

# 经过网格板印制在相干光学系统中作非线性滤波

**提要** 在相干光学系统中借助网格板印制能够实行非线性滤波运算。本文介绍关于这类系统的理论和实际考虑。强调用这些方法来完成对数滤波。研究了对于分离相乘的信号和噪音,减小斑点噪音,以及处理射线象的应用。给出了实验结果。

## I. 前言

相干光学滤波系统已被证明是进行线性空间一不变运算的有力工具。这样一些运算已被研究得很多了,它是所有滤波运算中被了解得最透彻的,并且常常用于如象复原和象增强之类的图象处理。

但是,在实际图象处理问题中,有时需要作非线性或空间变化的运算。索丘克(Sawchuk)已经研究了一种空间变化线性滤波运算,并用数字方法来执行。看来有希望的是,最近布赖戴尔(Bryngdahl)的技术可能用光学手段来实现这种滤波。

本文关心的是通过相干光学系统来执行非线性滤波运算。以前关于这种系统的研究几乎强调的都是线性滤波。另一方面,数字计算机可以很容易地执行非线性变换。因此相干光学系统的功能对非线性方式的任何扩充都将增加它的吸引力,因为这是对纯数字方法的有生命力的补充。

以前有关在相干光学系统中进行非线性运算的工作并不多,但是应当叙述一下几个以前的努力。马盖特(Marquet)和迁内(Tsujiuchi)很早就认识到,作为相干光学系统输入的半色调照片能够产生与原来形成这个照片的幅照度分布有非线性关系的场。阿米塔奇(Armitage)和洛曼(Lohmann)引进了theta调制的概念,通过theta调制有可能进行灰度标度的非线性变换。最近斯托

克(Stalker)和李(Lee)研究了用可饱和吸收器(Saturable absorbers)作为相干光学处理系统中的非线性元件。

在研究本文感兴趣的主要方法之前,应当说明的是照相胶片可以直接用来完成某些非线性变换。都知道在H-D曲线的线性范围内,一个照相透明片的振幅透过率 $t_a$ 和原来曝光量E的关系通过下式相联系,

$$t_a = kE^{-\gamma/2} \quad (1)$$

其中 $\gamma$ 是H-D曲线的斜率,可以是正的也可以是负的, $k$ 是常数。虽然在全息术中有时能实现某些如 $t_a \propto E$ 或 $t_a \propto \log E$ 的非线性关系,但这些关系式正确成立的曝光量动态范围就我们使用的目的来说不够大。实际些讲,对照相胶片来说只有方程(1)式的指数定律关系才容易用大动态范围的曝光量来完成。

本文研究的是借助网格板印制完成的一类非线性性质。我们的工作与马盖特(Marquet)和迁内(Tsujiuchi)的不同之处在于,我们研究的是设计能实行特定非线性运算的网格板,而他们研究的是一个他们能得到的特殊网格板。另外,在本文后面着重于对数滤波及其潜在的应用。

## II. 通过网格板印制的非线性变换

网格板印制是在印刷工业中主要使用的一种专门照相工序。网格接触板是这个过程

的关键部件，它是由一个软基板上的花饰点子的周期阵列构成的，并且与一种硬截止 (hard-clipping) 胶片一起使用，这种胶片有非常大 (理想上无穷大) 的伽玛值。投射到这个板上的连续光分布被点子的密度剖面所调制。然后调制的光分布被高伽玛值拷贝胶片硬截止，造成等密度但大小不同的点子。图 1 进一步说明了这个过程。

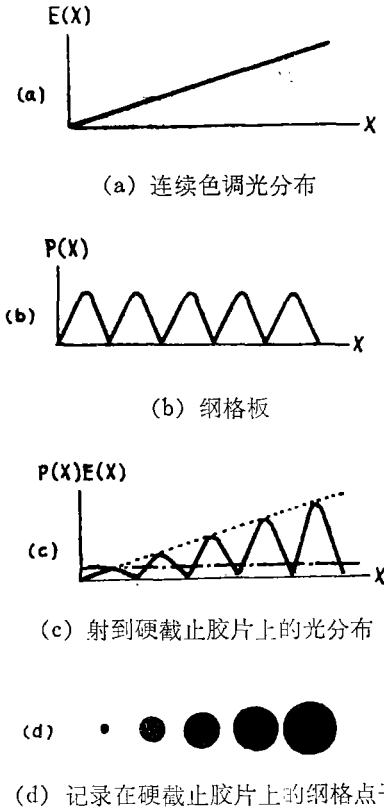


图 1 网格板印制

这种印制而成的半色调透明片由面积调制的点子的周期阵列构成，因而它有一个由许多光栅级次所构成的二维傅氏谱，由于面积调制，每个谱点周围有一些边带环绕。在整个讨论中，将假定只有 0-频率 (轴上的) 光栅级次及其边带能通过光学滤波系统。于是在半色调透明片的任何区域上，关心的将只是这个透明片的局部平均透过率，这一区域要比点子的间隔大，而要小得足以认为点子面积近似为常数。应当注意，虽然高级谱点也能用，但是网格板点子的密度剖面 and 所

实现的非线性之间的关系与下面分析所预计的将有所不同。

要作非线性变换的信息由一个曝光量图样  $e(x)$  所携带， $e(x)$  的值限制在范围  $e_1 \leq e(x) \leq e_2$  内。用曝光量范围的下限对曝光量予以归一化是简便的，即  $E(x) = e(x)/e_1$ ，这时感兴趣的范围变成  $1 \leq E(x) \leq E_m$ ，其中  $E_m = e_2/e_1$ 。

假设要把一个场放进相干光学滤波系统中去，它有一个与曝光量分布  $E(x)$  成非线性关系的空间振幅分布，

$$t_a(x) = f[E(x)] \quad (2)$$

其中  $f[\cdot]$  是所规定的非线性。那么放入光学系统中去的半色调透明片的局部平均强度透过率应当是

$$\tau(x) = |t_a(x)|^2 = f^2[E(x)] \quad (3)$$

其中  $1 \leq E(x) \leq E_m$ 。

要做成一个具有上述性质的半色调透明片，应使曝光量图样通过一个强度透过率为  $T_s(x, y)$  的网格接触板，并投射到硬截止胶片上，而这个胶片有一个归一化了的曝光阈值  $E_t$ 。

我们希望解析地确定接触板上一个点子的密度剖面  $D_s(x, y) = \log 1/T_s(x, y)$ ，这个板将产生所需要的非线性  $f[\cdot]$ 。为此，必须从数学角度描述接触板和半色调透明片二者的作用。关于这个板，在曲线  $g(x_s, y_s) = 0$  描述的坐标  $(x_s, y_s)$  的轨迹内，一个给定的曝光量  $E$  将使硬截止胶片感光 ( $E$  大于胶片阈值)，则有，

$$T_s(x_s, y_s) \cdot E = E_t$$

或等价地

$$D_s(x_s, y_s) + \log E_t = \log E \quad (5)$$

但是，如果最弱的曝光量  $E = 1$  刚好能在  $D_s = 0$  的位置上感光硬截止胶片，显然曝光量的阈值应选择为 1，于是有

$$D_s(x_s, y_s) = \log E$$

此外，令  $a$  表示曲线  $g(x_s, y_s)$  内的那部分面积，而  $1-a$  表示这个曲线之外的那部分区域。那么制成的半色调透明片的局部平

均强度透过率为

$$\tau = a\tau_1 + (1-a)\tau_2 \quad (7)$$

其中 $\tau_1$ 是感光面积的强度透过率,  $\tau_2$ 是没感光面积的强度透过率。就一个理想的半色调负透明片来说,  $\tau_1 = 0$ ,  $\tau_2 = 1$ , 而理想的半色调正透明片,  $\tau_1 = 1$ ,  $\tau_2 = 0$ 。

方程(2)、(3)、(6)、(7)是预示接触板上合乎需要的点子密度剖面的基本关系式。合并这些方程并消去 $\tau$ 和 $E$ , 得到

$$f^2 [10^{D_s(x_s, y_s)}] = a\tau_1 + (1-a)\tau_2 \quad (8)$$

因为在方程(8)式中 $D_s(x_s, y_s)$ 只是 $a$ 的函数, 而且点子实际上并不取决于特定的轨迹 $g(x_s, y_s) = 0$ , 所要求的板上点子的二维结构不由这个方程所确定, 所以应当用 $D_s(a)$ 代替 $D_s(x_s, y_s)$ 。换句话说, 方程(8)式仅仅描述感光的那部分点子面积和围绕这个区域的边界上的密度之间的函数关系。

把这部分区域画成二维结构的方法是任意的, 而且只要用的是零频率光栅级次(轴上)及其边带, 就不会影响非线性网格板的性能。这主要取决于设计考虑, 在附录中将

简短地讨论它。

因为, 从 $D_s(a)$ 和 $a$ 的定义看,  $a$ 是那些密度小于 $D_s$ 的所有部分区域之和, 不等式 $a_2 \geq a_1$ 对于任何 $D_2 > D_1$ 都成立, 其中 $D_2 = D_s(a_2)$ ,  $D_1 = D_s(a_1)$ 。所以在一种较弱的意义下 $D_s(a)$ 必须是 $a$ 的单调递增函数。注意到方程式(8)右边关于 $a$ 也是单调的, 可得出结论, 借助方程式(8)描述的网格接触板完成的这种非线性运算是限于在较弱意义下的单调函数。注意, 若这一非线性函数 $f[\cdot]$ 是单调递增的, 变换就在半色调正透明片上实现, 若它是单调递减的, 就在半色调负透明片上实现。(如果利用高衍射级次则能完成非单调变换。)

在图2中概括了非线性相干光学处理所需要的点子剖面的几个例子。图中列出的所有非线性函数都归一化, 以满足在有意义的曝光量范围( $1 \leq E \leq E_m$ )上的振幅透过率的范围限制( $0 \leq t_a \leq 1$ )。就图中列出的线性变换和指数变换来说, 振幅透过率 $t_a$ 的范围由于函数的特殊形式稍小于 $0 \leq t_a \leq 1$ 。应当注意, 仔细地选择能使函数定义在整个振幅透

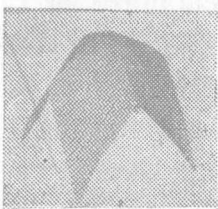
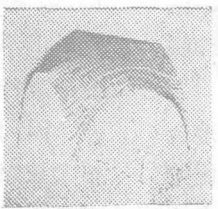
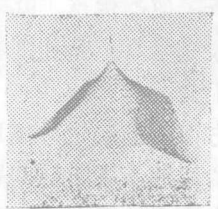
变换	对数的	线性变换	指数的
函数的例子	$t_a = \frac{\log E}{\log E_m}$ $0 \leq t_a \leq 1$	$t_a = \frac{E}{E_m}$ $\frac{1}{E_m} \leq t_a \leq 1$	$t_a = 0.9E - 1$ $0.9E_m - 1 \leq t_a \leq 1$
印制	半色调正法 $\tau_1 = 1, \tau_2 = 0$	半色调正法 $\tau_1 = 1, \tau_2 = 0$	半色调负法 $\tau_1 = 0, \tau_2 = 1$
网格板的密度剖面	$D_s(a) = \sqrt{a} \log E_m$ $0 \leq a \leq 1$	$D_s(a) = \log(\sqrt{a} E_m)$ $0 \leq a \leq 1 - (1/E_m)^2$	$D_s(a) = \log(\log \sqrt{1-a} / \log 0.9 + 1)$ $0 \leq a \leq 1 - (0.9E_m - 1)^2$
网格板点子的3维结构			

图2 几个用于相干光学处理的非线性网格板的例子

过率的范围上,例如对于线性变换,  $t_s = (E - 1)/(E_m - 1)$ 。根据方程(8)式计算了点子密度剖面并将它列出,这里假定用一个理想的硬截止胶片,即对于钢格板一正片印制,  $\tau_1 = 1, \tau_2 = 0$ , 钢格板一负片印制  $\tau_1 = 0, \tau_2 = 1$ 。注意,因为在图2中的特定指数函数是单调递减的,变换就以半色调负透明片实现。另一方面,其余两个函数是单调递增的,以半色调正透明片实现。也列出了部分区域  $a$  的范围,它是从非线性函数定义中的  $t_s$  的范围限制得来的。为了直观理解,图2表示出这些点子的三维密度剖面的透视图,这是用计算机画出的。点子结构类似于印刷工业所用的普通钢格接触板的正方形点子(见附录的图15)。

还有许多非线性不能解析地表示出来,但在实际应用中很重要。它们之中有多阈值截止,能对它设计一个钢格板。此外,在象的记录过程中不可避免地引入非线性,例如照相胶片(特性曲线)的肩部和趾部的影响,可使用一个补偿钢格板对它们作逆变换来消除,这个钢格板是为消除非线性而设计的。

### III. 用相干光学系统的对数滤波

虽然非线性钢格板能实现许多非线性变换,但是现在我们将注意力集中在用于相干光学系统的对数钢格板上。

一般地讲,在考虑相加信号的滤波问题时,常常想用一个线性系统,虽然这一限制并不总是能导致一个对滤波器的最佳选择,但它有分析简便的优点。基于这种思想,已经证实相干光学系统是处理相加的信号和噪音的有力工具。

另一方面,当确定分离那些非相加地合并的信号的滤波步骤时,问题常常是很困难的,并且在许多情况下使用线性系统意义不大。在信号和噪音是相乘的情形,例如信号

谱和噪音谱经过卷积运算缠绕在一起,抽取信号是困难或不可能的。不幸在实际问题中,信号和噪音常常是以乘积形式相互作用的。例如,一个被纪录的象可以看作一个目标(信号)的反射性能函数和一个可能是非均匀的照明函数(噪音)的乘积。第二个例子,用漫射的激光照明的系统所纪录的象通常是所需要的象和有干挠的斑点图样的乘积。生物医学成象,如X-射线象,是乘积型成象的另一个例子。

这个困境的实际解决已经在数字图象处理领域中发展起来,并称为对数滤波。图3说明一个进行象处理的对数滤波系统。对要滤波的象作对数变换,产生相加的信号和噪音。然后就能用傅氏域的(线性)滤波尽可能好地分离信号和噪音。若需要的话,也能对滤波后的象作对数变换,以便将它恢复成原来的灰度等级分布。

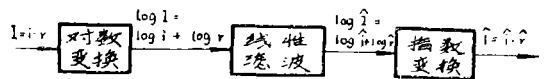


图3 对数滤波系统

既已说明了对数滤波是一个处理相乘象的合适运算,现在来研究,使用一个对数钢格板和一个线性相干光学系统处理相乘象的全光学处理机的实现问题。

图4说明实现我们的全光学对数滤波系统所用的实验步骤。无论什么情形原来图样都是由两个单个图样的乘积构成的。在图4左边说明的对数滤波过程中,通过一个对数钢格接触板把原来图样拷贝制成半色调负片,然后将负片照相缩小作成较小的半色调正片。由于上述完整的钢格印制,相乘图样  $T_1 T_2$  被转换成相加图样  $\log T_1 + \log T_2$ 。然后把小的半色调正透明片放在相干光学系统中进行线性处理。

因为我们的眼睛对照明的灰度等级分布不太敏感,在许多实际应用中指数变换是不必要的,所以在实验中就没有用它。

此外为了比较,作总  $\gamma$  为  $-2$  (见方程

(1)式)的正拷贝,就制成一个振幅透过率与曝光量成线性正比的正透明片。这代表原来的在相干光学系统中的线性滤波。在实际实验中,先做一个 $\gamma$ 为1的中间负片(inte-negative)处理,如图4右边步骤所示。

注意这两个处理过程的对称性。换句话说,对数变换确实没有引入额外的处理,也没带来超过比获得强度到振幅的线性变换所需要的更复杂的问题。差别只是在拷贝过程中使用了一个网格板。

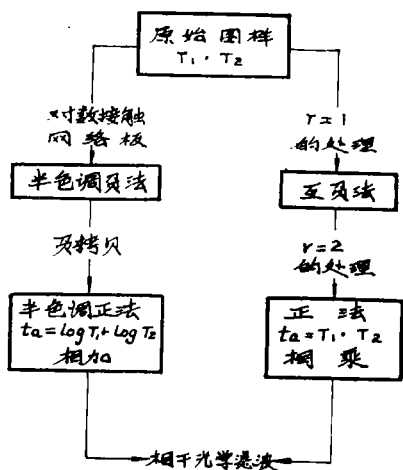


图4 实验步骤

基于理论计算已研究和比较了几个制造非线性网格板的实验技术。这些细节在附录中讨论。不幸的是,现有的设备都不允许我们用任何讨论过的技术实现大型和结构细微的均匀对数网格板。

就对数网格板而言,偶而找到一个简单容易的方法,用一个市场可买到的网格板。就是说,对数网格板是普通接触网格板的一个接触复印的负板。图5说明对具有100:1曝光量动态范围(2.0 log单位)的对数网格板测得的特性,它是把Kodak Gray Contact Screen(100线/英寸,椭圆点)接触复印在Kodak Contrast Process Ortho film上的负板。正网格板的平均(积分)振幅透过率在图5中用纵坐标表示,这是从测

得的负网格板强度透过率计算出来的。注意,实验结果(圆圈)由于巧合非常接近实线,实线表示理想的对数板。

用图4表示的实验手续作了几个实验来检验这个对数板的性能。图6说明对数变换对一个物体傅氏谱的影响。图6(a)是原来的输入图样,它是由两个相乘的彼此垂直的

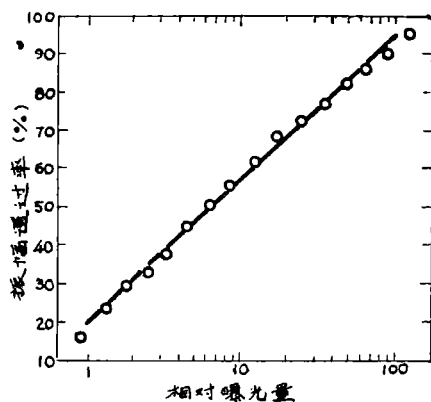


图5 测量的对数网格板特性

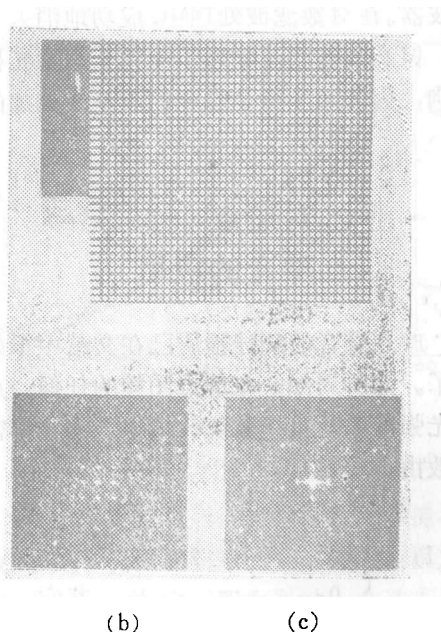


图6 对数变换对傅氏谱的影响  
(a) 原始输入图样 (b) 线性变换图样的谱  
(c) 对数变换图样的谱

光栅构成的。这个图形的密度动态范围从 0 到 2。用对数板制作了这个图形的半色调正透明片，同时作了一个其振幅透过率与曝光量成线性比例的正透明片，这都是根据图 4 表示的手续作的。图 6 (b) 表示用光学方法得到的线性拷贝正交光栅的傅氏谱。两个相乘光栅的谱是单个光栅谱的卷积，并且产生的互调制谱分量清晰可见。图 6 (c) 表示用对数网格板获得的对数变换正交光栅的谱。现在两个光栅的谱是相加的，互调制分量消失了就表明了这一点。

图 7 比较了一个简单的对数滤波实验和普通的线性滤波实验。图 7 (a) 是原来的图形，它是一个连续色调图片（一个姑娘的脸）和一个 Ronchi 型光栅的乘积。这个图样是通过拷贝这两个迭置的透明片得到的。每个透明片的密度动态范围是 1，于是相乘图样的总动态范围是 2。用一个简单的相干光学滤波系统滤掉光栅的谱，只要在频率面上光栅谐波的位置处放一些吸收斑即可。图 7 (b) 和 (c) 分别表示对数滤波和线性滤波的结果。两种情形在频率面上用的是相同的吸收滤波器。在对数滤波处理中，成功地消去了光栅。但是线性滤波处理不能完全消除光栅的影响，因为两个谱是卷积的而不是相加的。

#### IV. 对斑点 (Speckle) 噪音的应用

斑点噪音的统计性质已在文献中很好研究了。如所周知，在斑点图样的任何一点上的光强度服从负指数统计规律，其几率密度函数由下式表示。

$$P_I(I) = \begin{cases} \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right) & I \geq 0 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

其中  $\sigma^2$  是一个常数，与对强度有贡献的所有随机相位矢量的均方模之和有关。

作为很重要的一点，我们注意到负指数

分布的平均值和标准偏差是：

$$\begin{aligned} \text{平均值: } \bar{I} &= \int_{-\infty}^{\infty} I P_I(I) dI = 2\sigma^2 \\ \text{标准偏差: } \sigma_I &= \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} I^2 P_I(I) dI - \bar{I}^2 \right\}^{1/2} = 2\sigma^2 \end{aligned} \quad (10)$$

于是平均值和标准偏差相等。如果把平均值和标准偏差之比叫做信噪比的话，可见这个比值总是等于 1。还看到在标准偏差（斑点噪音）等于平均值的意义上斑点噪音是乘积性的，平均值表示感兴趣的信号。

在把对数变换应用于斑点图样的统计性质之前，必须首先将方程 (9) 式的强度统计变成归一化曝光量的统计，直接对它作对数变换。因为归一化曝光量  $E$  表示为

$$E = It/e_1$$

其中  $t$  是曝光时间， $e_1$  是曝光量范围的下限，曝光量和强度一样服从同样的统计规律，其几率密度函数，平均值和标准偏差表示如下、

$$\begin{aligned} P_E(E) &= \begin{cases} \mu \exp(-\mu E) & E \geq 0 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \\ \bar{E} = \sigma_E &= \frac{1}{\mu} \quad \text{其中 } \mu = e_1/2\sigma^2 t \end{aligned} \quad (11)$$

现在把通过对数网格板能实现的 $\mu$ 对数变换表示为

$$\begin{aligned} t_s &= \begin{cases} 0 \\ \log E / \log E_m = 1 \end{cases} \\ &= \begin{cases} 0 & 1 \geq E \geq 0 \\ 1_n & E/I_n E_m \quad E_m \geq E \geq 1 \\ 1 & E \geq E_m \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

其中  $t_s$  是半色调透明片的振幅透过率。所以  $t_s$  的几率密度函数计算如下

注 图 7 省略

$$P_{t_s}(t_s) = \begin{cases} \delta(t_s) \int_0^1 P_E(E) dE + P_E(E) \frac{\partial E}{\partial t_s} + \delta(t_s - 1) \int_{E_m}^{\infty} P_E(E) dE & 0 \leq t_s \leq 1 \\ 0 & \text{其余} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} [1 - \exp(-\mu)] \delta(t_s) + P_E(E) \frac{\partial E}{\partial t_s} + \exp(-\mu E_m) \delta(t_s - 1) & 0 \leq t_s \leq 1 \\ 0 & \text{其余} \end{cases} \quad (13)$$

半色调透明片的振幅透过率  $t_s$  的平均值和标准偏差利用方程(13)式和  $\mu = 1/\bar{E}$  计算如下

$$\bar{t}_s = \frac{1}{E I_n E_m} \int_1^{E_m} (I_n E) \exp(-E/E) dE + \exp(-E_m/E)$$

$$\sigma_{t_s} = \left[ \frac{1}{E (I_n E_m)^2} \int_1^{E_m} (I_n E)^2 \exp(-E/E) dE + \exp(-E_m/E) - \bar{t}_s^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

在理想的数学对数变换情形, 对数函数应定义在曝光量的无限范围上, 并且方程(12)式应当由下式代替

$$t_s = I_n E / I_n E_m \quad \infty > E \geq 0$$

这时由于积分限  $(1, E_m)$  被  $(0, \infty)$  代替, 以及忽略  $\exp(-E_m/E)$  项, 方程(14)式被简化为较简单的形式:

$$\begin{cases} \bar{t}_s = \frac{I_n \bar{E}}{I_n E_m} - \frac{C}{I_n E_m} \\ \sigma_{t_s} = \sqrt{\frac{\pi}{6 I_n E_m}} \end{cases} \quad (15)$$

其中  $C$  是欧勒常数  $(0.577215 \dots)$

由这些结果可知:

(1) 除一个常数外, 表示信号的曝光量平均值被正确地 对数变换成振幅透过率的平均值。

(2) 振幅透过率的标准偏差是常数而且不再与平均值有关。

所以得出结论, 在斑点图样上信号和噪音的完全分离只能在具有无限动态范围的对数变换的情形下完成。这一动态范围当然是不可能实现的。

但是, 在一个物理上现实的系统中, 由于振幅透过率  $t_s$  只定义在 0 和 1 之间, 于是变换的动态范围是有限的, 我们应当再回到方程(14)式。用数字计算来分析, 在曝光量动态范围为 100:1 ( $E_m = 100$ ) 的对数网格板情形,  $\bar{t}_s$  和  $\sigma_{t_s}$  作为  $\bar{E}$  的函数的性质。图 8

是  $E_m = 100$  时, 计算机画出的  $\bar{t}_s$  作为  $\bar{E}$  和  $\sigma_{t_s}$  作为  $\bar{E}$  的函数曲线。由这个图可知, 在  $9 \leq \bar{E} \leq 90$  的区间上  $\sigma_{t_s}$  基本是常数, 并且  $\bar{t}_s$  正比于  $\bar{E}$  的对数。(注意曲线图是半对数的)。定性地讲, 在这个区间  $\sigma_{t_s}$  曲线与一个理想对数变换(即  $\sigma_{t_s} = \text{常数}$ )的偏差是 4%, 而  $\bar{t}_s$  曲线与相应于理想对数变换的直线之偏差只有 2%。考虑到相干光学处理的比较低的精度, 这些数字表明, 用这样一个网格板作斑点噪音处理实际是可能的。

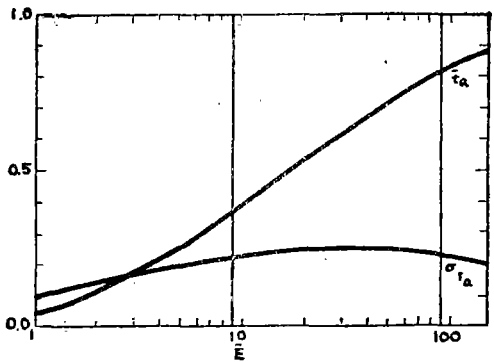


图 8  $\bar{t}_s$  作为  $\bar{E}$  和  $\sigma_{t_s}$  作为  $\bar{E}$  的函数曲线

我们从实际观点得出结论, 如果掩没在斑点噪音中的原始信号图样的动态范围等于或小于  $1 \log$  单位, 那么通过一个动态范围为  $2.0 \log$  单位的网格板作对数变换将成功地把噪音变成相加的, 随后就能用线性相干光学滤波来消除噪音。

为证明上述分析作了下面的实验。图 9 说明对斑点图样作对数变换的实验装置。一个漫射照明的相干物体的象直接投射到对数网格板上，然后投射到硬截止胶片上。放在频率面的孔是为了限制斑点图样的最大空间频率。显影之后，把对数变换的半色调透明片再放入一个相干光学滤波系统的物面以便滤掉噪音部分。图 10 表示实验结果。图 10(a) 是用作信号图样的交叉光栅，其密度动态范围从 0 到 1。图 10(b) 是淹没在斑点噪音中的交叉光栅，在图 9 所示的光路的象面上可观察到。我们用的对数网格板的动态范围是  $2.0 \log$  单位。图 10(c) 表示对数变换后的交叉光栅的滤波结果。滤波器是两个简单的在频率面的 X 和 Y 轴上的正交窄狭缝。为了比较，图 10(d) 表示线性变换的交叉光栅的滤

波结果。这时用的是同一滤波器。我们看到对数滤波在抑制斑点时是十分成功的，正如前面分析所指出的那样。

有可能解析地导出用于消除斑点噪音的线性最小均方差 (LMSE) 滤波器的传递函数，这要充分地考虑斑点的相乘性质。在我们实验中用的交叉狭缝和一个 LMSE 滤波器并不完全一致，因此我们的实验只证明了，就这个特殊物体和这个特殊滤波器而言，对数滤波优于线性滤波。但是，实验结果的确明显地说明，就抑制斑点噪音来说对数滤波优于线性滤波。最终的证明应当等待这个问题的一个较完善的研究结论。

已经考虑过几个对斑点噪音中的信号作对数滤波的特殊应用。这些技术可以用来增强在使用漫射物体的激光或全息干涉仪中的条纹清晰度。此外，我们已尝试对斑点噪音中的物体作匹配滤波探测，而且发现对数滤波优于线性滤波。但是为了简洁起见，这里将不讨论这些结果，而转到另一个有意义的应用对数滤波的领域。

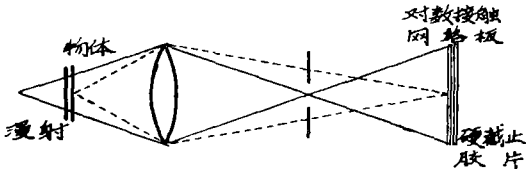


图 9 作斑点图样的对数变换的实验装置

## V. 射线照相的应用

用 X 射线或  $\gamma$  射线的生物医学成象提供了另一个可能的应用。例如，X 射线成象基本上包含各种吸收结构的乘积性相互作用。另一方面，在核医学上获得的  $\gamma$  射线象因为噪音大大地依赖于信号而遭到损害。

为了研究在这方面应用的可能性，我们尝试了一个专门的实验，即消除一个稳定格子在胶片一屏幕射线照片上留下的阴影。在医学诊断的 X 射线成象时非常重要是控制散射的二次辐射以便得到高对比和细节好的 X 射线照片。普通用来减小散射辐射的装置是一个用铅条做成的格子，它放在胶片一屏幕匣子的前面吸收从物体来的散射辐射。这样一个稳定格子给 X 射线照片留下一个相乘的阴影，它在观察象的细节时有很大的妨碍。普通实行的办法是在曝光时移动或振动

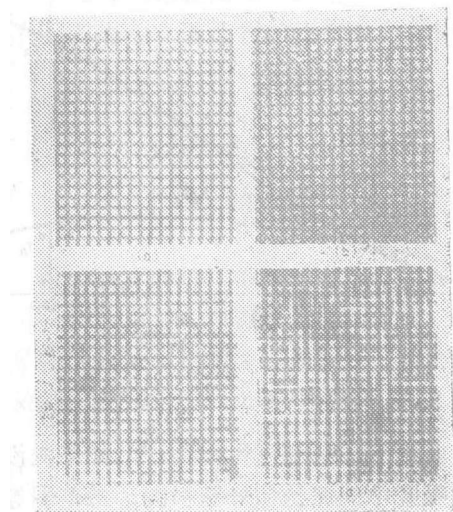


图 10 减小斑点噪音

- (a) 信号图样是交叉光栅。 (b) 有斑点噪音的交叉光栅。 (c) 对数滤波。 (d) 线性滤波。  
(所有照片都是正片)

这个格子，于是防止了铅丝阴影在X射线照片上的形成。不巧的是，这个作用有时是麻烦的，而且在许多情形下格子在曝光时不能移动。所以提出用对数滤波。

在将对数纲格板方法应用于稳定格子问题之前，必须考虑下面的问题。

### A. 问题 1

应当记住我们所用的对数纲格板的动态范围是有限的。理想地，一个稳定格子完全吸收了投射到铅丝上的X射线辐射，于是在格子的阴影中就没有辐射 ( $E = 0$ )，因此要求一个有无限大动态范围的对数变换。但在实际X射线照相时，格子阴影中仍然有少量的辐射，这是由于残余的散射辐射，也是由于在荧光增强屏上的散射。因为这个在阴影里的辐射取决于象周围的亮度，就可以把到达胶片面上的光能  $E$  写为

$$E(x) = \begin{cases} S(x) & \text{在铅丝之间} \\ \alpha S'(x) & \text{在铅丝之后} \end{cases} \\ \cong S(x) \times g(x) \quad (16)$$

其中  $S(x)$  是一个物体的 X 射线象， $\alpha$  是一个衰减因子 ( $0 < \alpha < 1$ )； $S'(x)$  是被减弱了的  $S(x)$ ；而  $g(x)$  是动态范围有限的格子，表示如下

$$g(x) = \begin{cases} 1, & \text{高透射区域} \\ \alpha, & \text{低透射区域} \end{cases}$$

所以，一个有稳定格子阴影的X射线象实际上动态范围是有限的，这就使我们能用对数板方法。事实是，用于实验的胶片一屏幕射线照片的密度动态范围是 1.8，它在我们的纲格板的能力之内。

### B. 问题 2

我们应当考虑只有X-射线象的谱和只有格子谱的情形。尽管象和格子是相乘的而且它们的谱是卷积的，通过简单的低通滤波可以把它们分开，只要格子的谐波频率与象的频谱范围相比高得多，以至相邻的谱点确实不会重叠。图11是光学方法得到的我们实验用的胶片一屏幕射线照片的傅氏谱。注意邻近谱点的重叠是轻微的，这正是许多诊断

用射线照片的情形，并且可以作简单的低通滤波，代价是高频有所损失。

但是，从以好的可靠性和高信噪比消除格子的观点看，对数滤波是合乎要求的。还应指出的是，如果这一对数滤波是有效的，而且如果格子阴影几乎能全部消除，我们就可以使用一个较低频率的稳定格子，和相当厚的铅条，以便通过高透射率和高散射吸收来获得较好的性能，同时更容易把格子制作好。

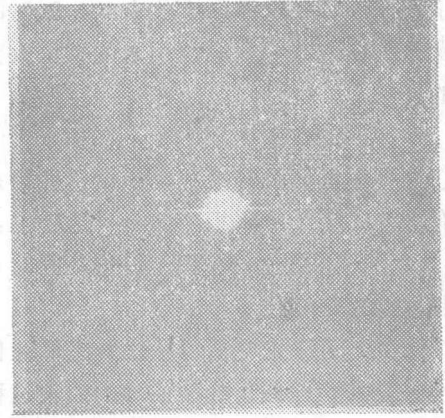


图11 原始胶片一屏幕射线照片的谱

### C. 问题 3

我们注意到用胶片一屏幕组合得到的射线照片包含大量的射线斑纹(mottle)，其基本性质是它与信号(象)有关。注意在图11中类似斑点的高频谱(H.F噪音)是由这些斑纹产生的。与胶片一屏幕射线照片的相干光学滤波有关的问题是，射线照片斑纹所带来的相位变化比振幅变化对谱有更大的影响。(记住，组合胶片一屏幕是两面都有乳剂的胶片，所以相位变化是普通单面乳剂胶片的两倍)。

例如，这种射线照片的低通滤波给滤波后的象一个低频斑点噪音而使象质变坏，因为斑纹作用同漫射体一样引入了相位变化。另一方面，因为斑纹有与信号相依赖的性质，一个高通滤波器仍能显示出象。

减小射线照片斑纹带来的相位影响的一

个方法是借助液体门。我们用实验核对了装有二甲苯匹配液的液体门对图11所示谱的射线照片的效果。测量了类斑点的高频(H.F)噪音的平均光强度,粗略地讲,谱上的75%的高频噪音被液体门消除了。

如拉伯特(Lamberts)所指出的,浮雕象和特徵(index)象相减地合成一个未漂白的照相乳剂的相位特性,并且它们不可能完全被液体门消除掉。虽然未曾测量这个特定情形下高频噪音的整个相位贡献,我们从液体门实验和拉伯特(Lamberts)的分析中意识到:在图11的谱上大约有80—90%的高频噪音是由射线照片斑纹引入的相位改变产生的。

在我们的实验中证明了,在相干光学处理之前把射线照片转换成半色调透明片是特别有利的,因为纲格板印制有下述特点:

(1) 这是一个非相干过程,因此对射线照片的相位变化不敏感。

(2) 可以把它看作一个具有低通传递特性以及具有硬截止脉冲成形的成象过程。这一过程大大减小了高频噪音。

(3) 它没有引入多余的胶片颗粒噪音,因为半色调透明片只有黑的和透明的区域,而没有灰度色调区域。(基本上没有胶片颗粒噪音)。

所以上述纲格板印制的特点可以说是对数纲格板方法的另一优点,否则就必须用一个麻烦的液体门去不完全地消除相位变化。应当注意的是,在我们的实验中确实不需要在对数变换的半色调射线照片的相干光学滤波时使用液体门。

#### D. 问题 4

注意我们能将对数变换直接应用到原始射线照片上,它是原始诊断信息的待处理的负片。原始X射线辐射的曝光量由方程(16)式表示,记录在X射线负片上,照片的强度透过率是 $T_s = KE^{-\Gamma}$ ,其中 $\Gamma$ 是组合胶片一屏幕的伽玛值,  $k$ 是常数。均匀地曝光(曝光量 $E_s$ )这个(负)X射线照片,并记录对

数板透过的光,就实现了对数变换。最终的半色调射线照片的振幅透过率是

$$t_s = \log(T_s \cdot E_s) / \log E_m \\ = \frac{1}{\log E_m} \{ \log E_s + \log k - \\ - \Gamma [\log S(x) + \log g(x)] \} \quad (17)$$

这个方程指出,象 $S(x)$ 和稳定格子 $g(x)$ 被变换成相加形式,对数板能够直接应用到(负)射线照片上。

基于上面的考虑,我们作了一个消除胶片一屏幕射线照片上格子阴影的实验。图12表示实验结果。图12(a)是用组合胶片一屏幕拍的头部的原始射线照片的相片。射线照片的密度动态范围是1.8,稳定格子的频率是80线/英寸。这个特殊的射线照片的傅氏谱已表示在图11上。实验用的对数纲格板的大小是13cm×18cm,纲格点是120线/英寸。把原始射线照片放大4倍,作成半色调透明片以便获得更细的象的选样。然后把缩小的射线照片的半色调正片插入相干光学滤波系统的输入面。图13是在傅氏面上观察到的对数变换X射线照片的谱。注意谱上的高频噪音消失,正如上面讨论所解释的。还注意到纲格点的高次谐波,在滤波实验中已把它挡掉,这里仍可看见。相干光学滤波时没用液体门。所用的滤波器是一些简单的吸收斑,这些吸收斑放在频率面上格子谐波的位置处。图12(b)是滤波结果。

为了比较,对原始(负的)射线照片作了滤波,使用同样的吸收滤波器,图12(c)表示这个结果。注意在图片上格子线条仍然可见,部分是因为两个谱是卷积的,部分是因为噪音(斑纹)与信号有关联。还注意到由于斑纹的相位变化,象上有斑点型的噪音。

我们尝试对原始曝光图样作了线性滤波(即对其振幅透过率线性正比于原始曝光量的透明片滤波),发现滤波结果大致与图12(c)一样不好。我们也尝试了对原始(负的)射线照片的简单低通滤波,体会到结果

还要差，这是由于低频斑点噪音和边缘扰动的原故，尽管格子线确实消失了。

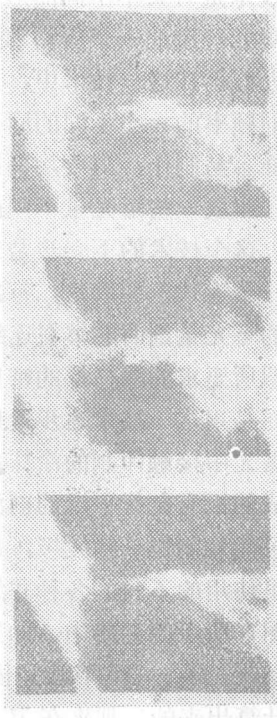


图12 消除射线照片上的格子

(a) 待处理的原始射线照片。(b) 对数滤波。(c) 原始射线照片的线性滤波。

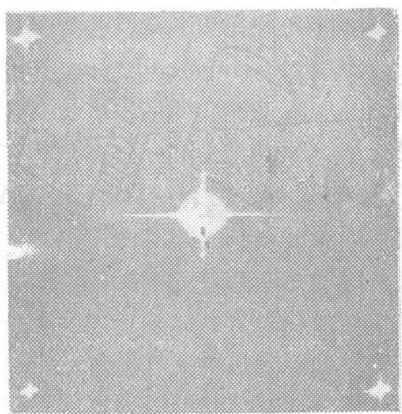


图13 对数变换的射线照片的谱

## V. 结 论

虽然本文的讨论集中于相干光学处理中的对数滤波，但是用网格接触板印制的非线性变换方法提供了许多可能应用，而且应当

继续探讨这个可能性。

关于这个方法应当注意一些地方。因为网格接触板印制是一个二维脉冲调制，在这个印制中象的可变换频率范围受网格点子的选样频率限制。如果象强度分布是用一个粗网格板不足选样的，所产生的多余谱就会使象质变坏并降低信噪比。所以无论何时应用这个方法，都应注意象谱的内容和网格板的选择率。

另一点是，为了用曝光量动态范围为  $E_m: 1$  的网格板对象作变换，就需要是没有网格板时的  $E_m$  倍那样大的曝光量。这个性质将是对网格板所能达到的动态范围的实际控制，虽然我们向往和要求实现一个有大动态范围的网格板。例如，要用一个动态范围为  $3.0 \log$  单位的网格板，所要求的曝光量就是没有网格板时的1000倍。但是在许多实际的象中，超过 2 个  $\log$  单位的动态范围很少见，所以有 2.0 个  $\log$  单位的非线性网格板就足够了，我们的对数网格板就是这样。

附录：非线性网格板点子的二维结构和这种板的制作。

正如在 II 节讨论的那样，方程(8)式所描述的非线性网格板点子的密度剖面确实没有指出点子的等密度线的二维结构，所以可以使用任意形状的结构。

要设计一个特殊点子的结构，我们首先画出在点子(方形)区域上的一组封闭线(即圆的椭圆的等)，再测量每条线所包围的面积  $a$ 。然后确定(例如从图 2 所示的那些关系)面积  $a$  上的密度  $D(a)$  并将它指定给各条线(等密度线)。图14进一步说明了这个手续。

但是在印刷工业中，一个方形点子和一串椭圆点子是最普通的形状，而最初它们是在各种照相条件下用一个古老的十字线玻璃板制造出来的。图15说明普通方点子的多少有些理想化的等密度线。用这些形状的点来制作我们的非线性网格板是合适的。图15的点子的三维显示是计算出来的，只要假定

普通方点子的理想等密度线即可。

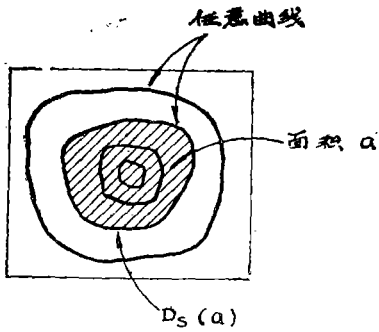


图14 解释点子的形成

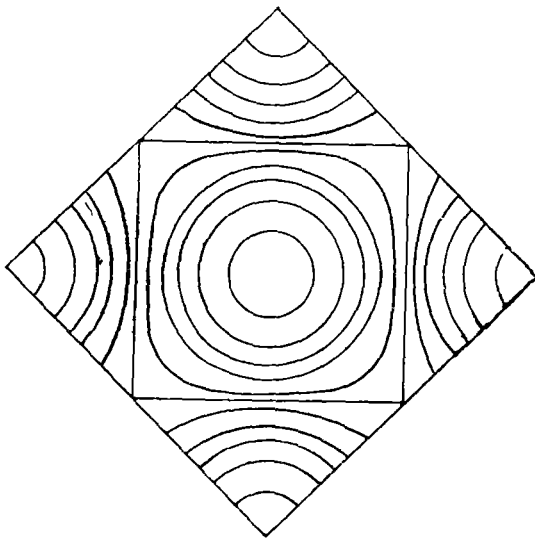


图15 普通方形点子

制作非线性网板板有各种各样技术。一个技术是，第一步单独放大一个有特殊等密度线结构的点子。其次把单个基本点子扩展为周期点子结构。最直接的方法是用一个步进一重拍相机，这时把单独放大的点子照相缩小并周期地重复制成一个板。一个针孔阵列相机，一个蝇眼透镜相机，以及用相干光学滤波的多次成象等都能提供简单而不同的

方法，把单个基本点子扩充为周期点子结构。

另一个技术是对大小不同而形状相同的点子作多次曝光，制成一个所需要的点子剖面的阶梯近似。在这一技术中，要制备一系列具有相同频率的大小不同的同形点子图样。这些图样容易制作，只要均匀照明一个商品网板，作成一些曝光量不同的网板透明板就行了。这个技术的下一步是用这些图样多次曝光一个连续色调胶片，每次改变曝光量使得总的曝光量剖面能够在连续色调胶片上逐步近似所要求的网板的密度剖面。虽然点子剖面是用这一技术逐步近似的，但是由于多次曝光中接触印制的涂抹(Smear)效果，所制成的板有良好平滑的剖面。

另一种可能是制作一维线板，这个方法对制作与这里使用的不同的各种非线性板特别适合。在图16所示的光路中，如果把一个二元掩膜放在  $P_1$  面上，其形状是依据非线性板的理论计算出来的，那么在  $P_2$  面上就能实现一个一维非线性网板。

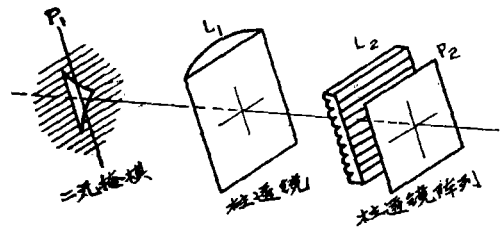


图16 线板的制作

译自“Appl. Optics” Vol.14  
No 8. p1813, 1975.

(速小靖译 苗寿树校)