 11 的位置, 使参考光束严格偏转 90 度。
2. 调整参考镜倾斜量, 使参考光束进入到 CCD 靶面内。
3. 将被测光学系统 12 (10 倍物镜) 放入到测量臂中, 调整光学系统和平面反射镜之间的位置, 使光学系统的焦点和落在平面反射镜的表面。前后调节微位移导轨, 使被测光学系统的焦点刚好落在平面反射表面。前后调节微位移导轨, 使被测光学系统的焦距刚好落在平面反射镜 13 上。
4. 微调平面镜, 使被测光束进入 CCD 靶面内并于参考光束重合, 形成干涉条纹。
5. 运行干涉图的干涉处理软件, 进入【实时采样】对话框, 按【采样】按钮可使计算机自动驱动压电晶体 (PZT) 进行条纹扫描和图像采集工作, 并完成波差计算。通过波面显示 (三维立体显示、等高图) 观察波面形状及数据。
6. 在菜单中选择【工件信息】, 正确填入被测光学系统的口径、焦距或相对口径; 然后从菜单项中选择【点扩散函数 (PSF)】, 程序自动求得点扩散函数 PSF。
7. 从散单项中选择【调制传递函数 (MTF)】, 程序自动求得子午和弧矢方向上的传递函数分布图。

五、实验表格

被测透镜摘要: _____

序号	R (μ m)	子午方向 (X)	弧矢方向 (Y)