

# 关于图象解卷积的复数空间滤波器

简介——评论用全息空间滤波校正图象畸变的原理和历史。考虑了探测前和探测后两种情况的滤波。评价复数空间滤波的这些应用和其它原理的应用，讨论了主要问题的范围和可能的解决方法。

## I. 引 论

自从第一次提出在透明板上记录纯粹的密度图样来制造任意的复数空间滤波器的方法，到现在已15年了。已研究了各种应用。本文叙述使用这种滤波器作图象解卷积。例如消除图象模糊。复数空间滤波器的原理应用分为三类：

1. 关于图象处理的匹配滤波，
  2. 关于图象译码的匹配滤波，
  3. 图象变坏的校正；
- a. 探测前滤波，
  - b. 探测后滤波。

自从 Vander Lugt 引进了关于图象处理的空间匹配滤波以来，它已有了非常引人注目的应用，并已成为普遍关心的课题。其它方面也是关心的课题，在某种情况下也是相当重要的。

## II. 历史背景

为图象处理和特征识别而研究的最普通的和完善的匹配空间滤波技术是众所周知的。我们从叙述另一些有关的方法开始，这些方法已提出了更专门的问题，但在它们大大限制了的范围仍然是成功的。

雷达问题，光学处理的实用性在1950年代就已完全证明了，我们还参予了推广这个已证明是成功的技术。匹配滤波器在雷达技术中起着重要的作用，而且很自然地出现了任意匹配滤波器如何用光学方法来实现的问

题。把信号与参考函数相乘，实现互相关运算的技术是充分掌握的(图1)。存储在一个透明板中的信号  $s$  和第二个透明板  $h$  相乘是把一个透明板向另一个透明板成象实现的，最后一个透镜积分乘积  $sh$ ，得到输出

$$X(x') = \int s(x - x')h(x)dx \quad (1a)$$

或

$$X(x') = \int s(x' - x)h(x)dx \quad (1b)$$

它依赖于透明板  $s$  放入的方式，变量  $x'$  是由一个透明板相对于另一个透明板的移动产生的。第一种运算是互相关，第二个是卷积。这样的运算可以用相干或非相干光实现。

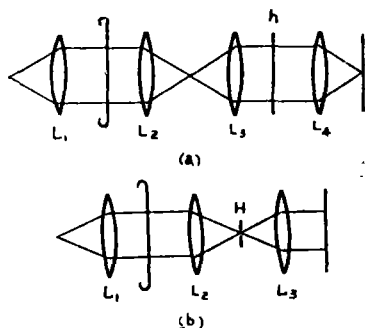


图1 实现卷积的两种方法。(a)互相关运算。(b)频域合成

另一种方法是所谓的频域合成(图1(b))，用同样的透明板  $s$  开始，但处理是不同的。光学系统是相干照明，付里叶变换  $S$  在透镜  $L_2$  的后焦面上形成。透射率相当于所要求的滤波器的传递函数的透明板  $H$  放置在该焦平面上；因此这个透明板右边的场是  $SH$ ，第二个透镜产生第二次付里叶变换，在像平面上得到光分布

$$X(x') = \int s(x' - x)h(x)dx \quad (2a)$$

另一方面,通过引入透明板 $H^*$ ,我们可以产生运算

$$X(x') = \int s(x-x')h(x)dx \quad (2b)$$

于是如同上述情况一样,可以建立互相关或卷积。导致(1a)和(1b)的第一种处理被称做空域综合,第二种是频域综合。

常常优先选择第二种,因为它不需要象前者那样移动信号透明板;在需要二维计算时这是一个重要的优点,因为通过在二维基础上的参考透明板扫描信号记录是相当麻烦和费时间的。

但是,频域综合的问题是如何实现复函数 $H$ 。对简单情况来说,过去已用多种方法实现了复函数 $H$ ,在它们的应用中这些方法受到一些限制。实现 $H$ 的位相下份的明显方法是造成透明材料的厚度以便产生所需要的位相变化,一般这是不可行的。

制造这样一个任意滤波器的问题成了一个很关心的课题。奇怪的是,虽然在那时离轴全息摄影是我们很熟悉的,但最初并没有考虑采用简单的全息摄影。

我们认为 C.J.Palermo 和 W.M.Brown 最早提出的一个建议,是要避开信号的位相下份而不是找出一个记录它的方法。假定我们对信号 $s$ 产生一个匹配滤波器;我们可把 $s$ 做成透明板。我们构成信号 $s(x-x_0) + s[-(x+x_0)]$ ,它是对 $x=0$ 对称的。第一项是移动的信号,因此它的中心在 $x_0$ ,第二项是镜象信号,中心在 $-x_0$ 。假定 $x_0$ 足够大以使这些信号不重迭。现在,如果 $s(x)$ 和 $S(f_x)$ 构成付里叶变换对,则:

$$\begin{aligned} s(x-x_0) &\leftrightarrow S(f_x) \exp(-j2\pi f_x x_0) \\ s(x+x_0) &\leftrightarrow S(f_x) \exp(j2\pi f_x x_0) \\ &= s^*(-f_x) \exp(j2\pi f_x x_0) \end{aligned} \quad (3)$$

也是付里叶变换对,因为对于一个实函数 $s$ ,关系式 $S(-f_x) = S^*(f_x)$ 成立,所以在第二个变换对中出现等号。因为一个实的对称函数有实的付里叶变换,因此对于实的 $s$ ,就有 $s(x-x_0) + s[-(x+x_0)]$ 的变换是实函数。因为函数 $s$ 有负值,我们加一个偏置

项,这个偏置项可以做为在 $x=0$ 处的轴上的 $\delta$ 函数(一个强点沉)来引入。于是我们构成了一个信号,它的付里叶变换是实的和正的,因此可以完美的记录在如照象胶片那样的光敏介质上。

由下面的考虑可以看到,这样的一个掩模的确可以用做信号 $s$ 的匹配滤波器。我们引进信号 $s$ ,在付里叶变换平面形成函数 $S$ ,经过在该平面上的滤波器透明板以后 $S$ 成为:

$$\begin{aligned} S(f_x) + S^2(f_x) \exp(-j2\pi f_x x_0) \\ + S(f_x) S^*(f_x) \exp(j2\pi f_x x_0) \end{aligned} \quad (4)$$

然后利用第二个透镜,它变换成:

$$s(x_0) + s^*(x_0) | \text{中心在 } x_0 + s \otimes s | \text{中心在 } -x_0 \quad (5)$$

这里 $\times$ 和 $\otimes$ 分别表示卷积和互相关运算。于是在输出平面(图1b)中心得到原信号,在中心的一边得到 $s$ 的自卷积,在另一边得到 $s$ 的自相关函数。如果我们选择 $x_0$ 足够大,这三项并不重迭。

记录函数的衍射图案的方法——即通过构造一个函数使得它的衍射图案是正的和实的——类似于布啦喇(Bragg) $x$ -射线显微镜原理。至于与记录复数场和非实数场有关的这种光学记录方案是否称做全息摄影也许是有争论的。但是无论如何,相似性是应该考虑的。

这个方案的一个问题是很难使信号 $s(x-x_0)$ 和 $s[-(x+x_0)]$ 精确相同。例如,记录图案的基片必须是一个不平度远远小于一个波长的很好的平面,而且必须调整的很好。然而,现在可以援引与全息术的相似性;两个信号中只有一个需要与偏置项一道使用。如果我们对信号 $\delta(x) + s(x-x_0)$ 作付里叶变换,我们得到强度分布:

$$\begin{aligned} |1 + S(f_x) \exp(-j2\pi f_x x_0)|^2 \\ = 1 + |S|^2 + S(f_x) \exp(-j2\pi f_x x_0) \\ + S^*(f_x) \exp(j2\pi f_x x_0) \end{aligned} \quad (6)$$

除了附加项 $|S|^2$ 外,它本质上是用实函数方法产生的,而 $|S|^2$ 这一项,正如全息工作

者所熟悉的，因为它的再现落在轴上，远离相关和卷积项，因此不引起危害。这个方法已被充分证明，是很令人满意的。

### III. 应用于雷达〈脉冲编码〉

上述原理对雷达数据处理问题的应用看来很有前途，选择的问题是用光学空间匹配滤波器压缩位移记录器的编码雷达脉冲。因为那时我们缺乏进行干涉术的仪器（例如，Mach-zehnder 干涉仪就很理想），因此决定在数字计算机上产生所需要的滤波器函数，然后把这个函数记录在摄影胶片上。这项工作是由 Kozma 和 Kelly 承担的。

另一个方法对于我们所选择的这个问题是很有吸引力的，因为位移记录编码总是在数字计算机的位移记录器中产生的，所以我们只能从计算机读出编码的付里叶变换而不是编码本身。更确切的说，若给出需要的编码是  $s(x)$ （+1的和-1的序列），计算机算出下列的变换序列，

$$s(x) \rightarrow S(f_x)$$

〔获得  $s$  的付里叶变换〕

$$\rightarrow S(f_x) \exp(j2\pi f_x x_a)$$

〔把谱加在复数载波上〕

$$\rightarrow S \cos(2\pi f_x x_a + \phi)$$

〔获取实数下份， $\phi$ 是由  $S = |S| \exp j\phi(f_x)$  定义的〕

$$\rightarrow S_b + |S| \cos(2\pi f_x x_a + \phi)$$

〔加偏置项〕

这个序列恰好是全息摄影过程所做的，并且最后那个函数是要记录的函数。

下一个工作是由计算机输出产生滤波器掩模。在计算机技术的早期阶段，还没有用计算机构造透明板的自动装置，所以用手工来制作掩模。有两个因素使这项工作容易做。第一，滤波器函数是一个变量的函数，而不是两个变量的函数。第二，可以取消灰度而对性能没有严重影响。这个优点来沅于脉冲编码的特殊性质，即，它的谱是比较平

的。从雷达系统的观点来看这个性质是合乎要求的，因为被压缩的脉冲是系统脉冲响应（点目标的图象），平滑光谱给出好的自相关函数，在主波瓣中没有精细结构。但是对于这个问题，平滑谱提供了一个副产品，即如果我们简单地去掉振幅下份  $|S|$  的话，由于做两级量化

$$S_b + S \cos(2\pi f_x x_a + \phi) \rightarrow S_b + K S_q [\cos(2\pi f_x x_a + \phi)]$$

$$K \text{ 是常数, } S_q(f) = 1, f > 0$$

$$0, f < 0 \quad (7)$$

即使滤波器构造工作更容易又不大大降低滤波器特性。正如 Kozma 和 Kelly 指出的，这样的量化结果使峰值信号对均方根值噪音比率只损失大约 2 分贝。

该滤波器是把类似于黑色玻璃纸的材料的板片胶合到硬柏纸的基片上制成的，然后分开成相当于滤波器函数的 +1 值（或 -1）的窄条。该掩模然后被照像缩小，用做空间匹配滤波器（图 2）。正像试验结果表明的，处理做的非常之好。

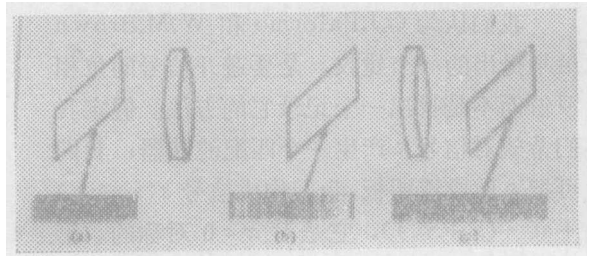


图 2 压缩编码脉冲的空间匹配滤波器系统。(a) 模拟信号。(b) 空间滤波器掩模。(c) 处理后的信号，在被压缩脉冲的左边显示出来。

在 1961 年完成的这项工作，作成了在当时能制作出的最完善的空间滤波器，这无疑是在六十年代光学领域中的主要成就之一。不巧，因为军事的保密，一直到 1965 年它才公开发表。在这段时间里它的成就，下份的被当时发表的更完善的结果所遮盖。此外，这个方法是一个很实际的方法，是随着现存的问题发展起来的。

我们在译码范畴中考虑的这个应用，也可以认为是图象解卷积的一种，与普通型

式不同的像差是通过编码过程而巧妙地引进的。

#### IV. 应用于雷达〈象差补偿〉

上述工作的成功促使我们去探求空间匹配滤波器技术可以应用的新问题。在综合孔径雷达领域中找到了这样的问题，所得到的全息复数空间滤波器，虽然是很简单的，但对极不同的问题已证明是一种很有吸引力的解决方法。

在综合孔径雷达系统中〔图 3〕一个飞机载运一个小天线。在沿飞行轨迹的不同的位置上发射脉冲并存储从目标场反射回来的辐射能。对记录的数据进行合适的处理，沿着  $x$  方向〔以后叫做与射程垂直的方向〕的分辨率被极大的改善。系统的孔径，不仅仅是小天线的尺寸，而变成这样一个区间，在这个区间上收集和来自每一个点物体的数据。好像有一个比实际情况大许多倍的天线孔径，因此叫综合孔径。

在垂直于飞机飞行轨道的方向（图 3 中用  $y$  标注）上分辨率利用脉冲得到。为了后面的处理而接受和存储这些脉冲，所接收到的脉冲可以设想为沿飞行轨迹而搜集的波场的抽样。相继的脉冲以适合于下述光学处理的形式并排地存储在摄影胶片上。

引起象差的原因是因为从天线到目标的距离随飞机的飞行而改变。广泛地说，我们看到综合孔径的所有单元到目标点不是等距离的。因此，对孔径的不同部份，发射的脉冲往返一次的滞后是不同的。如果射程的改变与由脉冲提供的射程分辨率比较是很小的，这个影响是可以忽略的。一般都是这种情况。然而，在精细分辨率系统中，射程的变化可以超过射程分辨率。这个影响限制了在射程和垂直于射程方向可以达到的分辨率的精细度。

图 4 描写了一个点目标的模拟信号。信号有两个主要问题。第一，信号有精细结构，

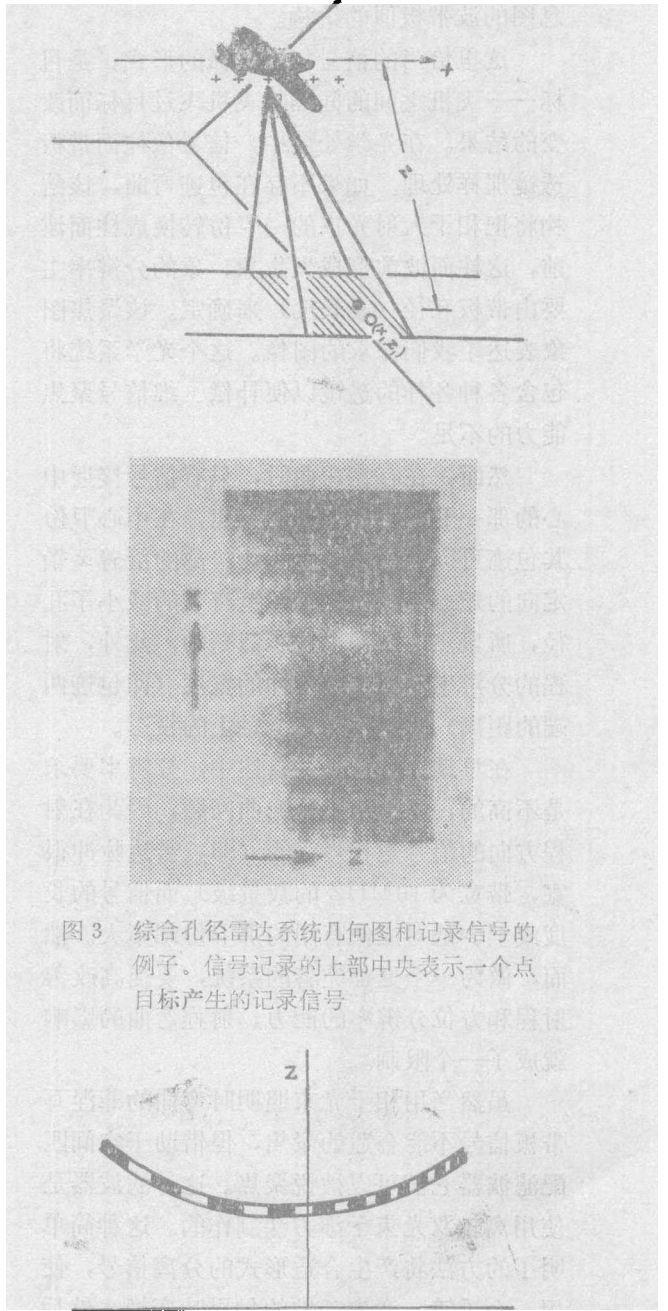


图 3 综合孔径雷达系统几何图和记录信号的例子。信号记录的上部中央表示一个点目标产生的记录信号

图 4 对于未编码脉冲，说明像差的模拟信号。注意这是模拟于图 1 所实际记录的信号的；在手画的信号中，用类似于弧的包迹所表示的像差相当大的被夸大了。

空间频率沿着所记录的信号的长度线性地变化；这个结构表示当飞机飞过目标时多卜勒

频率的变化。如果我们把综合孔径过程比为全息照象，则这是一个表征一个点目标的全息图的波带板似的结构。

这里恰当的信号包迹是弧的形式，是目标——飞机之间的间隔随飞机飞过目标而改变的结果。在光学处理中，信号像柱面透镜那样处理。如果不存在包迹弯曲，该结构将把相干入射光束的一部份转换成柱面波前，这柱面波前形成聚焦象，象的分辨率主要由带板孔径（或长度）来确定。该聚焦图象表达了我們探求的图像。这个光学系统将包含各种各样的透镜以便补偿  $y$  维信号聚焦能力的不足。

然而，在存在弯曲时，只有信号接近中心的那一部份可以合适的聚焦，在中心部份其包迹可以近似为一个长的，薄的沿着  $x$  轴定向的矩形。于是带板透镜有效的减小了孔径，所聚焦的图像也是不清晰的。此外，射程的分辨率，而不是脉冲的宽度（即包迹两端的距离）将是包迹在  $y$  轴上的投影。

在早期的综合孔径雷达中，分辨率要求是不高的，不出现射程弯曲问题，因为在射程方向的信号是相当宽的（即，雷达脉冲很宽，带宽为 10MHz 的数量级）而信号的长度或至少是对成像有用的那部份却不大。然而，做为一个更加完善的系统，要提高改善射程和方位分辨率的能力，射程弯曲的影响就成了一个限制。

虽然当用相干光束照明时弯曲的非涅耳带板信号不能合适的聚焦，但借助于空间匹配滤波器它们可以被锐聚焦。这种滤波器是使用离轴双光束干涉方法制作的。这种简单明了的方法将产生合适形式的分离信号，使用一个透镜，产生二维的付里叶变换，然后用一般的全息照像记录这变换。那时，我们缺少分束器和干涉术的其它仪器，所以我们寻找可以成立的任何简化。对滤波器的波带板结构的补偿不需要包含在匹配滤波器中，因为波带板的自然聚焦特性将达到把信号压缩为精细聚焦图象所希望的效果，或换句话

说，自由空间本身实际上是一个波带板结构的匹配滤波器。这个匹配滤波器只需要对信号的包迹部份构成。此外，我们只需要形成一维的付里叶变换。

该处理的数学如下。令我们需要的匹配滤波器的弯曲包迹函数是：

$$g(x, y) = \text{rect} \left\{ \left[ \frac{y - y_1}{y_0} - \frac{1}{2} \frac{(x - x_1)^2}{y_1} \right] / y_0 \right\} \quad (8)$$

这里  $x_1, y_1$  决定信号的位置， $y_0$  是沿着  $y$  方向的信号的宽度（图 4）。在  $y$  方向的付里叶变换产生

$$g(x, f_y) = \text{sinc}(y_0, f_y) \exp \left\{ -j2\pi f_y \left[ y_1 + \frac{(x - x_1)^2}{2y_1} \right] \right\} \quad (9)$$

这一信号被记录为全息图，并且在全息图形成的过程中，这个信号的复数共轭也形成。

构成滤波器的光学系统如图 5 所示。信号在输入平面上上表示为弧形。参考信号由输入平面上恰好位于弧缝之上的直线狭缝提供。柱面和球面透镜的组合产生一维的付里叶变换，然后这个变换被记录为全息图，如图 6 所示。

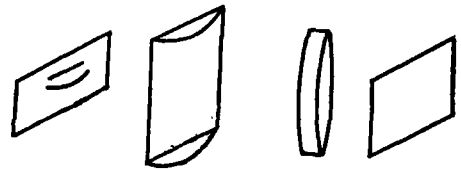


图 5 产生射程弯曲校正滤波器的光学系统。在输入平面，掩模包括如图所示的一个直线狭缝和弯曲的狭缝。这个组合在垂直方向被付里叶变换。

为了用匹配滤波器压缩显示有射程弯曲的雷达信号，采用如图 7 所示的系统。如图所示，信号在输入平面被引入。柱面——球面透镜组合产生所要求的输入信号的一维付里叶变换，然后与滤波器透明板相乘。按照这个乘法，所需要的在  $f_y$  方向的付里叶变换是由第二个球面透镜产生的。对于  $x$  方向，我们需要压缩信号。对于图 6 中使用的模拟信

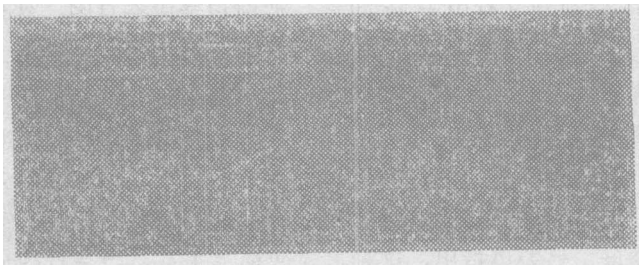


图6 构成滤波器过程。左边是信号和参考函数，右边是空间匹配滤波器

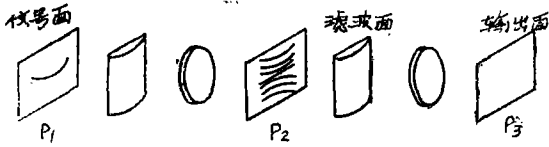


图7 匹配滤波器的使用。顶部是压缩信号的光学系统。 $P_1$ 是模拟信号， $P_2$ 是滤波器， $P_3$ 是像。

号，不是波带板结构，因此沿着  $x$  方向的压缩是通过用同样的透镜完成的简单付里叶变换完成的。因此在过滤器和输出之间没有使用柱面镜。图7所示的试验结果证实了该技术的有效性。

要应用一个由雷达得来的实际信号，我们当然要考虑到沿  $x$  方向的波带板特性，波带板特性总要改变沿  $x$  方向的聚焦，使得这个焦点聚焦在最后透镜后焦平面稍向外面的位置，在这个位置信号在  $y$  方向的聚焦是锐的。放在过滤器和输出平面之间的弱光焦度的柱面透镜可以完成这一点。在实际情况中，射程校正滤波器系统完全可以结合到补偿波带板信号特性以及补偿波带板特性随着雷达到目标的射程而变化的光学系统中去。使用锥透镜或倾斜元件执行这项工作的各种光学系统已经有过描述，不在这里赘述了。

我们已经叙述了克服综合孔径雷达技术中很困难的问题的较简单的技术。无疑，该技术对全息匹配滤波器是最实际的应用之一。注意，我们已把它作为探测前的滤波技术来描述了，虽然它也被应用于探测后的信号。因为在这种情况下信号被相干探测，保

存了位相，因而这个过程本质上是探测前的一种情况。

通常在综合孔径雷达系统中，发射的脉冲不是一个简单的，窄的脉冲，而是一个相当长的编码脉冲，并在接收机中被压缩。这项技术统称为脉冲压缩，对于达到高平均功率来说，是一种很重要的和广泛实用的方法，因此有远射程能力而不损失分辨率。最常用的波形之一是 chirp 脉冲或被调制的线性频率。在综合孔径雷达系统中，压缩一般是用光学方法实现的，正如我们刚才描述过的，这种压缩做为在沿轨迹或  $x$  方向产生改善的分辨力过程的一部份。

当发射的脉冲是 chirp 类型时，从一个点扩散体形成的被记录的信号是一个二维的菲涅耳波带板，而不是我们以前所说的一维波带板。倘若信号在  $x$  方向是长的，同样的射程弯曲变化将象以前一样出现，而所记录信号的顶上和底下边界将有同以前的弯曲。但是，因为信号的宽度（在  $y$  方向的大小）现在变大了几十或几百倍，这个弯曲几乎不显著。而以前，我们使之与点沉的被记录的信号内接的最大矩形忽略了脉冲的重要部份，而现在这个最大内接矩形仅仅忽略了脉冲的一小部份。我们可以假定，现在已不出现射程弯曲问题了。

正如我们以前表明的，情况不是这样，这个问题完全象以前那样大，但它现在采取了不同的形式。这个缺陷在信号包迹中已不再出现。而现在它表现为记录的波带板中的一个像差项。如前所述，记录的波带板有以

注：图7下面的图省略的象

$x^2$  项表示的位相项；它现在又有由于脉冲 chirping 引起的以  $y^2$  项表示的位相项。以前产生弯曲包迹的同样的射程变化现象现在产生一个交叉乘积项,即形式为  $xy$  的项。这一项导致和前叙完全相同的图像变坏,分析表明,这样的缺陷可以用我们以前描述过的同样的匹配滤波器校正。另外也指出,这种滤波器校正这两种形式的任何一种射程弯曲缺陷。

射程弯曲滤波器已被许多人更深入地研究了,包括 C.Aleksoff, J.Marks, G.Adams, 和 N.Massey。为校正这个缺陷已用更新更成熟的方法制作匹配滤波器。

复数空间滤波的这种应用,例如位移记录器序列脉冲的译码,是较专门的一种应用,而产生这种滤波器所用的方法同样也较专门化了。但这些应用是重要的,并且这些方法也很适合于问题。每一个应用都有些偶然性,在这些应用中,允许在滤波器的制造中有某些重要的简化。在脉冲编码方法中,正如我们所指出的,所需要的滤波器的一维性以及相对来说不太重要的振荡成份允许用较简单的设备用手工比较容易地制作滤波器。同样的,射程校正滤波器的奇异特性允许用简单的方法制做它们。在每一种应用中,这些滤波器也很好用。从我们的观点出发,这些应用的存在是重要的,因为在那时,无论是构造滤波器的计算机或是构造滤波器的干涉术所用的仪器都是有限的。计算机是处在相当原始的状态,计算机的绘图能力就更有限了。同样,我们只有很少的干涉术仪器。因此,这两个应用没有想到,这些复数滤波概念的实现在被推迟了。

## V. 透镜像差校正

探测前图像校正的第二个应用是透镜像差的全息补偿。我们证明了这项技术,用发自相干光沉的平面或球面波前照明一个有严重像差的透镜,并把来自透镜的有像差的

波前记录成全息图。然后,我们把透镜和全息图一起作为一个成像系统使用,透镜提供光焦度,全息图用作为改善透镜性能的校正板。当然,这种用法,需要全息图的共轭波。

如果全息图在照明光沉被聚焦的平面上形成,则全息图记录透镜像差函数的付里叶变换。于是,当全息图放回这个平面时,就成为关于透镜缺陷的匹配空间滤波器。如果全息图不是在付里叶变换的平面上形成,我们多半把这个全息图叫做校正板,并不涉及空间滤波的概念。尽管如此,由透镜和校正板串联组成的整个系统,可以利用传递函数来描述,校正板贡献传递函数的一部份,并且即使它不是位于所谓频率或付里叶变换平面上,至少在数学上也能把它设想为空间滤波器。在这种情况下,校正板对系统的传递函数产生空间的不同效应,对目标场的不同部份,它的影响是不同的;然而,对场的任意小的,等晕区域来说,校正板的效应总是滤波器的效应。另一方面,校正板可以认为是一种全息光学元件,属于全息学的稍有不同的范畴,并且是最重要的一种。

产生全息图的系统如图 8 所示。用一个

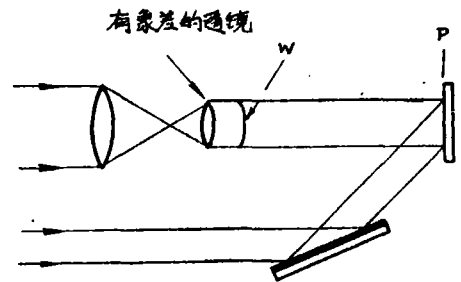


图 8 产生校正板全息图的光学系统

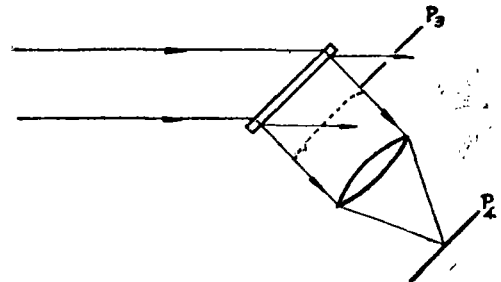


图 9 与透镜组合的校正板的应用

有象差的透镜使单色点光沉准直。透镜球差产生不规则波前 $W$ 。一个与提供给透镜的光相干的准直光束被引向透镜附近并与来自透镜的有像差的光束干涉。为了做校正板使用〔图9〕,全息图相对于透镜的位置要和它被产生时的位置一样。发自目标的光被全息图光栅衍射,合适的衍射级次通过透镜,没有球差的图像被这个组合系统形成在 $P_4$ 面上。

波前的位相缺陷就是波前与高斯参考球的偏离量。向透镜提供的点光沉位于透镜的前焦平面上并不是必需的。如果不是这样,从透镜来的波前对于一级近似来说是球面的。弯曲将记录在全息图上,于是给出了它自身的光焦度。为了避免这一点,修改参考光束使其曲率等于像差波前的曲率。于是,两光束的弯曲相抵消,只有像差记录了下来。另一方面,有时希望这个板把一些光焦度贡献给成像系统。

图10表示一个粗劣透镜的轴上点扩散函数。也表示了把全息图校正板与透镜组合使用时的扩散函数。未校正的扩散函数有2mm直径,校正器扩散函数有 $5\mu$ 直径。校正透镜几乎产生衍射极限的轴上响应。

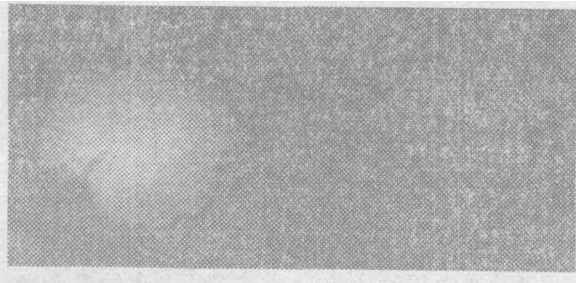


图10 左边是透镜自身的点扩散函数,在同样的放大率下,右边是透镜和校正板一起使用时的点扩散函数

图11(a)和(b)表明只用透镜,以及透镜和校正板一齐使用时成像透明板的效果。光源是工作在 $6328\text{\AA}$ 的气体激光器。由于一个在光沉和透明板中间的旋转毛玻璃板,光沉变成空间非相干光。注意,虽然这个板是用相干光制成的,但可以与非相干光一起使

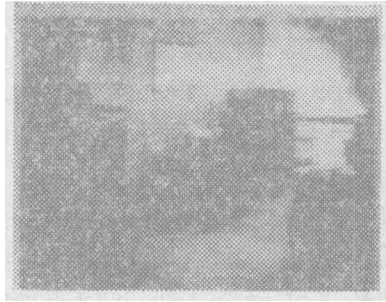
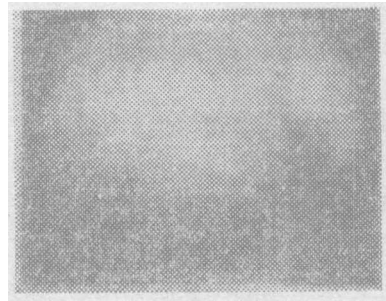


图11 透明板的像。(a)只用透镜的情况。(b)透镜和校正器板一起使用的情况。

用,只要是单色的。球差的效果是产生一个减小图像对比度的环境背景。显然,在校正后的图像中这个缺陷完全被消除了。

记录全息图的板应该是光学平面以便它不引进自身的位相缺陷。一般已知道玻璃基片引进一个或两个条纹的位相误差,但乳胶在这方面是更为麻烦的。

这个方法的优点是它在效果上产生一个任意形状的非球面。这个自动产生的有效表面,正好有完成赋与它的目的的正确形状。不需要进行计算,简单的拍照干涉条纹图案就行了。

这种板有一个缺点,即它通常必须在单色光中使用,因为该板实际上是一个衍射光栅,因而是高色散的。这样的色散可以通过使用棱镜或其它光栅部份的校正,但这些方法有它们的缺点。可达到的范围也被缩小,因为不同的衍射级次不许重叠。

全息图校正板本质上将找到和 Tsujiuchi 给出的技术的同样的应用, Tsujiuchi 建议在光谱的红外和紫外部份使用它们。

## VI. 探测后处理

刚才描述的象差校正系统对一个向探测器传播的光场起作用。其目的在于当光场到达探测器时场中的缺陷就被校正，并形成满意的图像。另外，有探测后的处理方法，它对已经记录下来的图像起作用，它的目的是把图像恢复到没有缺陷时它应有的状态。这样的工作要比探测前的处理困难得多，并且结果不太理想，因为波前的位相在探测时损失了。然而，如果被探测的图像完全是一个正在用来工作的图像，则位相校正板的选择是不可能的。

许多作者已叙述过用光学处理方法复原退化的图像。我们这里只涉及全息方法。这个领域是 Ansley 等人在1965年开辟的。最近Stroke和他的同事继续研究这种方法，得到一些有意义的结果。

Ansley 和他的同事考虑了经历畸变然后又因附加噪音退化了的信号的恢复问题。关于信号变坏和复原过程的模拟图如图12所示。这里的目的是恢复原来的，未退化的信号，即量  $s_0(x, y) - s(x, y)$ ，或它的某个函数要减到最小。 $s_0$ 是被复原的信号， $s$ 是原来的，未变坏的信号。

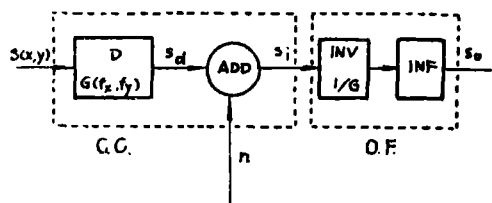


图12 探测后图像复原的模拟图。用点线表示的框子C.C.是通讯通道，O.F.是校正畸变的光学滤波器。D是畸变过程，有传递函数 $G$ ， $s_d$ 是畸变信号， $s_i$ 是信号 $s_d$ 被来自加法器的噪音所恶化后的信号， $INV$ 是逆变器，有传递函数 $1/G$ ， $INF$ 是一个无限大滞后滤波器。

他们对复原处理所考虑的滤波器是：

$$F_{opt}(f_x, f_y) = G(f_x, f_y) \left[ \frac{|s(f_x, f_y)|^2}{|s(f_x, f_y)|^2 + \frac{|N(f_x, f_y)|^2}{|G(f_x, f_y)|^2}} \right] \quad (10)$$

其中

$F_{opt}$  是复原滤波器。

$G$  是畸变过程的付里叶变换。

$S$  是未变坏信号的谱。

$N$  是噪音谱。

第一个因子， $1/G$ ，是校正畸变的逆滤波器。第二部份（在括号中）是一个无穷大滞后平滑滤波器，是为了从噪音中取出校正畸变的信号而设计的，因为噪音是从 $1/G$ 滤波器来的，因此噪音的谱是 $N/G$ 。

(10)式的研究说明，对于大的信噪比，滤波器近似地是一个纯粹逆滤波器 $1/G$ 。另一方面，随着信噪比变得很小时，滤波器成为

$$F_{opt} = |S/N|^2 G^* \quad (11)$$

第一个因子是振幅权重函数，第二部份是匹配于畸变过程的滤波器。最后，做为一个近似，他们研究了纯位相滤波器

$$F_{opt} = G^*/|G| \quad (12)$$

Ansley 等人专心于逆滤波器。他们假定，做为一般情况，畸变脉冲函数  $g(x, y)$  可做为透明板来得到。用全息法记录付里叶变换产生滤波器函数  $G^*$ 。它有所要求的位相，但没有合适的振幅，振幅应是  $1/|G|$ ，不是  $|G|$ 。这样产生逆滤波器的位相部份是很容易的，但振幅部份不太容易获得。他们考虑的一种技术是明显的，即，做为一个辅助镀层，使用分开的，纯振幅滤波器。当然，只要你足够刻苦，这总是可以做到的。

但是，他们设想了一个更巧妙的方法。代替通常用的比信号光束强的光束做参考光束，他们用更弱的光束做参考光束。分析说明，对于合理的近似，得到的滤波器函数变成

$$G^*/|G|^{(\gamma+2)} \quad (13)$$

和实际值差一个常数，这里  $\gamma$  是记录胶片的  $H-D$  曲线的斜率。对于低对比度，上述表达式成为逆滤波器。从定性的结果很容易看出这个结果的合理性，由于考虑到当曝光的光是信号光束占优势时，强的信号光束将使

胶片过曝光，因而产生一个低的透过率，因此在光分布较强的区域衍射效率降低。Vander Lugt 使用了同样的技术，但是目的不同；即，他是为了增加用于特征识别的匹配滤波器的灵敏度。

而且 Ansley 等人观察到，许多光学系统的畸变函数都是对称脉冲函数，其结果是有实传递函数。因此，逆滤波器是实的，不是复数的，虽然通常它将有负值，意味着  $180^\circ$  的位相移动。Ansley 等提出了使滤波器有  $180^\circ$  位相移动的下述方法。首先，需要的位相函数（二元的，有  $0^\circ$  和  $180^\circ$  位相）是绘制出来的，这个图形的面积一半是黑的，另一半是白的。然后把图形用照像法缩小，并用精密的方波光栅复盖，再把合成图像记录在干板上。曝光以后，把光栅精确地位移了  $1/2$  个光栅周期，用这个图形的互补片，或负片来替换它，并进行第二次曝光。这个板上第一次没有曝光的面积（即，对着传递函数掩模不透明部分的面积）现在被曝光了。但第二次曝光用的光栅函数或载波相对于第一次曝光有  $180^\circ$  的位相差。这个方法是从 Hank 和 Lohmann 很早就使用的技术联想到的。这个结果是很清楚的，低噪音，高对比度的空间滤波器。

实验结果示于图13到16。没有畸变的图像是一个窄的狭缝，畸变图像是模胡的，例如是在曝光期间图像做线性运动引起的。这一模胡图像如图13(a)所示，而校正后的图像在图13(b)中示出。滤波器是用干涉法制成的，使用的信号光束比参考光束强。信号波是  $2.5\text{mm} \times 10\text{mm}$  的矩形，表示一条  $10\text{mm}$  直线，这条直线已因在记录期间的  $2.5\text{mm}$  的移动弄模胡了。正如理论上所要求的，滤波器是由  $2.5\text{mm}$  狭缝制成的。模胡与不模胡图像大约是  $20:1$ 。

使用光栅方法重复这个实验。图14说明二元滤波器函数，因为模胡函数（矩形）的付里叶变换是一个  $\text{sinc}x/x$  函数，则所需要的二元滤波器函数是：

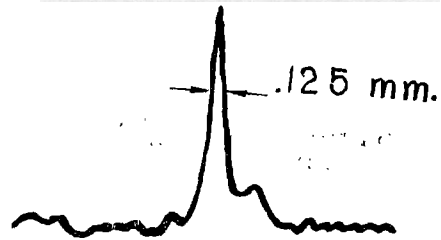
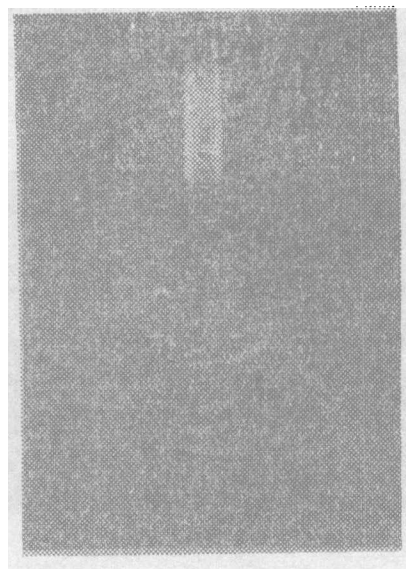


图13 全息滤波器的试验结果。(a) 模胡的图像。(b) 恢复后的图像。还表示了恢复后图像的光度追迹。

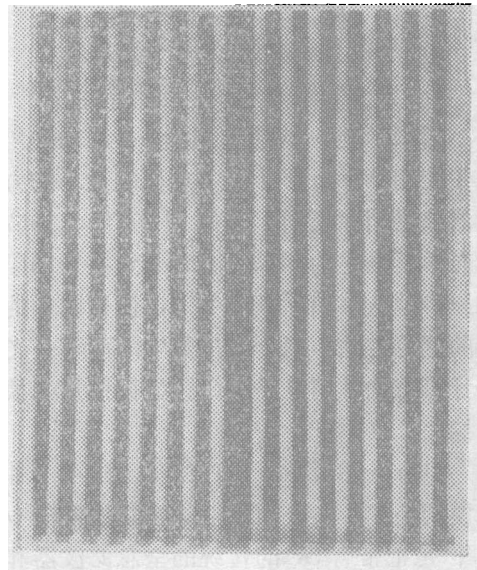


图14  $\sin ckf_x$  函数的二元位相图样  

$$\sin ckf_x / |\sin ckf_x| \quad (14)$$

$K$ 是由模胡宽度确定的。所得到的滤波器如图15所示，消模胡的函数的光度追迹如图16

所示。把这个追迹与干涉产生的滤波器的追迹比较，我们看到在前者上无关的影响很小。

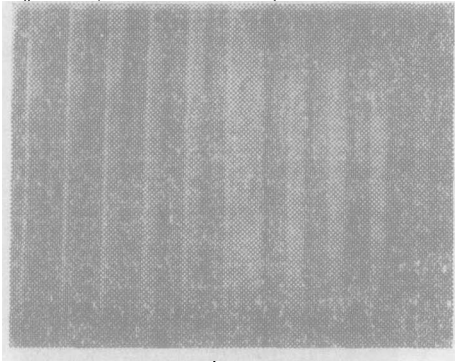


图15 位相调制的载波滤波器



图16 恢复后的图像的光度扫描，使用的是图15的滤波器

后来，同一小组的 Horner 在1969年发表了使用 Wiener-Hopf 理论的最小均方空间滤波器消除模糊，正如 Helstrom 1967年对光学所描述的那样。Ansley 在1973年更进一步地从事消除模糊处理，使用同样一般的理论方法，但，是用数字的而不是光学的计算方法。用电子显微镜显微照片来模拟目标。

Storke 和 Zech 在1967年叙述了一种消除模糊处理，该处理中消除模糊滤波器  $G^*/|G|^2$  是把带有  $G^*$  的全息滤波器和仔细控制胶片伽玛值得到的密度掩模  $1/|G|^2$  重叠起来实现的。这项工作在许多成功的文献中得到进一步的发展，它介绍了一些其它消除模糊方法并提出了多方面的应用。主要

应用是校正用电子显微镜拍摄的照片中的缺陷。因为这个工作在许多地方已详细的讨论了，这里就不再进一步叙述了。

## VII. 关于这四个方面的评价

我们前面列举的关于复数空间滤波器应用的四个主要方面——图像译码，探测前滤波，探测后滤波，和图像处理——除了最后一项外现在都已讨论过了。图像处理虽然不是我们的主题，也包括在我们的评价里。当然，它是已知的应用中最好的，并且已有了详细地描述。全息匹配滤波器在字母数字的探测中和在辨认复杂的目标，例如在包含有十分复杂背景的照像透明板中的汽车，已给人们留下了极深刻的印象。

关于这四个方面的远景是什么呢？在所有这些方面的主要竞争者是数字计算机。与数字计算机比较，光学方法有下述优点：

1. 计算是并行进行的，因而是较迅速的。
2. 经济上便宜得多。
3. 它可以对整个图像进行运算而不必把它数字化。

另一方面，光学系统也有下述缺点。

1. 输入和输出一般是慢的和麻烦的。
2. 较少灵活性，因为我们被限制作线性变换，并且程序变化是缓慢的。
3. 重复性不好，并且结果的质量很大的依赖于操作该系统的工作人员的熟练程度。
4. 在光学处理中的相干噪音可以使结果变坏。

射程弯曲滤波器，虽然是最早应用的一种，也仍然是最好的一种，或许它也是可以经得起与数字计算机竞争的所有滤波器中最好的一种。在这种情况下光学处理的实力增加若干倍。

1. 需要的算符是线性算符，最适合于光学处理。

2. 对于任意复杂的目标, 若用数字方法计算是较冗长的, 费用较高。

3. 取自综合孔径雷达的数据通常总得用光学方法处理, 所以用光学方法进行附加的, 射程弯曲校正运算时不会引进光学方法的任何缺点。至于这些缺点存在的范围, 已经介绍过了。

4. 因为光学处理必须要作, 执行附加光学运算基本上不花什么成本, 因为其中不包含附加的运算时间, 并且需要的附加光学元件很少。

全息图做为校正板使用是一个较广泛的使用法, 它很可能有好的前景。首先, 校正板既可以用非相干光照明, 也可以用相干光照明, 只要光谱带宽不是太大。第二, 校正板在波场中使用, 在这里计算机是无法尝试的。

关于探测后的处理, 予测是贫乏的, 尽管它到目前是成功的。相干成像过程中透加上的噪音, 为了改善分辨力一般要付出很高的代价。光学处理的相对的不灵活性也是一个严重的障碍。我们可以想像必须对大量变坏的照片执行同样滤波处理的情况, 在这种情况下, 光学方法与数字方法比较将有费用很低的优点。另外, 许多减少相干噪音的多余信息技术能改善处理图像的信噪比, 于是进一步倾向于光学方法的优点。然而, 这些考虑是否将成为主要因素, 仍待以后证明。

图像译码, 例如由脉冲编码雷达系统获得的数据的解卷积, 已经大大失去了它初期的希望, 虽然我们对复数空间滤波的原始应用曾有过这种希望。在综合孔径雷达中脉冲编码一般是 chirp 型的, 译码这种波形不需要空间滤波器, 因为这样编码的信号变成了菲涅耳波带板, 有它们自身的自聚焦能力, 在其它类型的雷达中, 编码脉冲也常常使用, 但是数字计算机很适合于这种应用。

关于特征识别和图像处理应用, 这种情况在一方面是与探测后复原应用极不相同的。在这个应用中, 在背景上的一个目标

被认为是信号, 而其它的任何东西都认为是噪音。于是噪音是占优势的, 而由相干照明产生的附加噪音与之相比是可以忽略的。匹配滤波处理把信号提高到远高于噪音背景的水平, 而噪音的很小的百分比的变化几乎可以不必注意。因此, 在探测后复原处理的光学方法的主要困难之一在这里基本上消失了。

光学实现的最大问题是非线性技术好像更加合适, 而光学系统实际上被限制为线性运算的。另外, 匹配滤波器对不变化的目标是极好的, 但对于在大小, 纵横比, 取向或其它一些普通的方面可以变化的目标不大合适。最后, 在目前它只接受透明板, 在一个漫反射表面上印刷的信息对于大多数已研制的, 相干光学处理方法是合适的。某些特殊的应用是可能的, 例如在目标是由给定铅字盘的字母数字所组成并已存储在透明板上时。显微胶片对于相干光学处理系统是一个有希望的领域。

## Ⅷ. 减小噪音

对于图象复原这样的目的, 相干噪音的减小是很重要的, 全息滤波器方法对于这种应用的成功可以想象是依赖于为这种减小所研制的有效的和实际的方法的。

最近论证的一种方法是减小光沅的光谱的或时间的相干性。这种减小在制造和使用滤波器中是有用的。相干性越低, 噪音越小。遗憾的是, 这种方法只给出了有限的改善, 并且有缺点, 需要很小心地进行系统的调整。

为了制造一个, 比如说字母  $A$  的匹配滤波器, 什么是所需要的相干性呢? 不管我们求出它是怎样的, 我们将减小光沅的相干性直到它符合我们的需要为止。可以容易的说明, 时间相干性要求, 可用能允许的光沅的光谱带宽  $\Delta\lambda$  来表示, 由一个简单的关系式给出:

$$\Delta\lambda/\lambda = 1/N \quad (15)$$

这里  $N$  是字母的一维空间带宽乘积。这个

量, 类似于熟知的空间带宽乘积, 正好是目标可分辨的单元数目。在应用这个表达式时, 当然我们应当选择有最大单元数目时的方向。这个结果是很普遍的, 适用于所有透射全息图, 无论是菲涅耳的还是夫琅和费的。

空间相干性的要求也是容易求出的, 是  $\gamma = \lambda/A$ ,  $\gamma$  是光沉在目标平面所张的角,  $A (= N \Delta X)$  是字母的尺寸。这个标准适用于制造和应用滤波器。

一个字母, 或几乎任意一个我们用来产生匹配滤波器的目标, 无疑地可以用  $N^2 = 10^4$  个总单元或沿一边是 100 这么多单元来很好地描述, 所以, 对  $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ ,  $\Delta \lambda = 63 \text{ \AA}$ 。即使从水银弧光沉照明的标准来看, 这也是宽的带宽, 要比气体激光器所提供的宽数千倍。

要减少光沉的时间相干性却不用非激光光沉是很困难的, 而这种选择是不希望的, 因为这样一来光沉光谱的精密控制是不可能的, 并且光能量比激光要低。但是, 激光光沉可以通过在发散的激光束中放一个旋转漫反射体来加宽范围。旋转的玻璃成为一个下份相干光沉, 它的范围是玻璃截取的光束尺寸。在光沉和准直器之间(图1中第一块透镜的左边)放置玻璃, 可以调整它的位置以便给出宽范围的空间相干性。利用这种方法已显示了有意义的改善。

对于信号有等于 1 的空间带宽乘积的情况, 结果实际上是很惊人的, 这里相干性的要求完全消失, 并且光沉在时间上和空间上都可以是完全非相干的。所有人为的噪音被消除, 而“全息图”是很清楚的。当然, 单位空间带宽乘积, 只是意味着一个均匀的光束, 得到的“全息图”仅仅是一个均匀的条纹图案, 或以另外的观点看, 它是一个均匀的衍射光栅。这种方法对于产生全息衍射光栅来说是有吸引力的。

但是, 一般来说, 通过减少相干性的方法所得到的增益是不够的, 必须使用更完善的方法。漫射照明的使用(来自不旋转的漫

射板)在全息术的其它方面是很成功的, 但应用于空间滤波的时候出现了特殊的问题, 因为漫射板根本改变了我们对之进行运算的空间频谱。我们已尝试过的一种技术是用多个互不相干的光沉照明光学系统, 这些光沉是充分分离的, 以使得照明的目标所形成的空间频谱不重叠, 因此每一个谱可以用它本身的空间滤波器来处理。这个光学系统是成为多通道装置, 有同样的信息通过每一个通道, 并以同样的方法处理; 然而, 每一个通道, 有它自己的独立的相干噪音, 当在输出端所有的通道被重新组合后, 最后的噪音被减小  $1/\sqrt{n}$  倍,  $n$  是通道数。这个方法要求有比单个通道所要求的大许多倍的光学能力的透镜系统。更进一步地说, 出现了对准问题; 例如, 每一个滤波器必须精确地同被指定的谱对准。

1972年, Katyl 给出了一个不同的, 非常灵巧的方法。回想一下, 一个简单的透镜组在多色光中不能很好成像, 这种现象称做色象差。这个缺陷是通过用简单透镜组的消色差组合形成一个复合透镜组来校正的。的确, 我们就不能设计一个透镜以形成消色差的付里叶变换吗? Katyl 论证了它可以做到, 至少可以在一定程度上做到。这个方法看来有相当大的希望。

一个可以完成复数空间滤波的有力的运算, 而没有相干照明所伴随的成像缺陷的光学系统, 将是最有用的装置。

## IX. 结束语

全息空间滤波器是补偿成像过程中的缺陷的一个强有力的工具。无论是以探测前还是探测后的方式应用, 它们都为光学处理的这一分支增加了巨大的力量。对这个比较年青的技术的研究仍然大有希望, 并且在这些研究中可以发现在这个领域中研究者仍然面临的技术问题的解决办法。

(蒲泽民译 匡裕光校)