

# 非相干光学相关器

**摘要**—在信号处理的应用中采用光学系统与等价的电子学方法相比较会提供重要的优点。这些优点主要是光学系统所固有的多通道高速模拟和并行处理能力。这在接近实时地处理大量数据的应用方面可能常常是有利的。这篇论文所要提供的是对实现相关运算和线性变换运算的各种非相干光学模拟技术的评述。而且也考虑了应用空间和时间输入的扫描和非扫描系统。

## I 引 言

我们在下面考虑，用于实现各种各样的信号处理计算的多种非相干光学处理系统。这里仅着重于带有非相干光沉的光学系统。非相干与相干光学系统的区别在文献上已经广泛地讨论过，并且已经写出了几篇优秀的评论性文章。对于相干光学处理系统的基本吸引力在于：当光沉是相干的时候（如气体激光），则二维付立叶变换关系存在于该系统中使用的透镜的前后焦面之间。由于这种付氏变换关系，因此可以在空间频率域中实现运算。相干光学系统有点类似于电子滤波，并且在诸如频谱分析，图象识别和图象处理方面获得自然的应用。

另一方面，非相干光学系统不具备这样的付里叶变换关系，因而运算完全在空间域中进行。尽管如此，非相干光学系统在大量信号处理方面还是得到广泛应用。其中一些将在本文中讨论。毫无例外，每个系统的运算或者要讨论的方法可以通过一般线性变换的一维形式

$$g(u) = \int f(r)h(r,u)dr \quad (2)$$

和二维形式

$$g(u,v) = \iint f(r,s)h(r,s,u,v)drds \quad (2)$$

或者随便那一个的离散形式来描述。变量  $r, s, u$  和  $v$  是通用的，并且在要讨论的每种应用中将表现特殊的意义。虽然“相关器”这个词出现在本文的标题中，但是我们将发现

在一般情况下通常可以描述为相关器的非相干光学系统，事实上可以完成多种其他信号处理工作。这些工作包含卷积，频谱分析，滤波，Walsh变换，以及可以用同(1)式(2)式有关的表达式描述的所有其他有意义的和有用的线性变换。把光学系统运用于数据处理应用方面主要受这样事实的启发，就是这种系统可以对二个独立变量的函数实现线性变换。这可以用图1来说明，在这里成象透镜把函数  $f(x,y)$  变换成另一平面的函数  $h(x,y)$ 。在这种系统中，二维输入信号  $f(x,y)$  可以用若干种方法引入。这些包括均匀照明的照相透明片，CRT或者地球球沉图象处理应用中的地球表面。第二个函数  $h(x,y)$  用照相底片或某些可擦涂的电光材料的透过函数来表示。在一些系统中，函数可以是离散的，在这种情况下， $h(x,y)$  的每一个取样值或者可以用适当透射率的基本单元或者用改变另一个清晰单元的面积来表示。

不管编码方案如何，象平面上的一个点的两个坐标表示两个自电度，这和只把时间作为独立变量的电子学系统不同。这里要认识到的重要特性在于：当这样的光学系统把一个二维数据场变换成为另一种数据场时，它将同时变换所有数据点。考虑到高质量的镜头具有超过  $10^7$  的带宽乘积，这表示它有强有力的并行处理能力。

光学处理器的第二个基本重要性质是实现模拟相乘的速度就象光通过一个光学透明片那样快（大约  $10^{-13}$  秒）。这就是说一个被均匀暴光的照相底片所透过的光强度是入射光

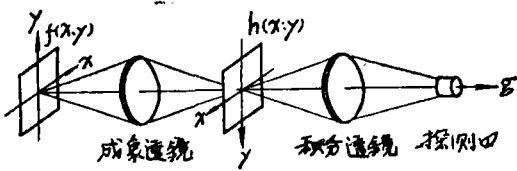


图1 非相干光学相关器基本几何图

强度和底片透过率的模拟乘积。把这种性质同上面描述的并行处理能力结合起来意味着：成象到第二个透明片上的一个适当的编码透明片导致大于  $10^8$  独立模拟乘法的同时计算。参照图1，这意味：假若  $f(x, y)$  是光离开第一个平面的光强分布并且  $h(x, y)$  是处在第二平面上的透明片的透过函数，那么被第二平面所透过的光分布是两个函数的乘积  $f(x, y)h(x, y)$ 。

最后，(1)和(2)式的变换需要把乘积函数对变量  $x$  和  $y$  求积分。这个运算也是很容易完成的。如图1所示，通过用一个简单的透镜会聚来自二维象或者数据场的光，并且使这些光对准空间积分探测器。那么，输出  $g$  用(2) (3)式描述，对于这种情况(2)式变成

$$g = g(0,0) = \iint f(x, y)h(x, y)dx dy \quad (3)$$

正如所要看到的，要讨论的大多数系统将在图1所示的基本系统上进行改变。例如，我们将把要求对  $f(x, y)$  或者  $h(x, y)$  作横向扫描的系统看作为计算法的一部分。把图1的基本系统复制成系统的并行阵列的复杂设计也将要讨论。使扫描单元同光沉的时间调制组合起来的另一类有用的系统也将进行描述。我们还要考虑，非扫描的投影系统的二维相关函数的计算，此系统不需要任何单元的实际位移。在本文的结尾，我们用非相干光学相关器能实现各种其他线性变换所固有的能力来考虑非相干光学相关器的十分广泛的本领。

最后，我们指出，由于在非相干光学系统中强度是有意义的量，因此函数  $f$  和  $g$  必

须处处是正的。为了处理双极函数，普通的方法是把双极函数加到一个常数项上。这个方法要引入互相依赖的信号交叉项，并且引起动态范围的降低。然而这些问题可以用另外一些方法大大分得到克服，如 Piety 和 Rogers 所讨论的那些方法。因而，在下面几节中，我们处理所有的信号或函数就好像它们仅仅是实数并且是正的。

## II 空间扫描相关器

“扫描相关器”这个词常常用来描述这样的系统，它计算相关函数（或卷积）并且它的确是通过对系统中的某些元件的横向移动或扫描来进行。例如，参考图1，这将对应用于移动  $f, h$  或者对应于在它的  $xy$  平面中移动成象透镜。“空间”这个术语指的是对空间变量完成积分的那些相关器，如(3)式表示的那样。

### A 一维相关器

我们首先考虑，图1的一维形式，在这种形式中函数  $f$  和  $h$  仅在  $x$  维上变化。假若输入或者掩膜板允许移动，那么这个系统就成为一个相关器。例如，假若图1中的输入在  $x$  维中移动一个量  $x_0$ ，那么探测器的输出产生熟悉的一维互相关函数

$$g(x_0) = \int f(x - x_0)h(x)dx \quad (4)$$

这样的系统是 Field 和 Ferre 所研制的。前者，通过实际移动一个长的胶片带来实现扫描，而后者通过在  $f$  和  $h$  之间插入一个振荡反射镜来实现扫描。一些作者利用超声光调制器来实时地引入  $f(x)$  或  $h(x)$ ，从而实现相对移动。以公式(4)为基础，利用投影方法而不是成象光学方法的其他扫描相关器已被 Gray 和 Preikschat 用实验证实了。

### B 多通道一维相关器

上面系统的自然推广是使输入函数  $f(x)$  和参考函数库同时进行比较或相关。如图2所表示的，这可用多通道掩膜板  $h_n(x)$  和一个由球面镜与柱面镜结合组成的象散光

学系统来完成。这样会聚每一个通道掩膜板所透过的光并使这些光对准分立的探测器。对于没有扫描发生的情况，第  $n$  个探测器输出正比于

$$g_n = \int f(x)h_n(x)dx \quad (5)$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

最近, Dillard 提出用一个十分相似的系统来实现实时的语音编码。在他的系统中, 信号  $f(x)$  是 5 毫秒语言节的功率谱。它通过 CRT 的  $z$  轴调制所发射的光的形式作为实时输入。当电子束在 CRT 靶面上实现行扫描时, 则通过对每一水平扫描重复相同的调制而使  $f(x)$  在  $y$  维涂抹。对于  $N$  个不同的语音, 使得一维滤波函数  $h_n(x)$  与单个讲话者的语音频谱相匹配。假若峰值出现在第  $n$  个探测器的输出上, 数目  $n$  被通过从而表示那个 5 毫秒的语言节。这就导致相当大的带宽缩减。

在这个结构中, 假若现在允许输入在  $x$  方向平移一个量  $x_0$ , 那么多通道一维相关器得到由下式给出的输出

$$g_n(x_0) = \int f(x-x_0)h_n(x)dx \quad (6)$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

Piety 提供了一个用在地震波反射分析上的系统。在这个应用中,  $f(x)$  是进入地面的机械能的一个时间剖面的记录, 并且  $h_n(x)$  是地震仪阵列的  $N$  个成元的输出。在积分输出中的峰值指示出地下断层的反映。

### C 二维相关器

我们首先考虑完全没有扫描发生的原始情况, 并且获得了两个函数之间的乘积的积分。如 (3) 式所描写的这种情况被称为“图象投射”(image casting), 并且早在 1927 年就被 Goldberg 所提出。它的主要应用是在文字识别方面。在 1939 年

Tea 取得一个类似装置的专利, 在那里  $f$  对  $x$  和  $y$  是常数。探测器输出是任何一个随意形状透明孔径  $h(x, y)$  的面积的量度。如果输入或者掩膜板允许位移的话, 那么这种类型的系统, 就成为一个相关器。例如, 假若在图 1 的输入在  $x$  方向位移一个量  $x_0$ , 那么这个探测器的输出变成:

$$g(x_0) = \iint f(x-x_0, y)h(x, y)dxdy \quad (7)$$

假若输入以恒定速度  $v$  连续移动, 那么  $x_0 = vt$ , 并且积分器输出变成时间的函数。这样一个系统已经被 Ator 用于感知飞机的速度。在这个应用中  $f(x, y)$  是地球表面的强度,  $h(x, y)$  是方波光栅, 并且由于地面相对于装在飞机上的相关器的运动而引入相对运动。探测器输出  $g(vt)$  包含一个正弦波它的频率直接正比于飞机相对于地面的速度。

假若图 1 的输入在两个方向位移, 那么探测器的输出变成熟悉的二维互相关

$$g(x_0, y_0) = \iiint f(x-x_0, y-y_0)h(x, y)dxdy \quad (8)$$

Shack 和 Swindell 做成这样一个系统, 在这个系统中, 二维移动是通过把输入透明片  $f(x, y)$  安装在穿过稳定螺杆的旋转鼓轮上实现的。产生的鼓轮螺旋式扫描提供了所需要的二维扫描。他们的系统, 消除了诸如象移和离焦之类的模糊, 这是通过使模糊图象  $f(x, y)$  同用来补偿降低效果的冲量响应函数  $h(x, y)$  的校正卷积来实现的。在一般情况下  $h(x, y)$  是实的而且是双极性的。Shack 和 Swindell 利用二个正交偏振光束, 以便允许他们的单一的光学机械系统可以使降低了的图象分别同  $h(x, y)$  的正负  $\pi$  分进行卷积。探测器输出用来调制一个光束, 该光束对安装在同一旋转鼓轮上的没曝光的底片进行扫描, 从而提供了一个校正象。在类似的系统中 Barret 和 Swindell 描述了在横向层折照相中使用的程序。这种方法的细节可查找本期刊中另一篇论文。非相干光学信号处理的军事上最成功的应用大概是在红外监

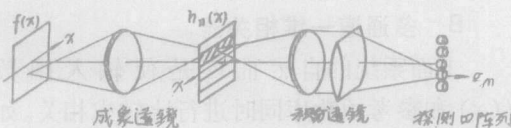


图 2 对于计算一维相关的多通道系统

### Ⅲ 时间扫描相关器

视系统中应用扫描掩模板或“分度线”(reticles)。为了实现诸如背景识别和目标方向指示的运算,设计适当的掩模板(或者是移动,或者是转动,或者是固定的)的文献是大量的。

#### D 多通道二维相关器

现在回到图1的基本的图象投影几何结构,许多强有力的信号处理器可以通过采用多重光学件有效地构成图象投影系统的并行阵列的方法来产生。在这种情况下,如图3所示,掩模板是由子掩膜  $h_{m,n}(x,y)$  的二维阵列所组成的,每一个子掩膜具有各自的探测器。现在球透镜同“蝇眼”透镜的组合在每个子掩膜上产生一个  $f(x,y)$  的分离象。因此第  $m,n$  个探测器的最后输出为

$$g_{m,n} = \iint f(x,y)h_{m,n}(x,y)dx dy$$

$$m = 1.2 \dots M$$

$$n = 1.2 \dots N \quad (9)$$

这种处理器在许多图样识别应用方面是可以广泛利用的。Babcock, Friend 和 Heggis 使用这种系统作为对脑模型和线性识别理论研究的感知器。Jackson 构成一个类似于图3的联想记忆装置,在这个联想记忆装置中,输入  $f(x,y)$  是由一个发光二极管阵列形成的,并且每一个子掩膜  $h_{m,n}(x,y)$  是二进制图样。在他的系统中,128比特的输入字长,可以同时与直到1024个储存字(每一个字长128比特)在100毫微秒内进行比较。

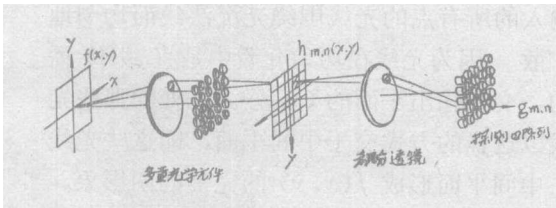


图3 两变量的函数的多通道相关器

通过横向移动子掩膜阵列,这类系统也可以用于计算每个子掩膜和输入  $f(x,y)$  之间的整个的二维互相关函数。然而就作者所知,这样的系统没有获得进展。

在前节所描述的光学相关器是这些的相关器,输入函数严密地以空间方式变化。我们现在考虑第二类非相干光学相关器,在这类相关器中,输入函数仅是一维时间函数。我们称为时间扫描相关器的这种特殊类型能实现公式(1)所描述的数学运算。然而在很大程度上,这个方法主要用于实现多通道一维互相关运算。并且这类系统正是我们将要进行讨论的。

图4描写了这类相关器的基本特性、它包括可调制的光沅,光学掩膜透明片和多通道积分探测器。通过横向移动光学掩膜,它的象或者多通道探测器来实现扫描运算。我们现在详细地考虑这种系统怎样才能实现一维信号  $f(t)$  和一维参考信号库  $h_n(x)$  之间的互相关运算。这里  $n$  等于  $1.2 \dots N$ ,  $N$  决定了库的大小。参考图4,输入信号  $f(t)$  是一个随时间变化的电信号,它调制光沅的输出。然后,这些光被聚光镜头会聚,并且经过包含储存库信息  $h_n(x)$  的光学掩膜透明片。最后一个镜头在多通道探测器的表面上形成光学掩膜的象。在  $f(t)$  被处理的时间间隔也就是决定探测器积分的时间间隔,光学掩膜或者探测器在  $x$  方向被移动了。探测器的第  $n$  个通道的最后输出是互相关函数

$$g_n(x) = \int f(t)h_n(x-ut)dt$$

$$n = 1.2 \dots N \quad (10)$$

这里常数  $v$  定义为掩膜象相对于探测器的相对速度。

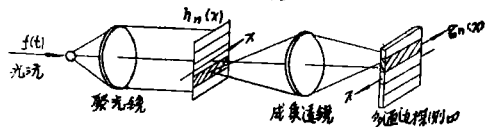


图4 用一调制光源实现一维相关的多通道系统

多年来出现了许多描述图 4 所示系统的各种设备的文章。每种设备均可以划入两个范畴中的一个。一类论述的是移动光学掩膜的相关器，而另一类涉及的是移动积分探测器的相关器。

### A 扫描掩膜系统

对于采用位移光学掩膜概念的实际系统，有四种业已使用的基本方法。在大多数简单明了的方法中，掩膜是在  $x$  方向上以恒定速度运动的连续胶片带。在第二种方法中，Talamini 和 Farnett, Jackson 以及 Skenderoff 等人构成了使用旋转元盘作为运动透明片的相关器。元盘由  $N$  个同心元通道组成，每个通道均用不同的参考信号  $h_n(\theta)$  编码。例如，为雷达应用而设计的 Talamini 和 Farnetts 的系统，使用 40cm 的元盘，它包含了 241 个通道和以每分钟 6000 的速度旋转。这个系统提供了同时处理超过  $10^7$  的测距多普勒接收器的数据。

由 Park 和 Skenderoff 等发展起来的第三个方法，采用旋转元柱形鼓轮作为运动掩膜。实际上，Park 在他的系统中采用光电接收器的线性阵列，从而导致了要计算的数  $g_n(0)$  的单个阵列。最近，Bromley 验证了使用扫描平面镜的第四种方法，使固定光学掩膜的象线性平移过积分探测器表面。Strand 和 Persons 构成了一个和这个系统类似的系统，但是具有同时处理几个一维输入信号的附加能力。

### B 扫描——探测器系统

移动探测器的方法，已采用了两种途径。Faiss 使用了没曝光照相底片作为移动的和时间积分探测器。用积分器移动代替光学透明片，但只要它们涉及机械运动就显不出明显的优点。然而，如果在探测器本身中能用电子学方法实现扫描操作，那么就在系统中产生了实际的优点。Talamini 和 Farnett 提出这样一个系统，该系统采用了由薄膜扫描器来寻址的微电子光敏元件的阵列。使用面积阵列电荷耦合器件 CCD 的另一种设

备被 Monahan 等人成功地验证了。

## IV 非扫描相关器

这类非扫描相干光学处理器能够实现完全的二维相关而无需在任何两个元件之间的相对运动。在以前所讨论的系统中，所需要的等效扫描操作可利用非相干光学系统中固有的多余的信息来实现。Rogers 这个概念描述如下：“非相干系统一般有一个散射的扩展光沉，并带有与光沉接触的输入数据。在这个方法中，包含在数据中的信息向围绕着光沉法线的所有方向上扩散。在直接成象的最简单情况中，镜头收集这个信息并且通过把信息聚焦在象平面上的方法来把它们集中起来。可以把这样的系统看作为一个通讯系统，该系统具有并行地携带相同信息的大量通道。……。这剩余信息的一个重要的实际结果是对噪音存在的高度抵抗……。信息的这种扩散的另一种用途是要构成一个并行处理系统，其结果是不同的方向产生不同的计算或处理”。

按着这个基本观点，我们着手描述一组非扫描或“投影”相关器（图 5）。在每一情况中的基本要求是：输入函数是由一个具有强度分布为  $f(x, y)$  的漫散射光沉所组成。例如，这可能是象 CRT 那样的自发光光沉，也可能是同均匀照明的毛玻璃屏相结合的透明片。从理想的几何观点看，来自这样一个输入的所有点的光线围绕光沉法线而均匀地扩散。因为光线在均匀介质中是直线传播的，交于输出平面的  $(x_0, y_0)$  点处的那些光线以这样的方式交于中间平面，即这些光线在中间平面形成  $f(x, y)$  的完美的阴影象。

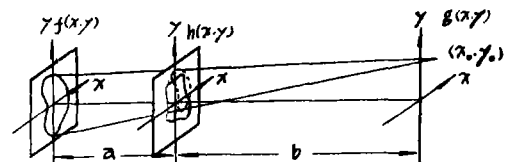


图 5 非扫描式投影相关器的基本几何图

从简单的几何考虑看出, 这个中间象缩小一个因子  $b/(a+b)$  并且从光轴位移到点  $[x_0 a/(a+b), y_0 a/(a+b)]$  处, 这里  $a$  和  $b$  是平面之间的距离。假若非散射透明片  $h(x, y)$  现在被放置在这个中间平面上, 并且衍射和倾斜变形效应被忽略的话, 那么这个阴影象被  $h(x, y)$  乘, 在输出平面的  $(x_0, y_0)$  点处的纯粹光分布变成

$$g(x_0, y_0) = \iint f\left(\frac{x - x_0 a/(a+b)}{b/(a+b)}, \frac{y - y_0 a/(a+b)}{b/(a+b)}\right) h(x, y) dx dy \quad (11)$$

这表示输入信号  $f(x, y)$  和掩膜  $h(x, y)$  之间的二维互相关函数, 并且它完全不需要扫描或特定积分元件就能达到目的。注意, 下面事实是重要的, 即公式(11)是同时对输出平面上所有点来计算的。

“投影”最初应用于晶格结构的研究, 例如, Robertson 和 Bragg。但是, Meyer-Eppler 在 1946 年首次注意到投影能用于实现二维互相关并认识到它对于光学信号处理的一般应用。实际上, 在某些地方, 刚刚描述的这种技术被称为“Meyer-Eppler 效应”。这个方法在图象处理和图象识别方面的应用, 后来被 McLachlan 和 Wilde 所验证。Hawkins 和 Munsey 把这个结构和非线性判定滤波结合起来, 并且串联几个这样的组合以便近似地成为一广义的自然图象计算机。

Maure 提出一个图5的离散型式, 在这个方案中,  $f(x, y)$  是一个强度调制的 LED 的矩阵,  $h(x, y)$  是一个包含透过值的矩阵的照相掩模, 并且输出平面是光电探测器的阵列。这样的处理机得到一个高通只读存储器, 也具有各式各样的逻辑函数应用的能力。Fomenko 指出这类系统如何能够用来使两个十分长的一维信号, (长度  $N^2$ ) 而不是两个图象 ( $R$  寸为  $N \times N$ ) 作互相关。

图 5 的另一种结构表示在图 6 中, 由 Berger 所建议的这种型式用准直光学元件来消除出现在(11)中的缩小因子。另外, 假

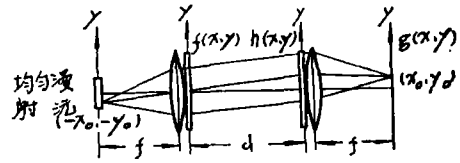


图 6 二维函数的非扫描相关的另一种设计

设一个纯粹的几何方法, 那么漫射扩展光沅上的一点  $(-x_0, -y_0)$  发出的全沅光线被第一个镜头所准直, 而后倾斜地经过透明片  $f(x, y)$  和  $h(x, y)$ , 并且被第二个镜头会聚在输出平面上的  $(x_0, y_0)$ 。根据简单的几何考虑, 在输出平面上的点  $(x_0, y_0)$  处的强度为

$$g(x_0, y_0) = \iint f\left(x - \frac{d}{f} x_0, y - \frac{d}{f} y_0\right) h(x, y) dx dy \quad (12)$$

这种结构被 Trabka 和 Roetling 用于实现图象识别的图象变换。Jackson 用这样的方法重新构成这个系统, 即可以对相关函数进行空间滤波并且能获得被增强了的输出图象。

如果, 需要二维自相关, 那么  $h(x, y) = f(x, y)$ , 并且图 6 的结构有点多余。Kovaszny 和 Arman 指出, 它本身可以反向拆叠, 如图7所示, 因此得出一个仅仅具有所要求的单张透明片的紧凑结构。应用于图象识别的这种自相关已经被 Kovaszny 和 Arman 以及 Horwith 和 Shelton 所证实。

在结束这节以前, 必须指出, 这些投影相关器毕竟受衍射效应所限制。也就是说, 掩模所产生的衍射限制了该系统的空间带宽乘积。然而这并不意味着: 这样的系统就没有实际用途了。例如, Green 说明: 在图 6 的系统中的每个透明片分辨率单元的最大数目与透明片宽度的平方成正比, 而与透明片之间的间隔成反比。对于宽度为  $4\text{cm}$  的和间隔为  $16\text{cm}$  的掩模的所产生的系统能达到超过  $10^4$  的空间带宽乘积。

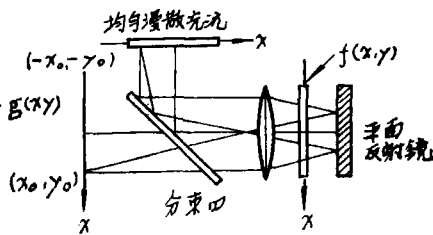


图7 用非扫描系统计算两维自相关函数的几何图

## V 一般的线性变换

到目前为止，我们明确地论及了可以实现卷积，自相关，互相关的数学运算的非相干光学处理系统。正如在引言中指出的那样，这些特殊的数学运算是用公式(1)和(2)所描述的一般线性变换的特定型式。在这一节里，我们将借助于非相干光学处理系统实现多种其他线性变换的固有能力和考虑它们的广阔的能力。特别是我们将考虑一维和二维频谱分析，矩阵—矢量相乘，以及矩阵—矩阵相乘的情况。

### A 扫描系统

公式(1)是有广泛应用的，它描述了函数  $f(r)$  和  $g(u)$  之间的经过变换核  $h(r, u)$  的一般线性变换。表 I 列出了几种有代表性的一维信号处理变换以及  $h(r, u)$  的适当形式的例子。当涉及到采样数据系统时，考虑(1)式的离散型式，即

$$g_m = \sum_{n=1}^N h_{m,n} f_n \quad m = 1.2 \cdots M \quad (13)$$

或等价地考虑它的矩阵表达式

$$\begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & h_{m2} & \cdots & h_{mN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_N \end{pmatrix} \quad (14)$$

常常是方便的。(13)和(14)描述矩阵矢量相乘的一般数学运算。引起相当注意的一种特殊运算是傅氏频谱分析。执行这种运算的有若干种非相干光学系统，这在文献中已经报道过。Montgomery和Tea 描述了图象投影

系统，它和图 1 所表示的用于实现傅氏级数分析的系统在本质上是一致的。在他们的系统中，对于每一傅氏系数的计算都需要分离的掩膜。当应用空间扫描系统时，Raabe能够用一个单独的掩膜来计算非周期电信号的功率谱。Long, Symaniec 等人和 Faiss 使用了图 4 的时间扫描相关器结构来实现频谱分析，在这里分别采用一个旋转圆盘，一个运动掩膜和一个移动探测器。

表 I

变换	Kernel 变换 $h(r, u)$
余弦变换	$\cos(2\pi u y)$
正弦变换	$\sin(2\pi u y)$
付氏变换	$\exp(-i2\pi u y)$
Hankel 变换	$2\pi J_0(2\pi u y) y$
Mellin 变换	$y^{u-1}$

一般的矩阵矢量相乘，最近由Bocker 所验证，他利用带有扫描平面镜和光导摄像管的一个时间扫描相关器作为积分探测器。这个系统的改善型式最近由 Monahan 等人所提出，在这里，通过在光导摄像管的靶面上并入一个面积阵列的 CCD 和在探测器内用电子学方法扫描掩模图象而消除了对扫描平面镜的要求。在改变装置中的光学透明片使其引起不同的线性变换能力的意义上来说，这些系统是可以程序化的。例如，表示在图 8 和图 9 中的光学掩膜，分别用来实现32个点的离散余弦和 Walsh-Hadamard 变换。应当注意，每个掩膜都由两部分组成，以便考虑变换核的正负值

### B 非扫描系统

采用非相干光的若干种非扫描系统也可以用于实现各种线性运算。例如，Ullmann 讨论了用非相干或相干非扫描光学系统完成的许多图象识别应用。作为另一个例子，类似于图 5 的“投影”结构，使用不连续的光沉和探测器的线性阵列，Mengert 和Tanimoto 用它来实现矩阵—矢量相乘。通过应用反馈技术，这个系统也可以用来解联立的代数方

程。

在离散数据的二维处理中有基本意义的是矩阵—矩阵相乘的数学运算。

$$g_{m,p} = \sum_{n=1}^N h_{m,n} f_{n,p} \quad \begin{matrix} m = 1.2 \cdots M \\ p = 1.2 \cdots P \end{matrix} \quad (15)$$

最近 Schneider 和 Fink 验证了这个运算，对于  $5 \times 5$  的矩阵利用类似于图 5 所示的投影几何结构，此外还使用一个扇形球面透镜。

最后，我们考虑一个有许多实际意义的线性变换，尤其在图象处理应用上。这就是二维付氏变换

$$g(u, v) = \iint f(x, y) \exp[-i2\pi(xu + vy)] dx dy \quad (16)$$

注意到，前面描述过的非扫描相关器，以十分简单和高速的方式实现了二维互相关，看起来，寻求以相关的形式表示傅氏变换的方法是十分自然的。然后可以证明这种装置在实时图象处理方面是极有价值的，因为绝大多数感兴趣的图象在自然界中是非相干的。

因此我们主要从相关的观点来描述实现二维付氏变换的三种方法。在第一种方法中 Leifer 及 Rogers 和 Stephens 验证了一种文字识别实验中计算傅氏系数的技术。他们利用“投影”系统来使输入图象同掩膜矩阵相关，每一个掩膜都包含一个特定频率和方向的方波图样。输入和掩膜矩阵的任何给定的成员之间的相关产生出同一个特定的傅氏系数的模和位相相关联的对比和位置的条纹图样。

后两种技术包括把公式(16)的傅氏核表示成二次复数指数或调频(chirp)函数的乘积。在这样的表达中，公式(16)采用下面的形式

$$g(u, v) = \exp[-i\pi(u^2 + v^2)] \iint f(x, y) \exp[-i\pi(x^2 + y^2)] \cdot \exp[i\pi(x - u)^2 + (y - v)^2] dx dy \quad (17)$$

在这个方程中，三个指数都是调频(chirp)函数。其中一个和  $f(x, y)$  相乘形成一个乘

积，另一个同这个乘积进行卷积，第三个指数同最后的卷积相乘。Mertz 采用了一个类似于图 5 的系统来描述这三种运算的直接实现。表示一个调频(chirp)函数的费涅尔带板放在形成“费涅尔多层结构”的图中的三个平面中的每一个平面上。输入函数  $f(x, y)$  于是被第一个夫费涅尔带板相乘，而后同中间的一个进行卷积，并在输出平面中和最后一个相乘。然而，为了使用这个方法，Mertz 指出，人们必须解决使用实数的和正数的透过率值来表示复数调频函数的问题，因为在费涅尔带板上只能得到实数的和正的透过率值。

最后，我们讨论，应用这样一个技术的傅氏变换方法，这个技术已被 Stephens 和 Rogers 及 Richardson 所验证。在这种方法中公式(16)再次被重新排列，从而得到下面形式的积分表示式

$$g(u, v) = \iint f(x, y) \exp[i(\pi/2)[(x - u)^2 + (y - v)^2]] \cdot \exp[-i(\pi/2)[(x + u)^2 + (y + v)^2]] dx dy \quad (18)$$

这是  $f(x, y)$  与向相反方向移动的两个调频函数的同时相关。这些运算也可以用在图 5 或图 6 所得出的系统来实现，这类系统具

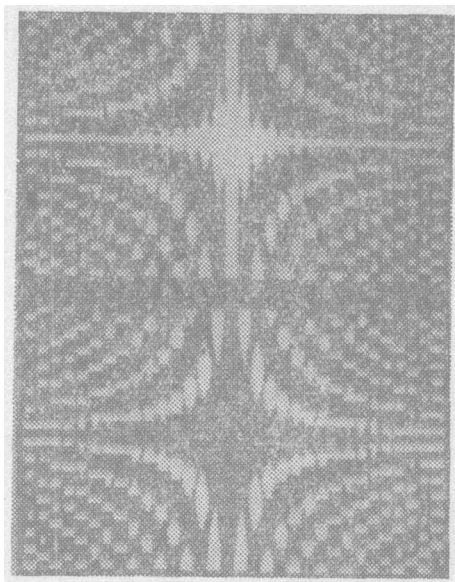


图 8 计算—32 个点离散余弦变换的光学掩模板

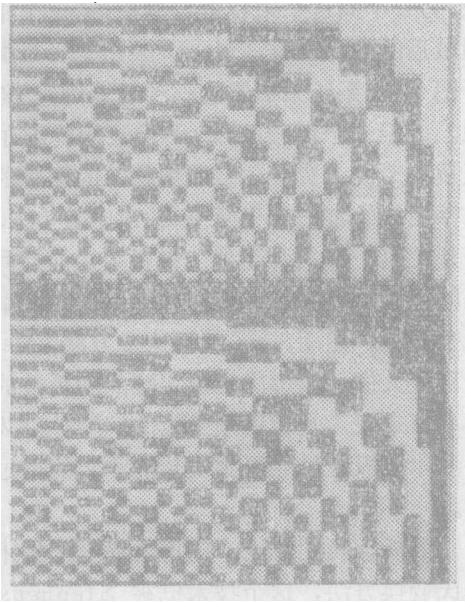


图9 计算一个32个点离散 Walsh-Hadamard变换的光学掩模板

有放在适当地方的两个费涅尔带板和表示  $f(x, y)$  的一个透明片。

## VI. 结 论

在信号处理应用中,采用光学系统同等价的电子学方法比较可以提供显著优点。这些优点主要来自光学系统所固有的高速模拟乘法和并行处理能力。在利用相干和非相干

光学系统方面已经进行了大量工作,其目的是试图实现这些性质的充分潜在能力。在任何给定应用中,所用的系统的类型最终将由待完成的信号处理所决定。这篇论文论述了通常用作相关器的这些非相干光学系统。在许多情况中,我们发现:这样的系统也能实现各种其他信号处理工作,其中包括频谱分析和矩阵运算。重点是编制和介绍在这个领域中所做的各种工作而无需评论每一个方法的细节。在这样一个广泛的述评中,对特定的系统或方法的优点和限制给予很少的注意,但是,在任何给定应用中,必须进行这样一些考虑。然而,总的来说,必须设法抵消偏置项效应,在包含双极信号的某些情况中要加上偏置项,并且还必须设法抵消偏置项与参考信号,信号和噪音相关而引入的交叉项。这个问题的严重程度决定于所论的情况。

最后,很清楚的是:服从于这种处理形式的应用倾向于固定参数运算,不需要在数字计算机中可得到的那种灵活性。另外,许多应用涉及重复的或多通道的运算,这更适合于光学方法。因此,在那些需要的以至于具体的应用中,鉴于非相干系统的高速度和潜在的低成本,应当考虑用非相干光学系统。

(董玉芝译 胡家陞校)