

用全息方法改善象质

四 室 六 班

用相干光学模拟方法作了线性象移图片和离焦图片的象质改善实验。空间逆滤波器是用全息照相方法制作的。给出了对模糊图片处理的结果。

一、原 理

在线性空间不变条件下，一个光学系统的成象过程可用二维卷积分表示为（为简化，设光学系统的放大率是1）：

$$g_2(x', y') = \iint_{-\infty}^{\infty} g_1(x, y) h(x' - x, y' - y) dx dy \quad (1)$$

或 $g_2 = g_1 * h$

其中 $g_2(x', y')$ 是象面光强度分布函数， $g_1(x, y)$ 是物面的强度分布函数， $h(x, y)$ 是光学系统的点扩散函数， $*$ 表示卷积运算。由卷积定理知道，在频谱面上有

$$G_2(u, v) = G_1(u, v) H(u, v) \quad (2)$$

其中 G_2, G_1 分别是 g_2, g_1 的傅里叶变换（或称频谱）， u, v 分别是 x, y 方向的空间频率， H 是 h 的傅氏变换，它表征光学系统的频率响应特性，由系统质量和外界因素（比如象移）所决定，通常称为光学传递函数。由（2）式可知，由于象移，离焦等因素使传递函数 H 变坏， G_2 偏离 G_1 很多， g_2 不能忠实反映原来目标 g_1 ，象变模糊了。

为使模糊象变清晰，对模糊象作相干光学滤波。把记录模糊象 g_2 的胶片接触印制在干板上，并使胶片和干板的 r 值乘积为 2，于是干板的振幅透过率 $g_0(x_1, y_1)$ 和 g_2 成正比， $g_0(x_1, y_1) = k g_2$ ， k 是比例常数。将干板 g_0 放在图 1 所示的相干光学滤波装置

的输入面 P_1 上，用平行的相干光照明。傅氏变换镜头 L_1 对 g_0 作傅氏变换，在频谱面 P_2 处的光振幅分布 G_0 为

$$G_0 = k G_2 = k G_1(u, v) H(u, v) \quad (3)$$

如果在 P_2 面放一个光学滤波器，其振幅透过率为 $T(u, v)$ ，则透过滤波器的光振幅分布变成 G'_0

$$G'_0(u, v) = G_0(u, v) T(u, v) \\ = k G_1 \cdot H \cdot T(u, v) \quad (4)$$

其中 $u = x/\lambda f$ ， $v = y/\lambda f$ ， f 为透镜 L_1, L_2 的焦距。

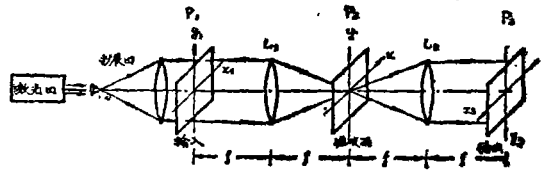


图 1 相干光学处理系统

选择空间滤波器的振幅透过率，比如令

$$T(u, v) = 1/H(u, v) \quad (5)$$

则 $G'_0 = k G_1 \cdot H \cdot 1/H = k G_1$
于是滤波器 T 所透过的光振幅分布和原来目标的频谱成正比。透镜 L_2 对 G'_0 作逆傅氏变换，在输出面 P_3 上的光分布 g_1 为 $(F^{-1}\{\})$ 表示逆傅氏变换)

$$g_1(x_3, y_3) = F^{-1}\{G'_0\} \\ = F^{-1}\{k G_1\} = k g_1 \quad (6)$$

即获得了原来目标的清晰象。

线性象移是指在摄影系统曝光过程中，象面和目标之间发生相对线性移动。一个校正好象差的光学系统的点扩散函数是一个点（几何光学近似），由于相机和目标在 x 方向的相对移动，目标上的一个点在象面上将

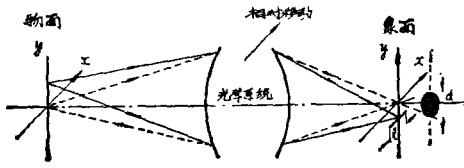


图2 象移和离焦点扩散函数示意图

形成一线段，见图2。所以象移系统的点扩散函数是一线段，其长度 l 即为象移量。离焦是指胶片平面离开了象面，目标上一点将在象面上形成一个均匀的圆盘（这里指的是严重离焦的情形），其直径 d 用以表示离焦量，见图2虚线。所以离焦系统的点扩散函数是一均匀圆盘。图3(a)、(b)分别表示象移和离焦的点扩散函数。对点扩散函数作傅氏变换，就得到相应的光学传递函数 $H(u, v)$ 。图3(a)所示的象移点扩散函数可表示为

$$h(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq l/2 \\ 0 & |x| > l/2 \end{cases} \quad (7)$$

其传递函数 $H(u)$ 是

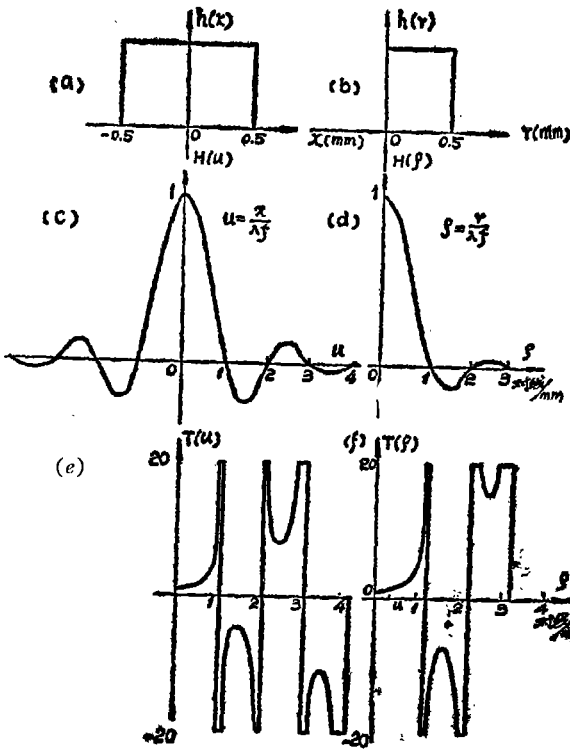


图3 模糊点扩散函数，传递函数，有限形式的逆滤波器曲线

$$\begin{aligned} H(u) &= C \int_{-\infty}^{\infty} h(x) e^{-2\pi i u x} dx \\ &= C \int_{-l/2}^{l/2} e^{-2\pi i u x} dx \\ &= Cl \frac{\sin \pi l u}{\pi l u} \end{aligned} \quad (8)$$

其中 Cl 为常数。而离焦的传递函数 $H(\rho)$ 为

$$H(\rho) = \frac{2J_1(\pi d \rho)}{\pi d \rho} \quad (9)$$

其中 d 为离焦量， $\rho = r/\lambda f$ ， $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。图3(c)(d)表示象移和离焦的传递函数。从图中可看出，传递函数有零点和负值。因此在模糊图片上，相应于 H 为负值的空间频率将发生相位颠倒，相应于 $H = 0$ 附近的空间频率不会通过光学系统因而不在于照片上出现。

根据方程(5)式，消象移的逆滤波器是

$$T(u) = \frac{\pi l u}{\sin \pi l u} \quad (10)$$

消除离焦的逆滤波器是

$$T(\rho) = \frac{\pi d \rho}{2J_1(\pi d \rho)} \quad (11)$$

因为 $\sin \pi l u$ ， $J_1(\pi d \rho)$ 在某些空间频率处等于零，滤波器又不可能实现无穷大的透过，逆滤波器只能作成有限形式的，如图3(e)，(f)所示。理想地，最终的传递函数 H' 是

$$H'(u) = H(u)T(u) = 1 \quad (12)$$

由于上述原因，经过逆滤波器处理后总的传递函数 H' 有图4所示的形式。显然可以看

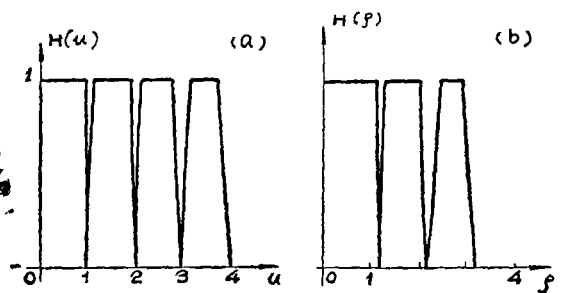


图4 利用图3(e)(f)处理后的总的传递函数 (a)象移 (b)离焦

出, H' 没有负值, 在较高频率处 $H' > H$, 从而处理结果达到了变清晰之目的。注意在 $H = 0$ 处 $H' = 0$, 处理对于这些频率是无能为力的。

用全息方法作滤波器实际上就是对理想逆滤波器的一种近似。因为

$$T(u) = \frac{1}{H} = H^* \cdot \frac{1}{|H|^2} \quad (13)$$

可以分两步实现逆滤波器, (1)用全息照相实现 H^* , (2)用普通照相方法实现 $1/|H|^2$ 。下面就考虑全息滤波器的制作。

二、全息滤波器

用相干光学方法模拟模糊的点扩散函数和传递函数, 考虑图 5 所示的傅里叶变换全息照相的光路图。

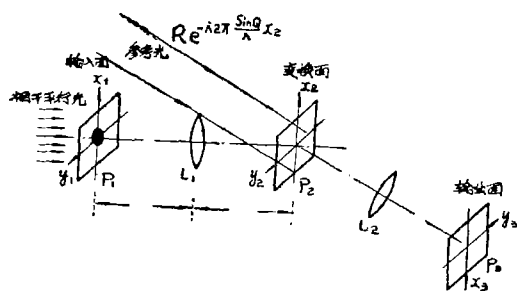


图 5 傅氏变换全息光路

在 P_1 面放模糊的点扩散函数 h , 在离焦情形, 放在 P_1 上的是直径 $d = 1mm$ 的圆孔; 在象移情形, 用一柱面镜使相干平行光在 P_1 面上聚焦成一亮焦线, 并用狭缝将它截为 $l = 1mm$ 长, 而焦线的宽度不大于 $0.01mm$ 。透镜 L_1 对 h 作傅氏变换, 在 P_2 面上形成 h 的谱 $H(u, v)$, 即模糊的传递函数, 见方程 (8) 和 (9) 式。

平面参考光 $Re^{-i2\pi\alpha x_2}$ 以角度 $\theta \cong 10^\circ$ 投射到 P_2 面上, R 为常数, $\alpha = \sin\theta/\lambda$ 。参考束和物光束峰值的强度比为 $4/1$ 左右, 即 $|R|^2/|H_{max}|^2 \cong 4$ 。在 P_2 面放全息干板记录 h 的全息图, 照到干板上的总光强分布 I 是

$$I = |H + Re^{-i2\pi\alpha x_2}|^2 = |H|^2 + |R|^2 + RH^*e^{-i2\pi\alpha x_2} + RHe^{i2\pi\alpha x_2} \quad (14)$$

干板经显影处理后 (天津全息干板, $D-19$ 显影液, 显影 $2'30''$), 其振幅透过率 T_1 为

$$T_1 = \beta I \quad (\beta \text{ 是常数}) = \beta(|H|^2 + |R|^2) + \beta RH^*e^{-i2\pi\alpha x_2} + \beta RHe^{i2\pi\alpha x_2} \quad (15)$$

上式第二项除了一个表示方向的相位因子 $e^{-i2\pi\alpha x_2}$ 外, 是和 H^* 成正比的。这正是作滤波器所需要的。 $e^{-i2\pi\alpha x_2}$ 表示它和参考光在同一方向。 $\beta(R^2 + H^2)$ 是在光轴上的零级光, $\beta RHe^{i2\pi\alpha x_2}$ 是在光轴另一侧的衍射光, 它们在空间被很好地分开。在拍全息图时, 除通常应注意之事项外。特别考虑了偏振对全息图条纹之对比度的影响, 用偏振片使激光束成线偏振光, 偏振方向垂直于两个光束构成的平面, 这就提高了全息图的衍射效率。拍好的全息图应用显微镜检查乳剂层有无缺损以及条纹对比, 并观察重现象之强弱及畸变之大小。挑选最好的使用。

挡住参考光, 在图 5 的 P_2 面上放干板直接记录谱 H 。因为干板是对光强度感光的, 选择曝光时间, 显影液和显影时间使干板的 $r = 2$, 所得到的透明板振幅透过率 T_2 为

$$T_2 = \frac{1}{|H|^2} \quad (16)$$

在干板感光特性曲线的线性区, 密度 D 和曝光量 E 的关系是

$$D = r \log E - D_0 = r \log |H|^2 - D_{01} \quad (17)$$

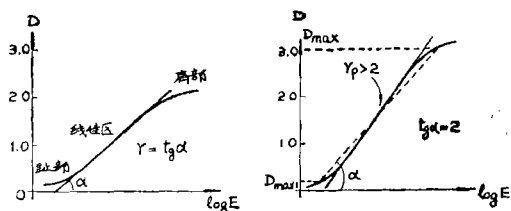


图 6 (a) 干板特性曲线, (b) 实测干板特性曲线和所作的近似

其中 r 为特性曲线直线部分的斜率, $E = |H|^2 t, D_{01} = D_0 + \log t, t$ 为曝光时间, 见图6(a)。令 $|H_{max}|^2 = 1$, 并使该处密度 $D_{max} = 3$, (17)式变成

$$D = 3 + 2 \log |H|^2 \quad (18)$$

再依据方程(8)和(9)式就能算出, 象移和离焦情形, 干板的密度分布曲线, 见图7(a), (b)之虚线。用显微密度计测量干板密度分布, 结果在 $r=2$ 时, 密度与计算值相差太远, 尤其是最大密度与计算值相差更多。为此考虑图6(b)。图中曲线的 $r > 2$, 就是说选择曝光时间和显影时间使实际干板的 $r > 2$ 。图中虚线的斜率为 2, 它表示所要作的近似, 在象移情形, 虚线就是 D_{max} 和次级最大密度 D_{max1} 之间的连线, $D_{max1} = 0.3 - 0.4$ 。因此透明板的实际密度曲线更接近于计算曲线, 见图7(a), (b)之实线。所以适当选取曝光量和显影时间就能得到较好满足(16)式的透明板。

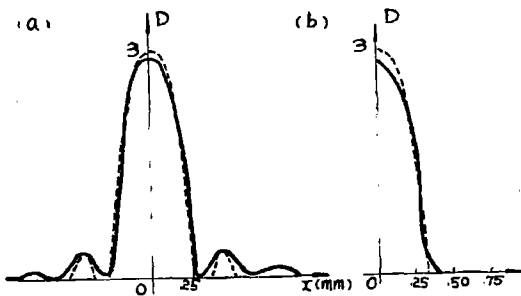


图7 谱的密度分布(a)象移, (b)离焦

把全息图 T_1 和透明板 T_2 很好地叠置在一起, 装入液体门中放在图5的 P_2 面上。挡住参考光, 用物光束 H 照明, 并考查在参考光方向的衍射波有 (依据(15)式的第二项)

$$\begin{aligned} U &= H \cdot \frac{1}{|H|^2} \cdot \beta R H^* e^{-i2\pi\alpha x_2} \\ &= \beta R e^{-i2\pi\alpha x_2} \end{aligned} \quad (19)$$

由于相对参考波方向来说 $\alpha = 0$, 而 β, R 均为常数, 所以 $U = \text{常数}$, 最后在 L_2 的后焦面上成一亮点。这就是说可以用全息滤波器将模糊的点扩散函数, 一个亮线段或一个亮圆盘变换成一个亮点, 这个亮点就代表最后

处理结果的点扩散函数。

三、实验结果

实验所用的滤波系统见图5所示的光路, 但需将参考光路去掉。把待处理的模糊图片放在输入面 P_1 上的液体门中, 模糊图片是将普通照相机拍摄的象移和离焦底片复制在干板上而作成的透明片。把全息滤波器放在 P_2 面的液体门中。液体门所盛匹配液体的折射率为 1.5, 它的作用是消除照相乳剂起伏所引起的附加相位。仔细将滤波器调到透镜 L_1 的焦面上, 并在 x, y 方向调好滤波器的位置。于是在输出面 P_3 上得到了变清晰的象, 用胶片记录处理结果。图8表示对象移模糊图片的处理结果, 上边是模糊的汉字, 下边是处理后的照片。可以看出象移造成的模糊被消除, 图片质量有了很大改善。比如在模糊图片的“全”字上面有个倒三角形的黑斑, 这是象移引起的相位颠倒造成的, 在处理后的图片上它完全被消除了。图9是对离焦模糊图片的处理结果。图片显然变清晰了。例如模糊图片的“因”字, 方框中间是个黑的“十”字, 它是离焦引起的相位改变造成的。而在清晰图片上被恢复成“大”字。显然这是用一般的“象增强”方

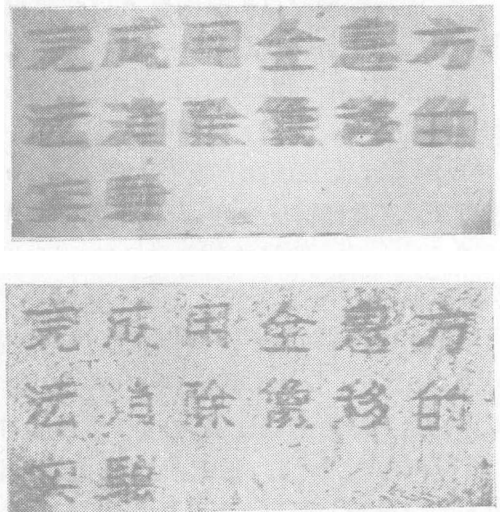


图8 象移模糊照片及其处理结果

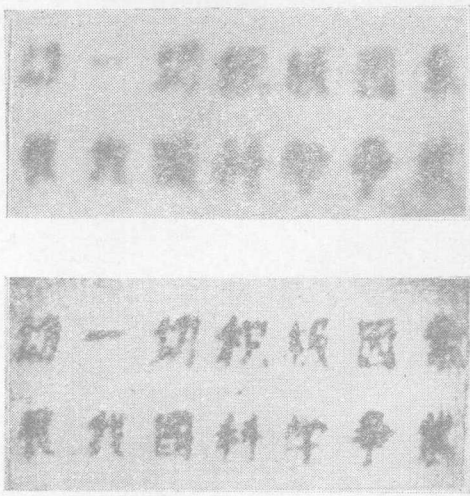


图9 离焦模糊照片及其处理结果

法不可能作到的。

图10表示处理前后的点扩散函数。图10(a)是象移(象移量为1mm)和离焦(离焦量为1mm)的点扩散函数的放大照片,图10(b)是被复原的点扩散函数照片(与图10(a)有相同的放大倍数)。图10(c)是用显微密度计在水平方向扫描图10(b)后计算出来的点扩散函数的强度分布。由图可见,被复原的点扩散函数有一很强的主峰和两个较弱的次峰(离焦情况是一弱的圆环)。参见图3(e)(f),我们所做的全息滤波器只是有限形式的逆滤波器,它不可能把模糊的点扩散函数完全复原成 δ 函数,因而出现了次峰。从图10(c)可以看到,象移和离焦情形的主峰的半强度宽度都是0.12mm,就象移来说(图10(c)左边),主峰和次峰的强度比是18/1,离焦情形的强度比则更大(但应考虑这时次峰不是孤立的点而是一个圆环)。点扩散函数的改善也能说明图片质量的改善。由于象移的点扩散函数在 x 方向(水平)的宽度是1mm,模糊图片在 x 方向的分辨率是1对线/mm,消除象移的点扩散函数的半强度宽度为0.12mm,复原图片的分辨率应能达到8对线/mm。但是由于次峰的存在和影响,亦即滤波器的作用频率带宽和动态范围的限制,还有各种噪音的影响,复

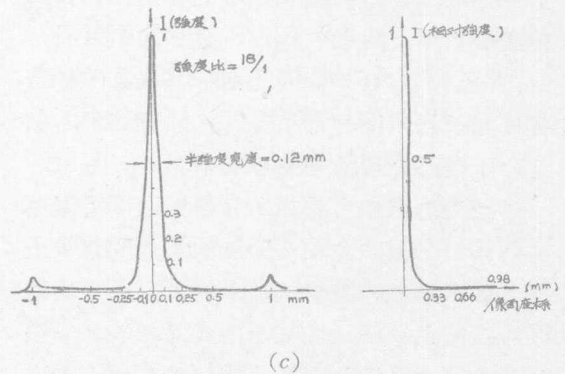
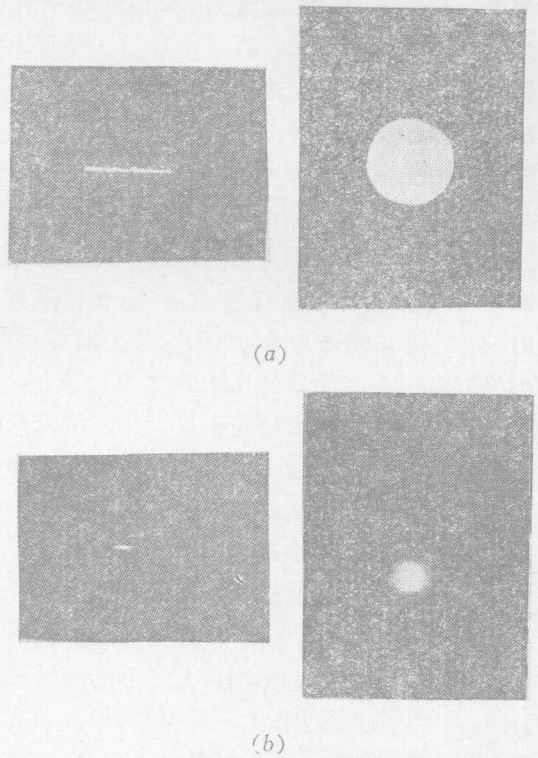


图10 (a)模糊的点扩散函数的放大照片, (b)复原的点扩散函数, (c)复原点扩散函数的强度分布

原图片的分辨率实际只达到了3—4对线/mm。

模糊(象移和离焦)图片是在室内用普通照相机拍摄的,这时噪音参与了成像。在有噪音的情况下,滤波器的振幅透过率是

$$T = \frac{1}{H} \frac{1}{[1 + |R|^2/|H|^2]} \quad (20)$$

其中 R 是噪音功率谱与信号功率谱之比。很

明显,只有当信噪比为无穷大, R 为零时,才有逆滤波器的结果。所以在处理有噪音的图象时应制作(20)式所表示的滤波器。其次滤波器起作用的频带宽度有限。我们在实验过程中曾用3毫米大小的圆孔放在全息滤波器前面,发现它并不影响处理结果。图3(c)表示在作全息图时在全息图平面上的振幅分布,其强度分布是主峰为1,第一侧峰为0.047,第二侧峰为0.0165,第三侧峰为0.0083,……。而参考束的强度为4以上,所以对第三或以后的侧峰来说,干涉两光束的强度比太大了($4/0.0083=480$),所产生的干涉条纹之对比很差,甚至没有衍射作用。这就造成了全息滤波器的作用频率的截止。我们的滤波器的作用频率不超过3—4对线/mm(可参考图3(c)、(d)),于是处理结果就不会超过4对线/mm。在制作滤波器的振幅部分时,由于条件限制,我们曾规定 $D_{max}=3$ 。就光振幅来说,其动态范围大约是30:1。这就影响了滤波器对高空间频率的作用,以及对传递函数零点附近的作用(可参考图3(e)、(f)和图4(a)、(b))。因此增加滤波器的频带宽度和动态范围是很重要的,只有这样才能进一步提高处理结果的分辨率。

激光斑点噪音是相干光学处理不可避免的问题,在图8,图9的复原照片的背景上都看到斑点。减少斑点噪音可以用平均的办法把斑点平滑,或减小激光光源的相干性来减小斑点噪音。在复原照片的背景上可以看到有一些近乎等距离的细线条,看来这是复原点扩散函数次峰的干涉形成的,在一定程度上讲也是不可避免的。另外相干光学处

理系统本身会造成一些噪音。相干光对系统中的灰尘粒子,元件上的微小缺陷特别敏感,它们使相干光衍射而形成了噪音。在复原照片上的一些圆环就是它们造成的。在输入透明板上,全息滤波器上,透镜表面上的灰尘粒子,以及照相干板乳剂上的小泡和裂痕都是噪音源。所以在实验过程中保持清洁,无尘是至关重要的。

四、结 论

实验证明了相干光学方法是一种可行的象质改善手段。虽然与计算机处理比较起来精度低,但比较灵活,速度快,成本低。为了达到实用目的,应设法进一步提高全息滤波器的频带宽度和动态范围,并降低斑点噪音的影响。

参 考 文 献

- [1] J. W. 顾德门著“傅里叶光学导论”科学出版社,1975年。
- [2] G. W. Stroke, “Optical Computing”, IEEE Spectrum, Vol 9, No.12, pp 24—41, 1972.
- [3] G. W. Stroke and M. Halioua, Phys. Lett., 39A, 269 1972.
- [4] G. A. Krusos “Restoration of Radiologic Image by Optical Spatial Filtering” Optical Engineering. Vol 13, No.2, 1974.