

第三章 光学相关处理

光学信息处理的很重要的应用之一是所谓的相关处理。

光学方法实现相关处理的意思是把两个图像作比较，求出这两个图像之间的相互依存关系，从而抽取图像中所希望得到的信息。

利用光学相关处理可以从噪音中检出目标并且实现图像特征的识别，这在雷达和侦察摄影中起着很重要的作用。

光学相关处理时给定的图像是 (x, y) 平面内的光强或者是振幅透过率分布，为了求出两个图像 $g_1(x, y)$ 和 $g_2(x, y)$ 之间的相互依存关系，我们求出

$$\phi_{12}(x, y) = \lim_{\substack{L_x \rightarrow \infty \\ L_y \rightarrow \infty}} \frac{1}{4L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} g_1(x, y) \cdot g_2(x+X, y+Y) dx dy$$

$$\equiv g_1(x, y) \star g_2(x, y) \tag{3-1}$$

其中符号 \star 表示相关积分。这时 ϕ_{12} 通常只跟 (X, Y) 有关，这叫作互相关。特别是当 $g_1 = g_2$ 时得到自相关 $\phi_{11}(X, Y)$ ，一般地 $\phi_{11}(X, Y)$ 是 (X, Y) 的偶函数，在 $X = Y = 0$ 处有最大值，这一点的微分等于零。又在自相关和互相关之间成立如下关系式

$$\phi_{12}(X, Y) \leq [\phi_{11}(0, 0) \phi_{22}(0, 0)]^{1/2} \tag{3-2}$$

根据这一点，求出在 $X = Y = 0$ 处具有最大相关函数值的两个图像 $g_1(x, y), g_2(x, y)$ ，从而知道 g_1 和 g_2 的一致性，把这个性质用到图像识别上。

本文分两个部分介绍光学相关处理的应用；

I. 电信号的光学相关处理

光学信息处理在电信号的信息处理方面已经得到了成功地应用，尤其是在综合孔径雷达的成像处理和雷达的脉冲压缩方面利用了相干光学相关器充分地显示出光学信息处理的优越性，从而更进一步地推动了光学信息处理的研究工作。

图3-1表示了简单的相干光学相关器。图中点光源和准直透镜 L_1 提供平行光束，在这个平行光束中放置两个透过率原板 p_1 和 p_2 ，如果把 p_1 相对于 p_2 移动 (X, Y) ，并 p_2 后面放置透镜 L_2 ，这时在透镜 L_2 的后焦平面 p_3 上得到的光强分布是

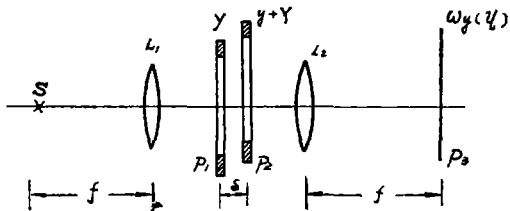


图 3-1 简单的光学相关器

$$E(X, Y, w_x, w_y) = \text{const} \left| \iint_{-\infty}^{\infty} g_1(x, y) \cdot g_2^*(x+X, y+Y) \right. \\ \left. - 2\pi i(w_x x + w_y y) dx dy \right|^2 \quad (3-3)$$

其中 (w_x, w_y) 是空间频率, 与 p_3 面上的坐标 (ξ, η) 的关系是

$$w_x = \xi/\lambda f, w_y = \eta/\lambda f \quad (3-4)$$

因此, 在光轴上的一点, $w_x = w_y = 0$ 处放置针孔, 测量通过针孔的光量, 则得

$$E(X, Y, 0, 0) = \text{const} \left| \iint_{-\infty}^{\infty} g_1(x, y) \cdot g_2^*(x+X, y+Y) dx dy \right|^2 \\ \propto |\phi_{12}(X, Y)|^2 \quad (3-5)$$

这是跟 $g_1(x, y)$ 和 $g_2(x, y)$ 的互相关的平方成比例。因此, 如果一边移动 (X, Y) , 进行 $E(X, Y; 0, 0)$ 的测量, 则求得互相关。特别是当 $g_1 = g_2$ 时, 在 $X = Y = 0$ 处产生锐的峰值, 利用这个性质可以作到信号的检出以及特征的识别。

在电信号的处理中, 有时输入图像 g_1, g_2 被特定的空间频率 w_c 及 $w_c + \Delta w_c$ 调制, 这时

$$g_1(x, y) = a_0 + a_1(x, y) \cos[w_c x + \alpha_1(x, y)] \\ g_2(x, y) = a_0 + a_2(x, y) \cos[(w_c + \Delta w_c)x + \alpha_2(x, y)] \quad (3, 6)$$

因此, 在 p_3 面上的 $w_x = \Delta w_c$ 的位置放置针孔的话得到比例于 $|\phi_{12}(X, Y)|^2$ 的输出。如果 g_2 具有

$$g_2(x, y) = a_0 + a_2(x, y) \cos[(w_c + \Delta w_c)x - \alpha_2(x, y)] \quad (3-7)$$

的形式, 则在 $w_x = -(2w_c + \Delta w_c)$ 的位置上测得比例于 $|\phi_{12}(X, Y)|^2$ 的量。

1. 综合孔径雷达

综合孔径雷达是为了提高侦察飞机雷达系统的方位角分辨力, 从五十年代初开始由美国的密执安 (Michigan) 大学 L. J. 库特罗纳 (Cutrona) 等人研究和发展起来的。到了一九五七年已经获得成功^[1]。由于这种雷达成像系统分辨力高, 并不受气候条件的限制, 白天和夜间都可以进行侦察摄影, 所以在军用侦察中发挥卓越的作用。

光学信息处理应用到综合孔径雷达的数据处理中, 成功地实现了二维匹配滤波, 比起电子学的数据处理表现出很大的优越性。

综合孔径雷达是飞机带一个侧视雷达小天线, 利用它的脉冲扫描地形, 把接收到的信息储存在照相底片上通过事后处理得到地形照片。综合孔径雷达的成像系统是属于距离——方位耦合的成像系统。顺着飞行方向的坐标叫作方位坐标, 垂直于飞行方向的坐标叫作距离坐标。这种成像系统的方位坐标的分辨力是通过一般的波前聚焦的方法实现而距离坐标的分辨力是通过脉冲压缩的方法实现。下面首先介绍综合天线的概念, 然后介绍综合孔径雷达的接收处理原理。对于脉冲压缩将在雷达信号处理一节中作详细介绍。

(1) 综合天线的概念

我们知道一个天线长度为 D 的雷达系统其角分辨力是

$$\beta = \lambda / D \quad (\text{弧度}) \quad (3-8)$$

其中 β 为角分辨的弧度值, λ 是信号波长。

因为雷达使用的无线电波波长比光波波长大 $10^3 \sim 10^4$ 倍,所以要想得到与光学侦察摄影系统相同的分辨力,雷达天线长度要比光学摄影系统的口径大 $10^3 \sim 10^4$ 倍,比如要想得到与照相物镜口径为100mm的摄影系统相同的分辨力,则需要雷达天线为几百米到几千米长。飞机带这么大的天线显然是不可能的。为了克服这一矛盾发展了综合孔径技术。

图3—2表示了长度为 D 的线性阵列天线,它的角分辨力是 $\beta = \lambda / D$,这是通过每一个阵列天线的信号相干求和来实现的。综合天线的概念是这些阵列的每一个天线不需要同时发射信号,而飞机带一个小天线,当飞到线性阵列的每一个天线位置上发射一个脉冲,并接收回波信号,把这些信号相干地迭加和储存起来,经过求和处理达到等效于大的线性阵列天线的效果。图3—3

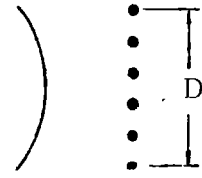
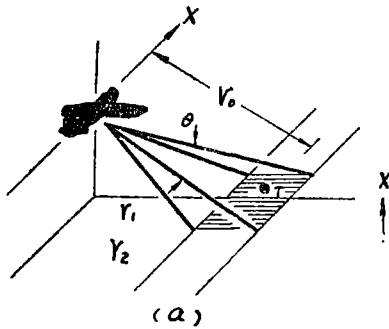


图3—2 长度为 D 的线性阵列和一个入射球面波

表示了综合天线雷达系统和对于一个点目标 T 的记录。这样的雷系统的综合天线的长度是飞机带小天线扫描地形时,照明目标的直线飞行距离。这个距离等于飞机带的小天线的波束宽所对应的地面上的距离。在图3—3中小天线的波束宽为 θ ,目标的距离为 r_0 ,则综合天线的长度在数字上等于

$$L = \theta \cdot r_0 \quad (3-9)$$



(b)

图 3—3

(a)综合孔径雷达系统

(b)对一个点目标的记录

又因为综合孔径的位相信息是通过信号从雷达到目标的距离往返的时间延迟的测量来获得的,所以它的分辨力比孔径为 L 的一般天线好了两倍。故综合孔径雷达的方位角分辨力为

$$\beta = \frac{\lambda}{2L} \quad (\text{弧度}) \quad (3-10)$$

其中, λ 是波长, L 为综合天线长度。

(2) 接收和处理

在综合孔径雷达的数据处理中,L. J.库特罗纳(Cutrona)等首先引进了光学相关器^[2],用多通道互相关的观点成功地处理了综合孔径雷达的数据。对这个系统E. N.雷兹(Leith)是利用波前重现的全息学观点作了说明^[3],而W. E.考克(Kock)也用微波全息术的角度说明了综合孔径成像原理^[4]。我们用全息学观点说明综合孔径雷达的接收和处理原理。

图3—3表示了飞机带侧视雷达天线，沿着平行于地面的直线轨道飞行，天线连续地发射微波脉冲来扫描地形，侧视雷达天线被设计成在方位角方向发射窄的主瓣辐射图样（典型的是 1° ）而在仰角方向发射较宽的主瓣辐射图样（典型的是 10° ）。如图3—3所示，由于被照射的地面到雷达的斜距离是从 r_1 到 r_2 逐渐增大，所以对于每一个发射脉冲，返回的信号首先是接收相距为 r_1 的目标返回的信号而最后接收相距为 r_2 的目标返回的信号。这些返回的信号被相干地接收之后用来调制阴极线管的强度调制，如图3—4所示，阴极线管扫描照相底板，得到记录这个阴极线管扫描强度的照片。当阴极线管从上往下扫描时记录的是从近距离到远距离的回波信号，所以图中垂直的坐标代表着距离坐标，每一个发射脉冲扫描出一条垂直线。当记录下一个回波脉冲时由于这个记录底片跟飞机的飞行路程同步地向前移动，在下一个底片位置上记录这个回波脉冲。这样底片的移动方向，即图3—4中水平方向代表着方位坐标。

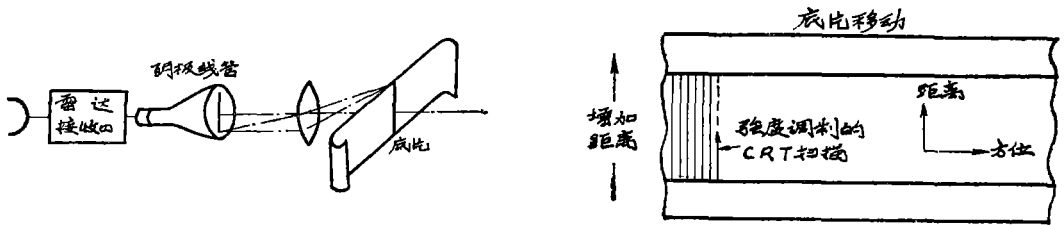


图3—4 综合孔径雷达接收数据的记录

在图3—5中表示了地面上只有一个反射点的情况下雷达相干地接收回波信号的示意图。表示了从目标点返回的球面波和参考束平面波相干迭加。这时因为只有一个目标点返回信号，当阴极线管从下往上扫描时在底片上的每一条垂直线上只有一个亮点出现。这样在底片上记录成一条水平线，然而这条水平线并不是连续的一条亮线，而是如图3—6所示的亮暗交替的一维夫累涅尔（Fresnel）带板图样，这是因为目标返回的球面波和参考束平面波相干迭加

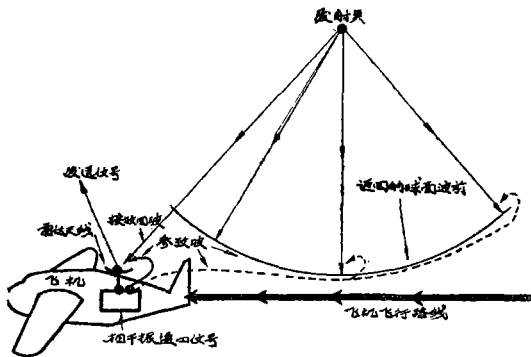


图3—5 侧视雷达，点目标的球面回波和参考信号干涉形成一维夫累涅尔带板记录

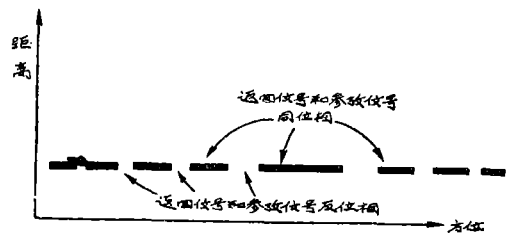


图3—6 点目标信号的照相记录，一维夫累涅尔带板

的结果。把这样形成的带板全息图用相干的平行光照明，则如图3—7所示重现出目标点。我们在图3—8中表示了当记录两个目标点时全息图重现出两个目标点的情况。这时每一个聚焦正比于雷达到目标点的斜距离。当实际地形被扫描时，地面上的每一个反射点都在底片上产生自己的带板，这样就形成记录地形的全息图。当这样的全息图被重现时其重现实像的像平面

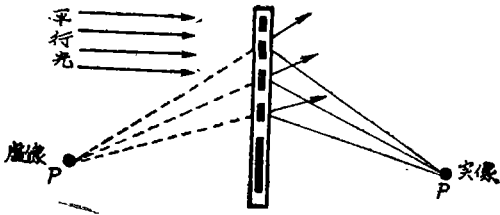


图3—7 相干雷达的一维带板重现目标点

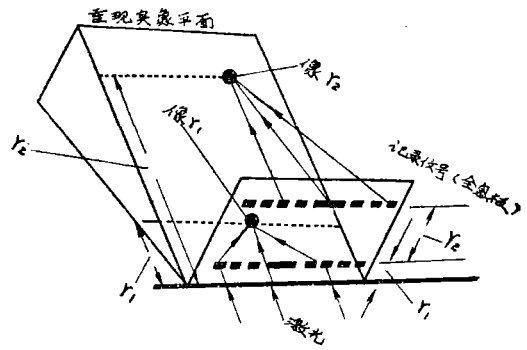


图3—8 两个目标点的重现像

(叫作方位焦平面) 和记录底片平面 (叫作距离焦平面) 是相互倾斜的。(见图3—8) 为了得到最后的地形照片, 必须把这个方位焦平面和距离焦平面统一地成在一个输出像面上。下面我们介绍利用歪像光学系统实现距离和方位焦平面的统一, 在最后输出像平面得到地形照片。

图3—9中表示了这样的歪像光学系统, 这就是二维匹配相关器, 实现多通道的相关处理。当处理时把记录综合孔径雷达接收数据的底片用相干的平行光照明, 这时重现出来的虚像利用锥透镜 b (见图3—9(B)) 成在无限远处, 再通过球面透镜 d 聚焦到球面透镜的后焦平面上。为了各不同距离所对应的重现虚像的虚焦点同时成在无限远处, 选在底片上的锥透镜 b 的各部分的焦距要求跟重现虚像的各方位虚焦点的距离相等。在距离方向 (见图3—9(c)) 锥透镜 b 是个平板, 利用柱透镜 c 把底片平面上的距离焦平面成在无限远处, 并通过球透镜 d 聚焦到球面透镜的后焦平面上。从而这个光学系统已经实现了距离和方位焦平面统一地成在球面透镜 d 的后焦面上, 在这个焦平面上放置照相底片就能记录地形的成像照片。

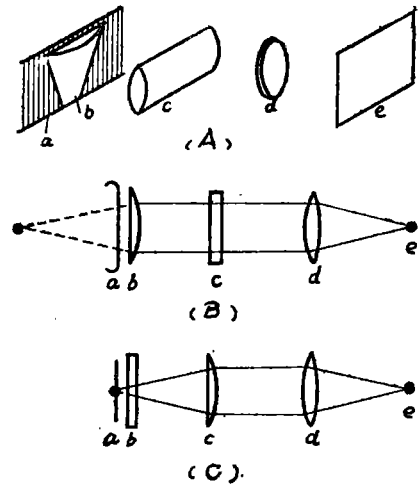


图 3—9

- (a) 用于距离和方位焦平面一致的歪像透镜系统
- (b) 锥透镜和球透镜把重现虚像成在输出面
- (c) 柱透镜和球透镜把距离坐标面成在输出面

在上面的讨论中我们还没有考虑到当记录雷达接收数据时方位坐标和实际飞行距离之间的因次因子 p 和距离领域的因次因子 q 的差别, 因为这个差别引起图像的纵横比失真, 故必须加以校正。为了校正纵横比失真, 可以利用合适地选择柱透镜焦距和锥透镜焦距的比值来实现。我们从图3—9中容易看到, 这个系统的方位领域的放大率 M_x 决定于球透镜焦距 f_d 和锥透镜焦距 f_b 的比值, 即

$$M_x = f_d / f_b \tag{3-11}$$

而在距离领域的放大率 M_r 是决定于球透镜焦距 f_d 和柱透镜焦距 f_c 的比值, 即

$$M_r = f_d / f_c \tag{3-12}$$

现在我们可以利用把 M_x / M_r 的比值选择为 p/q 的倒数的方法来校正图像的纵横比失真, 即

$$(M_x/M_r) \cdot (p/q) = 1 \quad (3-13)$$

或者透镜焦距选择为

$$(f_a/f_b) \cdot (f_c/f_a) \cdot (p/q) = (f_c/f_b) \cdot (p/q) = 1 \quad (3-14)$$

然而上面已经指出，锥透镜的各部分焦距是根据重现虚像的虚焦点距离来选择的，故满足条件(3-14)式的柱透镜焦距也只能是对某一个距离所对应的值，在其他距离位置上仍然不能满足(3-14)式的要求，结果最后成像面上得到的像存在着放大率畸变。在图3-10中表示了像的畸变情况，在远距离位置上(顶部)经受



图3-10 锥透镜产生的畸变

较小的放大率，而在近距离位置上(底部)经受较大的放大率，结果形成图3-10中右边的形状。为了消除这种畸变，在输出面上放置一个窄的垂直狭缝，在连续移动记录底片的同时把它拍摄下来。这时当信号底片移动时，输出像面也类似地移动，但像的移动速度是正比于放大率，所以对应于较短距离处具有较大的像的移动速度。则适当选择信号记录底片和输出像面底片的移动速度的比值可以校正纵横比。这样在输出面上将得到一个对所有距离都有合适的纵横比的像，消除透镜参数决定的放大率畸变。图3-11表示了记录雷达接收信号的记录底片，图3-12表示了经过成像处理得到的地形照片。

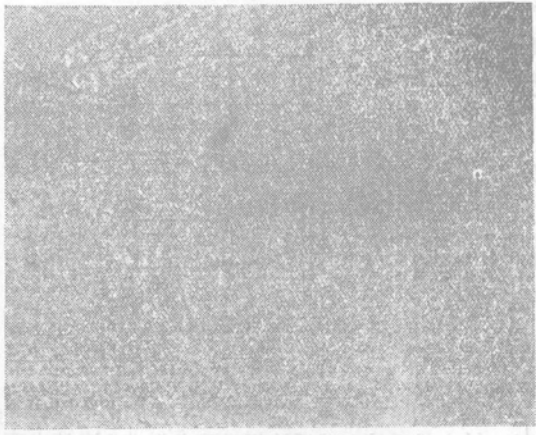


图3-11

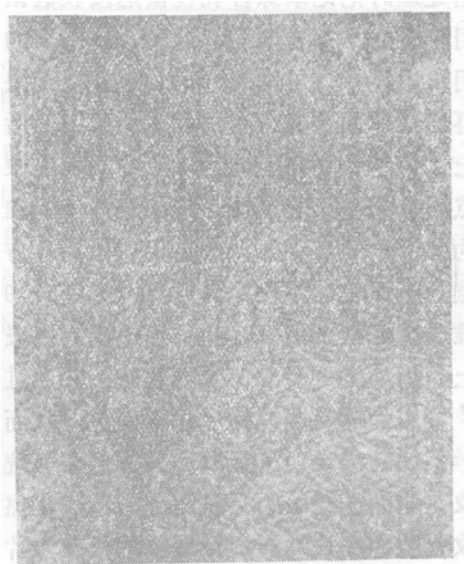


图3-12

关于这种距离——方位耦合的成像系统引起的像差校正问题，由E. N. 雷兹(Leith)曾作过专门的讨论^[5]，他利用了全息照相方法制作的空间匹配滤频片来校正系统的像差。图3-13表示了这种光学处理器的系统图。图中的 M_1 是匹配滤频片，把匹配滤频片放置在柱透镜的后焦平面上，对柱透镜产生的距离编码信号的富里叶变换频谱进行匹配过滤，从而得到脉冲压缩，实现距离领域的高的分辨本领，同时在这个频谱面上加上另一个全息复数空间滤频片，用来校正系统的像差。在实际制作中已经

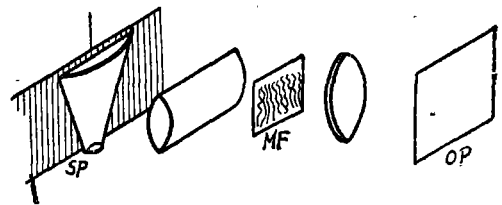


图3-13 光学处理系统
SP信号平面，MF匹配滤波器，OP输出平面

把上述两种滤频片合在一起实现的。

在综合孔径雷达的数据处理中，除了上面介绍的利用锥透镜的组合光学系统之外，由 G.N. 马丁 (Martin) 和 K. Von, 贝伦 (Bieren) 又提出了利用两个串联的柱透镜，把其中的一个柱透镜倾斜的方法代替锥透镜的作用^[6]。然而更新的处理器是由 A. 柯兹玛 (Kozma) 等人提出的所谓倾斜平面望远镜处理器^[7]。这个光学系统是多透镜的 (球透镜和柱透镜组合的系统) 歪像望远镜系统。它的基本原理是利用了望远镜光学系统的放大率与物体位置无关的性质以及成像系统的轴向放大率是垂轴放大率的平方倍这两种基本性质，不用锥透镜就把方位焦平面的倾斜问题基本上校正好，剩余的倾斜问题是利用记录底片的适当倾斜和利用柱透镜同球透镜组合的系统在距离和方位领域中放大率不相等的条件作到完全的校正。这个系统中由于不用锥透镜，已经不存在放大率畸变问题。因此这样的光学处理器大大提高了原先使用锥透镜的处理器器的处理技能。图 3—14 表示了倾斜平面望远镜的原理。图 3—15 和图 3—16 表示了利用这种处理器处理的综合孔径雷达成像照片。

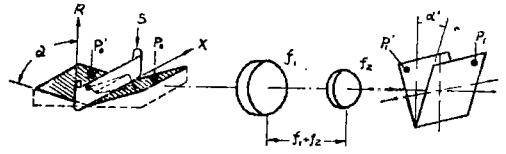


图 3—14 分析倾斜平面望远镜的几何示意图



图 3—15

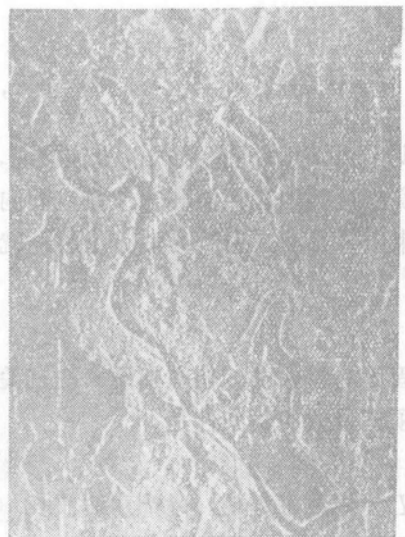


图 3—16

2. 雷达信号处理

我们在介绍综合孔径雷达时曾指出，综合孔径雷达的距离领域的分辨力是靠脉冲压缩技术来得到。我们在这一节中介绍利用光学相关器实现雷达脉冲压缩的例子。

在通常的雷达系统中，测距精度是根据雷达脉冲信号从雷达到目标的往返时间的精确测量来得到的，因此为了得到高的测距精度，雷达必须采用短的脉冲信号。另一方面，雷达对目标的测速精度是根据雷达信号从目标返回时产生的多卜勒频移的精确测量来得到的，因此为了得到高的测速精度，雷达必须采用长的脉冲信号。因为简单的脉冲信号，如果采用短

的脉冲信号，则是有宽的频带宽度，相反地如果采用长的脉冲信号，则是有窄的频带宽度。这样，不能同时满足高的测距精度和高的测速精度。为了解决这一矛盾，雷达采用复杂的调制脉冲信号，经过接收后的匹配相关处理得到高的测距和测速精度。

一个脉冲宽度为 T 的长脉冲（调制脉冲）信号被匹配滤波之后形成的短脉冲宽度在时间上等于 $\frac{1}{W}$ 。其中， W 为长脉冲（调制脉冲）信号的频带宽度。我们叫发射的长脉冲（调制脉冲）宽度和经匹配滤波之后得到的短脉冲宽度的比值为脉冲压缩的压缩比，这个压缩比等于 $T \cdot W$ ，即压缩比等于调制脉冲的时间—带宽的乘积^[8]。因此，使用长的调制得很复杂的发射脉冲压缩的压缩比很大，从而可以得到高的测距和测速精度。

在脉冲压缩技术中，利用光学手段，表现出很大的优越性。比如，利用声光器件就比电磁器件显出很大的优越性。因为声波速度比电磁波速度慢 10^8 数量级，这样声光器件要比电磁器件在体积和重量上将少很多，并且在制作上也简单容易。

当声波通过一种由透明媒质做的延迟线时，它引起每一点上折射率的周期地变化。虽然这种变化是很小的，它影响经过这个媒质进行传播的平面波光波的通路。利用这种声波和光波的相互作用原理，制作了声光调制器，它已成为雷达信息处理的相关器的重要器件之一。

在讨论声波与光波的相互作用时，有两种基本的工作频率区域必须加以区别。在低频区内，声波的作用像厚度极小的位相光栅，因而通过它的光波被衍射。这种情况下光声相互作用被称作雷—纳（Raman—Nath）效应，对垂直入射的光波来说不同衍射级次的角度 θ_m 由下式给出

$$\sin \theta_m = \pm m \frac{\lambda f}{V}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (3-15)$$

其中， λ 为在 θ_m 的测量区域内的光波波长， f 为声波频率， V 为声波速度。

在高频区域内，声波和光波在空间内相互作用。这种效应被称作勃拉格（Bragg）效应。当光波束以 θ_B 角度入射到声波束上时，就产生强的勃拉格散射光波。这样的 θ_B 角由下式给定

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda f}{2V} \quad (3-16)$$

对固体材料来说，超高频段声波有关的勃拉格角一般在 $1 \sim 3$ 度，为能产生勃拉格型衍射，必须满足的实验条件是

$$L \cdot \text{tg} \theta_B > \lambda \quad (3-17)$$

其中， L 为声波束宽度， λ 为声波波长。对固体材料来讲频率超过 100 或 200 兆赫时勃拉格效应导致更强的散射波束。

在这两种情况中，雷纳一级衍射光和勃拉格散射光的频率都偏离入射光的频率一个声波频率。

下面介绍几种利用声光调制器的雷达脉冲压缩光学相关器。

图 3—17 表示了利用声光调制器的光学相关器^[9]。图 3—17 中 S_1 是狭缝，此处放置 100 瓦汞灯，透镜 L_1 是准直镜，产生出平行光并垂直地射到超声光调制器（简称为 ULM）。声光调制器是由换能器，声延迟线及声吸收等部份所组成。其中换能器把电信号转换成声波

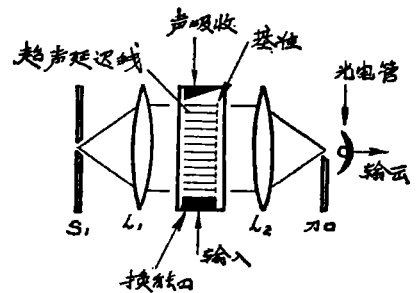


图 3—17 光学相关器

信号，在超声延迟媒质中放出超声波，在延迟线的另一端上声波被吸收。在图 3—17 的装置中，声光调制器的换能器是由石英作成并延迟媒质是水。在这个声光调制器的输入端输入雷达接收的调频脉冲信号，则产生相应的超声波，这样通过超声延迟线的平行光波被这个超声波调制，并且和参考基准函数相匹配产生匹配相关，基准参考函数是根据雷达发射的调频信号制作的不均匀周期的光栅线条系列。经过匹配相关的光波再通过富里叶变换镜头 L_2 ，在富里叶变换镜头 L_2 的后焦平面上给出匹配相关输出，在这儿放置光电管就接收相关峰值输出。光电管表面前的刀口是为了移去非信息传播成分而加的。利用图 3—17 所示的相关器，把中心频率为 15 兆赫，带宽为 2 兆赫的调频脉冲信号从 60 微秒压缩到 0.5 微秒，其脉冲压缩比为 120。这就是说发射的调制脉冲宽为 60 微秒经过接收后的光学匹配相关处理被压缩到 0.5 微秒，因此测距精度就能提高 120 倍，这个数字也等于这个调制脉冲的时间（60 微秒）和频带宽度（2 兆赫）的乘积。这个相关器是电信号的实时相关器，可以实时地作雷达信息处理。

图 3—18 表示了改进的雷达脉冲压缩用的光学相关器^[10]。它有效地去掉零级光。这是基于为了相关不必采用准确的信号复制品的基准函数，而采用信号和基准函数之间差频为常数的基准函数。图 3—19 中表示了在这种情况下得到的焦平面上的光强分布。这时在偏移零级的位置上接收器接收被压缩的脉冲包络，其偏移量等于信号和基准函数的差频。（参考（3—6）式）当目标有速度时，返回的雷达信号有多卜勒频移，这时利用光电接收器陈列或者利用电视摄像管代替狭缝，就可以测得多卜勒频移量。因此这种设备变成二维滤波器，它可以同时测得目标的距离和速度。

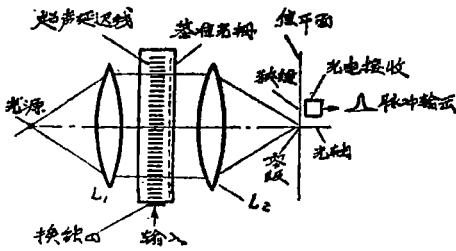


图 3—18 光学相关器

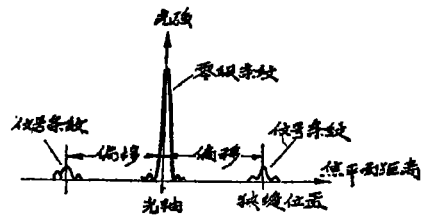


图 3—19 相关时衍射条纹

图 3—20 表示了利用可变参考函数的光学相关器^[11]。这种情况参考函数不用光栅而是用第二个超声束产生。它的好处是用于频率可变的雷达上，这时需要自适应匹配过滤。为了简化，一个积分透镜被用了三次。系统只取负一级衍射光，去掉零级和正一级，故只有负一级

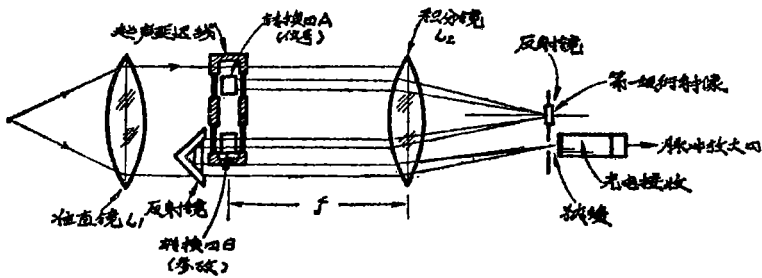


图 3—20 具有可变参考函数的光学相关器

衍射光聚焦到接收器上。这个光学相关器的声光调制器的孔径为 2 英寸，用水延迟线，用宽带硫酸锂换能器。用这个光学相关器处理了中心频率为 5 兆赫，带宽为 2.5 兆赫，时间延迟为 32 微秒的脉冲信号，其时间—带宽乘积为 80。

图 3—21 表示了不用参考基准函数的脉冲压缩光学相关器^[12]。脉冲压缩利用了超声波产生的光的勃拉格散射。电输入信号为线性调频信号 $(\nu(t) = \nu_0 + \eta t)$ ，在超声延迟线产生线性调频信号的相应光栅，它用来散射单色的发散光束，如果入射角和发散角合适，则散射光聚焦在光电管前放置的狭缝上，在光电管产生锐的峰值输出。这个相关器利用硫化镉 (CdS) 纵向波换能器，延迟线材料是钇镓石榴石 ($Y_3Ga_5O_{12}$)，光源是用氩离子激光器。利用这个相关器把中心频率为 1160 兆赫，带宽为 60 兆赫的线性调频脉冲信号由 2 微秒压缩到 18 毫微秒，压缩比为 110。

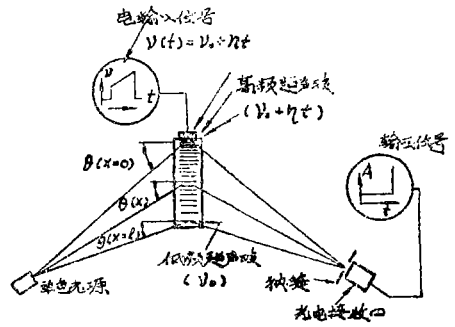


图 3—21 不用基准函数的脉冲压缩

图 3—22 表示了光的勃拉格衍射脉冲压缩滤波系统^[13]。准直光束射到被线性调频信号调制了的声室，则某一级衍射光聚焦于一个衍射极限点上，这个点在空间按着声室中的声速 v_s 移动。在图 3—22 中焦距 $R = (v_s^2/\lambda_0) \cdot (\Delta T/\Delta f)$ ，其中 λ_0 是自由空间中的光波波长， $(\Delta T/\Delta f)$ 是脉冲宽度除以频带宽度。接收的时间宽度 Δt 是宽度为 a 的聚焦点通过接收器前放置的狭缝所需要的时间，即压缩后的脉冲宽度 $\Delta t = a/v_s$ 。在衍射极限条件下聚焦点的大小为 $a = \lambda_0/\Delta\theta$ ，其中 $\Delta\theta = D/R$ 是会聚角，而 $D = v_s \cdot \Delta T$ 是表示线性调频信号在声室中的空间长度。由以上关系式联立得 $\Delta t = 1/\Delta f$ ，故脉冲压缩的压缩比为 $\Delta T/\Delta t = \Delta T \cdot \Delta f$ ，等于时间带宽的乘积。对于原来的勃拉格衍射，输出光束的中心线将与声波波前成 θ_B 角，而不是图 3—22 中所示的零角。在图 3—22 中使用了各向异性晶体，它给出零角，这对于允许大的 Δf 值是有利的。各向异性晶体用剪切波，它是由宽带纵向波硫化镉 (CdS) 薄膜换能器和纵向剪切表面转换器联合而得到，这个转换器在兰宝石晶体表面与剪切波通过的轴成 62.3° 倾斜角。利用这个装置把中心频率为 1400 兆赫，带宽为 75 兆赫，脉冲宽度为 0.24 微秒的线性调频脉冲信号压缩到 15 毫微秒的输出脉冲，其压缩比为 16。

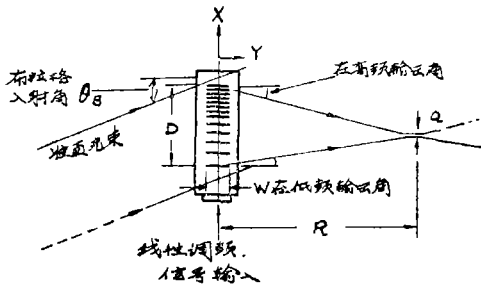


图 3—22 勃拉格衍射脉冲压缩

图 3—23 表示了具有固定基准的光声横向滤波器^[14]。它用于微波位相编码信号的脉冲压缩。平面波光波以输入信号截波的勃拉格角入射到声延迟线，经过延迟线衍射的光被位相编码信号调制，它具有按位相编码信号变形的波前，这个波前经过位相返回板重新成为平面波，位相返回板是预先编码的位相调制信号的复数共轭，最后把平面波利用积分透镜聚焦在光电接收器的针孔上。这种匹配滤波器

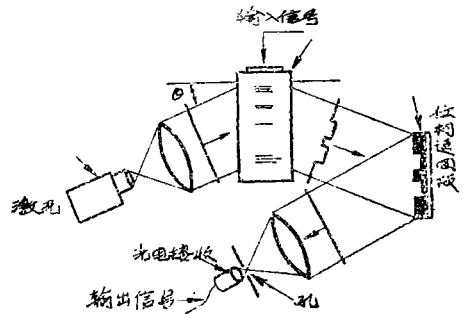


图 3—23 微波位相编码信号的脉冲压缩

可以达到的带宽是其中心频率的20%。

图3—24表示了利用夫累涅尔像平面滤波的实时光学相关器^[15]。可用于最佳相关和线性检测的同线外差技术中。

图3—25表示了具有相干接收的实时光学相关器^[16]。这种相关器的输出信号保留着雷达信号的振幅和位相两个信息。

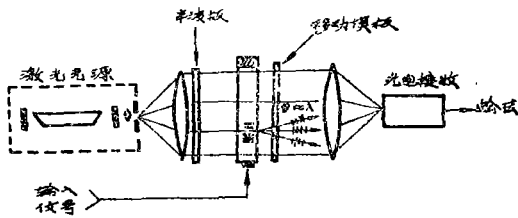


图3—24 相干接收，夫累涅尔像面相关器

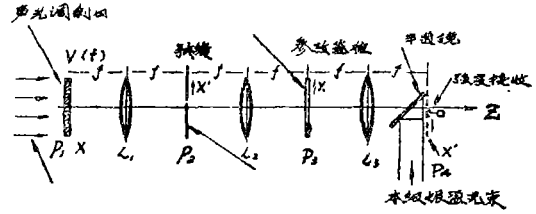


图3—25 相干接收的光学相关器

除了雷达信号的脉冲压缩以外，相干光学信息处理在雷达信息处理中有很多应用。如天线图样的分析^[17]，利用全息照相储存电信号^[18]，位相陈列天线的光电信号处理^[19]等。读者如果感兴趣请查阅有关所引的参考文献。

3. 声纳信号处理

声纳是一种水下雷达，由于在水中电磁波被很强烈地吸收掉，所以用声波作为传递信息的工具，在水下发射声波脉冲并接收从目标返回的声波信号，从而探测水下目标。声纳是以声频为雷达频率，所以是属于低频雷达。

我们在这一节中介绍利用多通道光学相关器处理全景探测的声纳信息处理的例子。

类似于无线电雷达，在声纳中为了得到大能量和高的速度分辨，要求发射长的声脉冲信号，并且为了得到高的距离分辨，要求发射短的声脉冲信号。当然用简单的发射脉冲是不能同时满足这两个相互矛盾的要求的，为了解决这一矛盾采用调制脉冲信号，并经过接收后的匹配相关处理得到高的测距和高的测速分辨力。

另一方面，在声纳中为了同时探测各个方向的目标，往各个方向同时发射声脉冲信号，并接收各个方向返回的信号，实现所谓全景探测，这就要求多通道的脉冲压缩相关处理。

利用光学相关处理的两维处理技能，很容易实现声纳信号的多通道匹配相关处理。

设声纳的发射信号为限幅的位相编码调制的信号，其发射信号的时间长为 T ，则发射信号 $S(t)$ 为

$$S(t) = a \cdot \cos[2\pi\nu_0 t + \varphi(t)] \quad (3-18)$$

其中， a 是振幅， ν_0 是载波频率， $\varphi(t)$ 是编码的位相调制信息项， t 是从0到 T 之间变化。举简单的7位码为例，信息项 $\varphi(t)$ 表示为

$$\varphi(t) = \begin{cases} 0 & \text{在 } t = 0 \sim \frac{3}{7}T, \frac{5}{7}T \sim \frac{6}{7}T \text{ 之内,} \\ \pi & \text{在 } t = \frac{3}{7}T \sim \frac{5}{7}T, \frac{6}{7}T \sim T \text{ 之内.} \end{cases}$$

图3—26表示了在这个 $\varphi(t)$ 函数。

这样的声纳信号从目标返回时，接收器接收到的信号 $S_r(t)$ 为

$$S_r(t) = \varepsilon \cdot a \cdot \cos[2\pi\nu_0' t' + \varphi(t')] + n(t) \quad (3-19)$$

其中, ε 为目标反射系数和媒质吸收决定的衰减系数。 ν_0' 为回波信号的截频, 当目标运动时由于多卜勒频移, 将 ν_0' 不等于 ν_0 , t' 是 t_0 到 $t_0 + T'$ 之间变化, $t' = t - t_0$, t_0 为信号从声纳站到目标往返的时间, T' 为接收信号的时间长。 $n(t)$ 是噪音项。

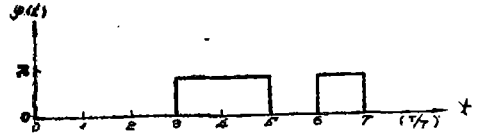


图 3-26 位相编码

为了把这个接收信号转变成空间变化的函数形式, 可以利用发光二极管来照明狭缝并匀速移动照相底片的同时拍摄这个狭缝的照明的方法。这时发光二极管是由接收到的声纳信号控制, 所以当接收到声纳回波信号时, 发光二极管将随着时间亮暗交替地变化, 其变化的频率是由回波信号的截频 ν_0' 决定, 当位相变化 π 时发光二极管将亮或者暗持续一周。这样在照相底片上可以记录透过率周期变化的条纹图样, 其条纹的空间频率 ω_0 将决定于接收信号的截频 ν_0' 和底片的移动速度 v_y 决定

$$\omega_0 = \nu_0' / v_y \quad (3-20)$$

当接收信号的位相改变 π 时, 在底片上记录下黑或者白的条纹相接续一周, 如图 3-27 所示。噪音项 $n(t)$ 表现在周期的不均匀性上。这样, 记录信号的底片的振幅透过率 $g(y)$ 具有如下形式

$$g(y) = B_0 + \cos[2\pi\omega_0 y + \varphi(y)] - \frac{1}{3} \cos[6\pi\omega_0 y + 3\varphi(y)] + \frac{1}{5} \cos[10\pi\omega_0 y + 5\varphi(y)] - \dots + n(t) \quad (3-21)$$

其中, y 为和底片移动相反方向的底片的空间坐标。

把这个记录底片放在富氏变换镜头的前焦面上, 并用单色平行光照明, 则在镜头的后焦面上得到记录信号的空间频谱, 如图 3-28 表示了这个谱的强度分布。由于位相编码调制, 除了直接透过的零级谱外其他各级谱都变得很宽, 它代表编码调制位相信号脉冲的频带宽度, 码位数越高则频带宽度越宽。

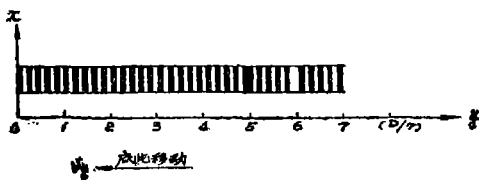


图 3-27 信号的记录

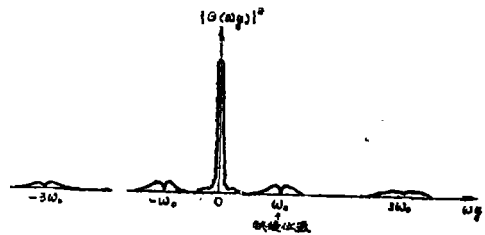


图 3-28 p_2 面上的频谱

多通道相干光学相关器从记录信号的底片中抽取编码调制的信息项, 并实现匹配过滤和相关求和以及多通道的分开显示。

图 3-29 表示了相干光多通道相关器。记录信号的底片放在 p_1 面上, 富氏变换镜头 L_1 把记录信号的空间频谱成在 p_2 平面上, 在 p_2 面上放置狭缝, 只取正一级衍射光, 这样就实现去掉噪音抽取有用的编码调相信息项。把这个正一级谱再用第二个富氏变换镜头作富氏逆变换, 则在 p_3 面上得到编码调相信号的空间复制, 即在 p_3 面上得到的光波波前是

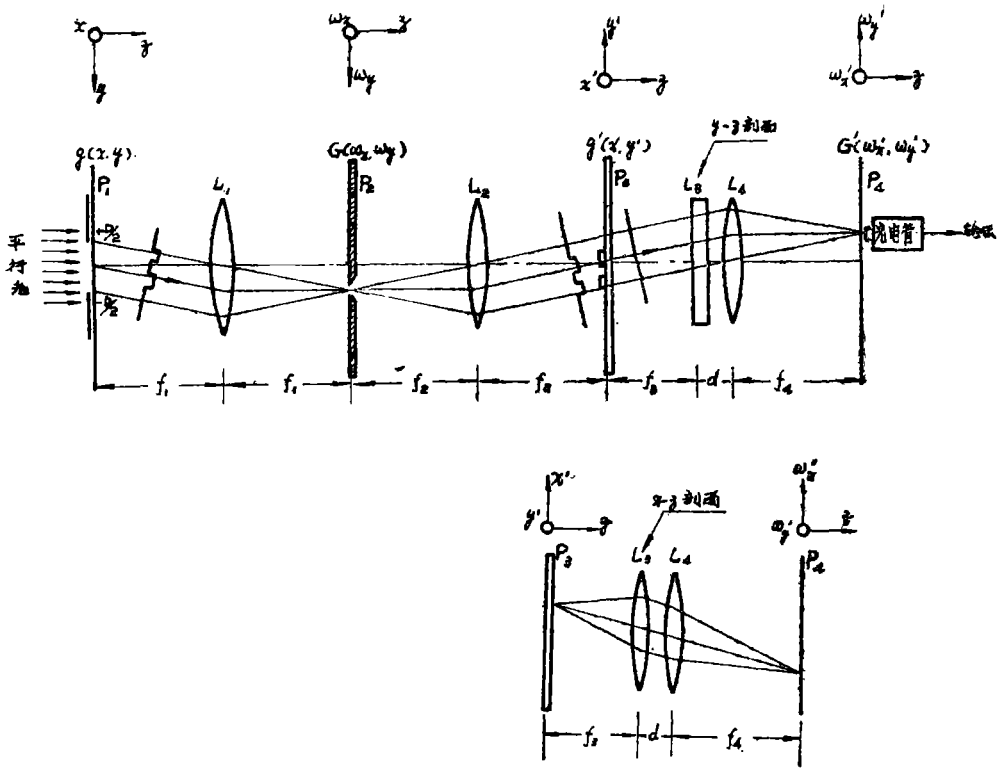


图 3-29 多通道光学相关器

$$g'(y') = e^{i[2\pi\omega_0 y' + \varphi(y')]} \quad (3-22)$$

其中 y' 是 p_3 面上的空间坐标。

为了实现匹配过滤，在 p_3 面上放置相位滤波板，它是编码位相信号的复数共轭的参考基准函数。因此这个相位滤波板的振幅透过率为

$$R(y') = e^{-i\varphi(y')} \quad (3-23)$$

这是在平板玻璃上镀透明薄膜的方法来实现的，图 3-30 表示了简单的 7 位编码位相信



图 3-30 相位滤波器

号的相位滤波板。设膜层的厚度为 d ，膜层的折射率为 n_2 ，空气折射率为 n_0 ，则要求有膜层和没有膜层的部分的光程差 Δ 为

$$\Delta = d(n_2 - n_0) = \frac{\lambda}{2} \quad (3-24)$$

经过相位滤波板之后的光波是由信号波前 $g'(y')$ 和参考基准函数 $R(y')$ 的乘积，我们用 $W(y')$ 表示这个匹配过滤之后的波前，则

$$\begin{aligned} W(y') &= g'(y') \cdot R(y') = e^{i[2\pi\omega_0 y' + \varphi(y')]} \cdot e^{-i\varphi(y')} \\ &= e^{i2\pi\omega_0 y'} \end{aligned} \quad (3-25)$$

经过匹配过滤的光波 $W(y')$ 再由富氏变换镜头 L_4 作富氏变换,在 L_4 的后焦平面 p_4 上产生相关输出的峰值,我们用 $G'(\omega y')$ 表示 p_4 面上的谱,则

$$\begin{aligned} G'(\omega y') &= \int_{(D)} e^{i2\pi\omega_0 y'} \cdot e^{-i2\pi\omega y' y'} \cdot dy' \\ &= \int_{(D)} e^{-i2\pi(\omega y' - \omega_0) y'} \cdot dy' \\ &= \frac{D}{2\pi} \left[\frac{\sin[(\omega y' - \omega_0)D/2]}{(\omega y' - \omega_0)D/2} \right] \end{aligned} \quad (3-26)$$

其中, D 表示积分域,它由相关器口径决定,而这个口径应选择为接收信号的记录长度,因为接收信号的时间长是 T' ,底片的移动速度是 v_y ,故

$$D = v_y \cdot T' \quad (3-27)$$

图3-31表示了 p_4 面上的频谱强度 $|G'(\omega y')|^2$,在 $\omega y' = \omega_0$ 处给出匹配过滤的相关峰值输出。我们比较图3-31表示的 p_4 面上的频谱强度 $|G'(\omega y')|^2$ 和图3-28表示的 p_2 面上的频谱强度 $|G(\omega y)|^2$ 可以看到脉冲压缩的效果。信号的时间长 T 越大最后的相关峰值越尖锐,另一方面在 p_2 面上的一级衍射的谱的宽度是信号码位数越高越宽,脉冲压缩相当于 p_2 面上的一级谱的宽度和 p_4 面上相关峰值输出的宽度之比,也就等于声纳发射的调制脉冲信号的时间带宽的乘积。

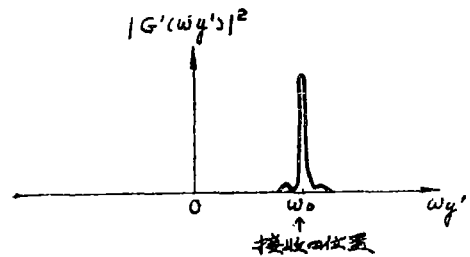


图3-31 p_4 面上的频谱

为了实现实时相关处理,在接收处理过程中接收信号以及照相记录 and 光学相关处理是连续地进行。因此这时记录信号的底片在光学相关器的输入面 p_1 上以匀速度移动。故经过相位滤波板之后的光波现在改写成

$$\begin{aligned} W(y', Y) &= g(y') \cdot R(y' - Y) \\ &= e^{i[2\pi\omega_0 y' + \varphi(y')]} \cdot e^{-i\varphi(y' - Y)} \end{aligned} \quad (3-28)$$

其中 Y 表示记录信号的中心和光轴的偏离距离,这也是相当于记录信号和参考基准函数(相位滤波板)之间的相对位移量,故 Y 的变化速度等于底片的移动速度 v_y 。经过富氏变换镜头 L_4 的富氏变换,在 p_4 面上得到(3-28)式的富氏变换 $G'(\omega y', Y)$,

$$\begin{aligned} G'(\omega y', Y) &= \int_{(D)} W(y', Y) e^{-i2\pi\omega y' y'} dy' \\ &= \int_{(D)} e^{i[2\pi\omega_0 y' + \varphi(y')]} \cdot e^{-i\varphi(y' - Y)} \cdot e^{-i2\pi\omega y' y'} dy' \\ &= \int_{(D)} e^{i\varphi(y')} \cdot e^{-i\varphi(y' - Y)} \cdot e^{-i2\pi(\omega y' - \omega_0) y'} dy' \end{aligned} \quad (3-29)$$

这样在 p_4 面上的 $\omega y' = \omega_0$ 处放置光电接收器,则接收到声纳信息项 $\varphi(y')$ 的自相关输出 $E(Y)$,

$$E(Y) = \int_{(D)} e^{i\varphi(y')} \cdot e^{-i\varphi(y' - Y)} dy' \quad (3-30)$$

当 $Y = 0$ 时出现尖锐的峰值输出，根据产生这个峰值输出的时间作到精确的测距。

如果接收器是电视摄像管或者是光电接收器阵列，则根据出现自相关峰值输出的位置坐标 ($\omega_y' = \omega_0$ 的位置坐标) 来求得目标的速度信息。前面已经指出， ω_0 是由回波信号的截频 ν_0' 和底片的移动速度 v_y 决定的，即 $\omega_0 = \nu_0' / v_y$ ，因此我们知道 ω_0 和 v_y 直接求得回波截频 ν_0' ，再根据发射信号截频 ν_0 知道多卜勒频移 $\nu_0 - \nu_0'$ 。因为自相关输出是很尖锐的峰值，其位置是精确地被确定，因此作到精确地测速。

上面的光学相关处理只是利用了相关器的一维空间，实现了单通道的匹配相关处理。为了实现多通道的相关处理，我们利用光学相关器的二维技能，即 p_1 面上的 x 坐标用来记录多通道， y 坐标用来分别记录各个通道的接收信息。各个通道代表发射声纳的各个方位，这样哪一个通道出现自相关峰值输出来确定目标的方位，从而实现全景探测。

为了达到多通道的分开显示，如图 3—29 所示，利用柱面镜 L_3 ，柱面镜是这样放置的，它在 y 方向没有曲率，在 x 方向有曲率，因此它在 y 方向是相当于一块平板玻璃，在 x 方向和球面镜 L_4 一起把 p_3 面成像到 p_4 面上，即把 x 方向上的多通道分开显示在 p_4 面上，如图 3—29 所示的 $x-z$ 剖面。这样放置在 p_4 面上的电视摄像管接收二维信息，一维显示出目标的速度 (ω_y' 位置) 另一维显示出目标的方位 (ω_x' 位置)，并出现峰值相关输出的时间代表目标的距离。

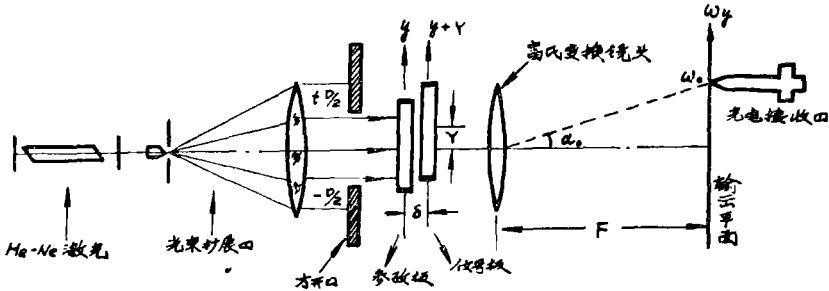


图 3—32 简单光学相关器

对于类似的问题，荷兰的 J. A. 包登 (Boden)^[20] 利用简单的光学相关器作了实验，图 3—32 表示了简单的光学相关器。实验中使用的光源是 $He-N$ 激光，($\lambda = 6328 \text{ \AA}$)，相关器的开口尺寸为 $D = 12.7$ 毫米，富氏变换镜头的焦距为 $F = 900$ 毫米。参考信号板是 127 位的，码元宽度为 0.1 毫米。当底片移动速度取 $v = 10$ 毫米/秒，则自相关峰值宽度为相当于 $\frac{1}{100}$ 秒，它对应于移动一个码元宽度的底片所需要的时间，因此脉冲压缩比等于码位数，即脉冲压缩比为 127。因为水中声速为 $C = 1.5$ 公里，这个系统测距精度为 7.5 米。并指出多卜勒频移为发射截频的 1% 时可以用同样的参考函数匹配相关，从公式 $\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = \frac{2V}{c} = 1\%$ ，测得目标速度 V 的范围是从 -7.5 米/秒，到 $+7.5$ 米/秒，可达到的测速精度为 0.25 米/秒。底片的移动速度的稳定性要求 10^{-3} ，这是比较关键的技术难题，另外实时显影站也是实时处理中的技术难题。如果使用随机的可逆记录材料，则实时处理将是容易实现的。关于随机的可逆记录材料将在本章最后作简单的介绍。

II. 图像的光学相关处理

图像的光学信息处理中给定的图像是照片, 图样, 文字等的二维光强分布或者透过率分布。近年来信息处理的发展要求从给定的图像中抽取有用的信息以及辨认图像, 通称为图像识别。在图像识别技术中电子学和计算机方法已被大量的应用, 然而近年来利用光学信息处理技术作图像识别显出很大的优越性。因为图像是二维的, 光学处理的特点之一就是二维处理技能, 这样光学处理比电子学和计算机处理更方便地实现图像的相关处理。本文主要介绍利用光学相关处理来作图像识别的例子, 另外顺便地介绍图像识别中使用的光学处理的其他方法。我们根据不同的应用目的, 分三个方面介绍。

1. 信号的检出

在混乱的图像中去掉不需要的背景和噪音图样专门检出其中有用的目标图样, 这在雷达和侦察摄影的图像识别上是很有用的。

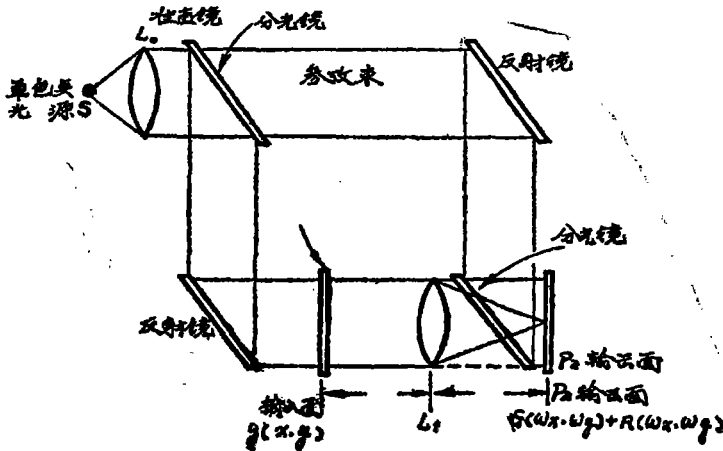


图 3—33 利用改进的 mach—Zehnder 干涉仪制作全息空间滤波器

光学方法实现信号的检出是模拟了电子学的匹配滤波处理, 并利用光学系统优越的二维处理机能和光学相关演算结合起来实现光学的空间匹配滤波相关处理, 这是光学信息处理的一个划时代的应用。

具有任意频谱的噪音上重迭着已知形状的信号时, 若想经过一种滤波器得到信噪比最大的输出, 则要求经过所谓的匹配滤波器, 它的空间频率特性是 $T(\omega_x, \omega_y)$,

$$T(\omega_x, \omega_y) = \frac{G^*(\omega_x, \omega_y)}{|N(\omega_x, \omega_y)|^2} \quad (3-31)$$

其中, $G^*(\omega_x, \omega_y)$ 是信号频谱的复数共轭, $|N(\omega_x, \omega_y)|^2$ 是噪音的强度频谱。又当噪音是白噪音的情况下, $|N(\omega_x, \omega_y)|^2$ 是常数, 故作到 $T(\omega_x, \omega_y) \propto G^*(\omega_x, \omega_y)$ 就十分满意。

最初的光学匹配滤波器是由 A. 万道朗特 (Vander Lugt)^[21] 利用马赫—珍德 (Mach—Zehnder) 干涉仪制作的。如图 3—33 表示, 在马兹—珍赫 (Mach—Zehnder) 干涉仪的

一个光路中放置记录信号 $g(x, y)$ 的原板 p_1 , 在富氏变换镜头 L_1 的后焦平面 p_2 上产生信号 $g(x, y)$ 的空间频谱 $G(\omega_x, \omega_y)$, 这个波面和另一个光路中得到的平面波参考光束 $R(\omega_x, \omega_y)$ 干涉产生干涉条纹, 其光强分布用 $E(\omega_x, \omega_y)$ 表示, 则

$$E(\omega_x, \omega_y) = |G(\omega_x, \omega_y) + R(\omega_x, \omega_y)|^2 \\ = (|G|^2 + |R|^2) + G^* \cdot R + G \cdot R^* \quad (3-32)$$

把这个光强分布 $E(\omega_x, \omega_y)$ 记录在放在 p_2 面上的照相干板上。把这个干板按着 γ 值等于 2 地显影定影, 使光强分布 $E(\omega_x, \omega_y)$ 正比于干板的振幅透过率 $T(\omega_x, \omega_y)$, 则(3-31)式表示的滤波器由(3-32)式的第二项提供。

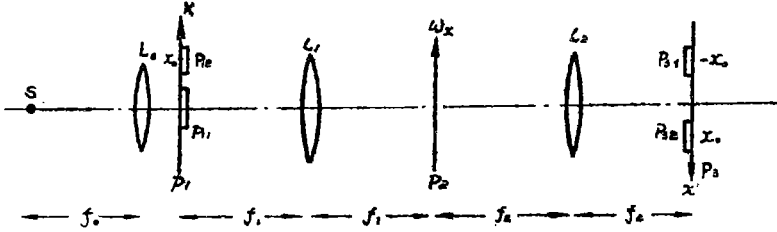


图 3-34 利用改进的Reyleigh干涉仪全息空间滤波处理

图 3-34表示了利用瑞利 (Rayleigh) 干涉仪的全息空间滤波的装置。由单色点光源 S 和准值镜 L_0 得到相干的平行光束, 用这个平行光照射输入面 p_1 , 用富氏变换镜头 L_1 在 p_2 面上产生 p_1 面图像的富氏变换。 p_1 面是被分成两个部分的, 其一是以光轴为坐标中心的图像 p_{11} , p_{11} 是具有振幅透过率为 $g_1(x, y)$ 的图像, 另一部分是以坐标 $(x_0, 0)$ 为中心的图像 p_{12} , p_{12} 是具有振幅透过率为 $g_2(x-x_0, y)$ 的图像。这样在 p_2 面上得到这两个部分图像的富氏变换 $G_1(\omega_x, \omega_y)$ 和 $G_2(\omega_x, \omega_y) \cdot e^{-i2\pi\omega_x x_0}$ 所对应的波面。在 p_2 面放置照相干板记录这两个波面形成的干涉条纹, 得到富氏变换全息照片。如果使照相干板的 $\gamma = 2$, 则这个全息照片的振幅透过率 $T(\omega_x, \omega_y)$ 具有如下形式

$$T(\omega_x, \omega_y) = (|G_1|^2 + |G_2|^2) + G_1^* G_2 e^{-i2\pi\omega_x x_0} \\ + G_1 G_2^* e^{i2\pi\omega_x x_0} \quad (3-33)$$

把这个全息照片放回原先作全息照相时的位置 p_2 上, 挡住 p_{12} 部分, 在 p_{11} 的位置上放入振幅透过率为 $g_3(x, y)$ 的图像, 则全息照片被相当于 $g_3(x, y)$ 的富氏变换 $G_3(\omega_x, \omega_y)$ 的波面照明, 并由全息照片再生出来的波面经过镜头 L_2 在 p_3 面上给出再生像。这时再生像的振幅分布是

$$g'(x', y') = F^{-1}[(|G_1|^2 + |G_2|^2) G_3] \\ + F^{-1}[G_1^* G_2 G_3 e^{-i2\pi\omega_x x_0}] \\ + F^{-1}[G_1 G_2^* G_3 e^{i2\pi\omega_x x_0}] \quad (3-34)$$

其中 $F^{-1}[\]$ 表示富里叶逆变换运算符。(3-34)式的第一项表示基项, 它在 p_3 面上给出以 $x' = 0, y' = 0$ 为中心的衰减了的图像 $g_3(x, y)$ 的例像。(3-34)式的第二项是 $x' = x_0$ 为中心的在 P_{32} 处产生的像, 它具有如下振幅分布

$$g'_2(x', y') = g_2(x', y') \otimes [g_1^*(x', y') \star g_3(x', y')] \otimes \delta(x' - x_0, y') \\ = g_3(x', y') \otimes [g_1^*(x', y') \star g_2(x', y')] \\ \otimes \delta(x' - x_0, y') \quad (3-35)$$

其中符号*表示复数共轭, \otimes 表示卷积运算符号, \star 表示相关运算符号。(3-34)式的第三项是 $x' = -x_0$ 为中心的在 p_{31} 处产生的像,它具有如下振幅分布

$$\begin{aligned} g'_1(x', y') &= g_1(x', y') \otimes [g_2^*(x', y') \star g_3(x', y')] \otimes \\ &\delta(x' + x_0, y') = g_3(x', y') \otimes [g_2^*(x', y') \star \\ &g_1(x', y')] \otimes \delta(x' + x_0, y') \end{aligned} \quad (3-36)$$

因此,如果我们适当地选择 g_1, g_2, g_3 的话,由(3-35)式和(3-36)式所示的运算用到图像处理上,其中作为相关的问题是信号检出用的光学匹配滤波器和作特征识别用的符号变换处理,另外还可以实现像质改善用的逆滤波处理。本章首先介绍作为相关处理的部分,关于像质改善处理将在第四章中作详细介绍。

我们比较图3-33和图3-34可知,如果在图3-34中的 p_{11} 面上的 $g_1(x, y)$ 为图3-33中的信号 $g(x, y)$,并图3-34中的 p_{12} 面上的 $g_2(x - x_0, y) = \delta(x - x_0, y)$ 的话,图3-34完全代替图3-33的系统使用。

当利用图3-34的系统作相关处理从信号加噪音的图像中检出信号时,首先把 $g_1(x, y)$ 作为已知信号(需要检出的信号图样)放在 p_{11} 面上,而 $g_2(x - x_0, y) = \delta(x - x_0, y)$ 放在 p_{12} 面上,利用平面波相干光照明 p_1 面,则在 p_2 面上得到已知信号 $g_1(x, y)$ 的富氏变换全息照片。然后把这样得到的全息照片放回原来作全息照片时的位置 p_2 处,挡住 p_{12} 面,在 p_{11} 面上放置被处理的图像 $g_3(x, y)$,用平面波照明 p_1 面,则根据(3-35)式,在 p_3 面上的 p_{32} 处产生

$$\begin{aligned} g'_2(x', y') &= [g_1^*(x', y') \star g_3(x', y')] \otimes \delta(x' - x_0, y') \\ &\equiv \phi_{13}(x', y') \otimes \delta(x' - x_0, y') \end{aligned} \quad (3-37)$$

从而得到具有振幅分布比例于互相关 ϕ_{13} 的像。尤其是 $g_1 = g_3$ 的场合, $\phi_{11}(0, 0) = \delta(x', y')$,故从(3-37)知道 $g'_2(x', y') = \delta(x' - x_0, y')$,这样在 p_{32} 面上 $x' = x_0, y' = 0$ 处产生亮点,把这个输出用光电接收器测量从未知的图像 g_3 中检出已知的信号 g_1 。这就是利用全息照相匹配滤波器来实现光学的匹配相关处理,从噪音中检出信号的基本原理。

柯兹玛(Kozma)^[22]对混乱的噪音加黑白条纹的图样作过处理。他把(3-31)式表示的匹配滤波器用计算机求得,并正弦波形用矩形波简化之后靠描绘器描出,把这个条纹图样在照相干板上摄得作为(3-31)所示的匹配滤波器。利用这个匹配滤波器对于混乱的噪音加黑白条纹的图样,当信噪比 $S/N = -10.5$ 分贝的情况下确实地检出了信号存在与否。图3-35表示信号板,图3-36表示黑白条纹匹配滤波器,图3-37表示匹配滤波相关的结果,其中左边是信号的像,右边显示出相关输出,图3-38表示加到信号上的混乱噪音图样,图3-39表示信号加噪音的信噪比为 $S/N = -10.5$ 分贝的被处理的信号板,图3-40表示了滤波结果。



图 3-35

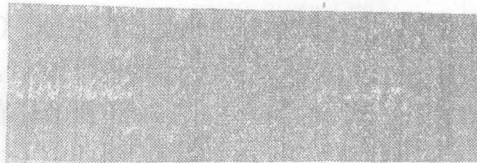


图 3-36

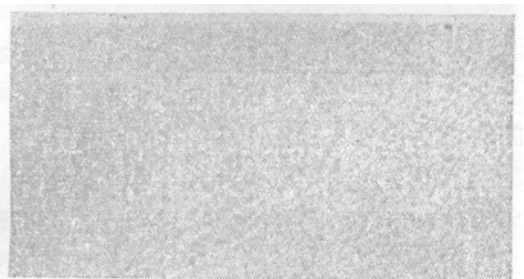
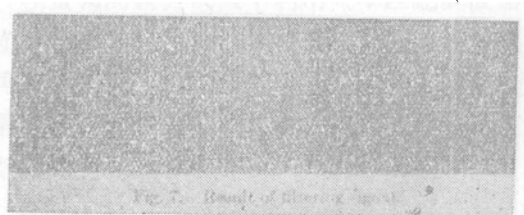


图 3—37 图 3—38

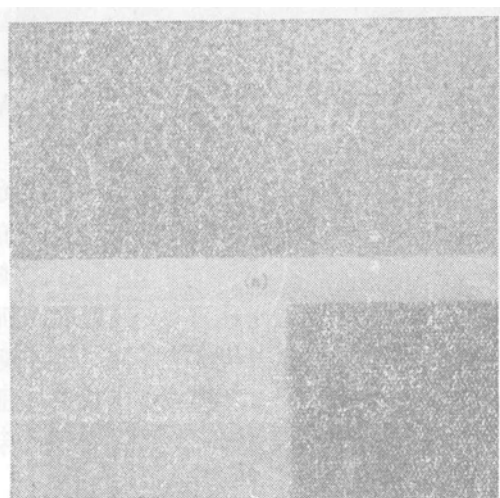
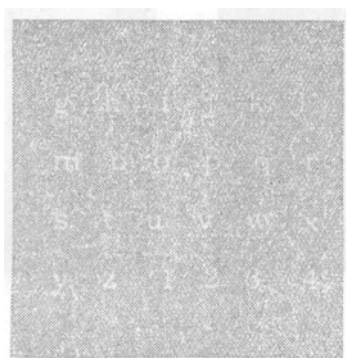


图 3—39 图 3—40

下面介绍几种光学匹配滤波器的实际应用的例子。

在文字识别方面光学匹配滤波器是有用的。在一篇文章中要想知道其中有没有包含你所希望的文字或者是单词，并想知道该单词或者文字的位置，那么这时所希望检出的文字或者单词是已知信号，其他文字或单词都认为是噪音。我们利用图 3—34 所示的系统，先用所要检出的文字或者单词作全息照相匹配滤波器，把它放回 p_2 面上的原先作全息照相时的位置上，挡住 p_{12} 面，在 p_{11} 面放入被处理的文章透明片（胶卷）这时在 p_{32} 面上得到亮点相关输出，这个亮点出现的位置对应于文章中所要检出的文字或者单词的位置。图 3—41 表示了文章中检出文字“g”^[21]，图 3—42 表示了文章中检出单词“Optics”^[23]。利用这种原理美国已经

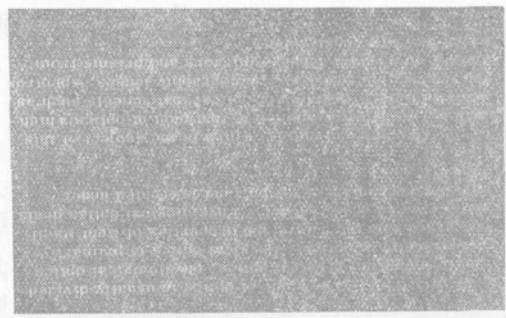


(a)

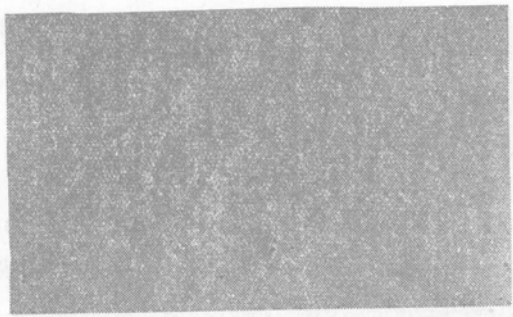
图 3—41

试制成一种光学匹配滤波相关器，从学术文献的微型胶卷中根据文章里有几个特定文字的办法作分类文献的判断。

光学匹配滤波器还可以用来从混乱的图样中检出已知的特定图样，图 (3—43) 表示了从混乱图样中检出矩形图样的例子^[21]，这样的技术可以用来从很多细胞中检出特定的细胞（如癌细胞），从而作医学诊断。还可以从航空摄影的侦察摄影照片中检出特定的目标。在雷达像

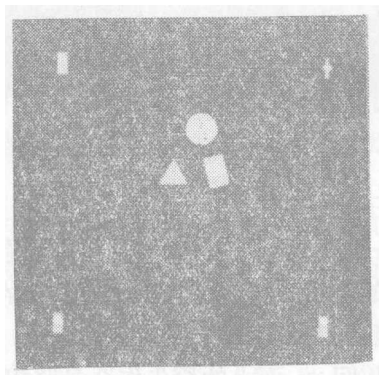


(a)

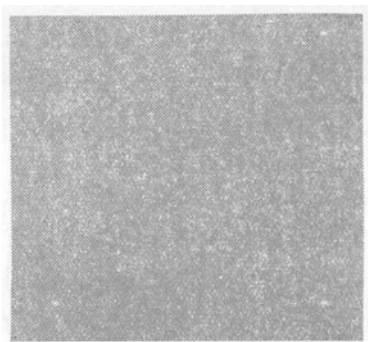


(b)

图 3—42

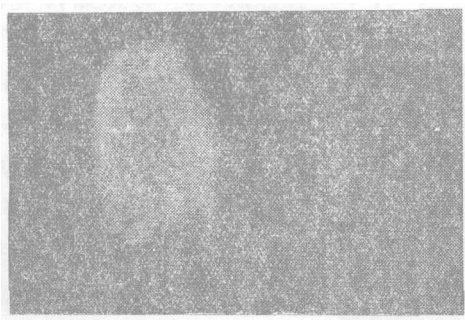


(a)



(b)

图 3—43



(a)



(b)

图 3—44

中检出特定的目标方面，J—ch.维诺 (Vie'not)^[24]报告了利用光学匹配滤波器从雷达像中检出特定目标的结果。

在指纹的辨别方面，利用光学匹配滤波相关方法可以从很多指纹图样中检出已知的指纹图样，这在破案中是有用的。因为指纹的空间频谱范围是已定的，故容易实现匹配相关处理，其指纹的辨别能力是很高的。图 3—44 表示利用光学匹配相关处理得到的指纹的相关结果，左图表示匹配相关时的输出信号，右图表示了不匹配相关的结果。^[25]

利用光学匹配滤波相关作测量方面的应用也是很广的。

在金属的疲劳试验中利用光学匹配滤波器得到很好的结果。如从金属试料表面反射的平行光用透镜会聚，把这个作为信号作富氏变换全息照片，一边把这个全息照片用同样的信号光再生，一边作试料的振动试验的话，因为金属表面的微小变化引起输出的下降，可以根据测量这个输出的变化进行试料的疲劳试验，已经测得了用眼能观察到的裂痕以前很早就出现的微小变化量。

在航空照片体视对的测量方面利用光学匹配滤波器，从两张体视对照片中求出被摄体的断面。早先航空照片体视对的处理是用人工判读的，然而具有良好的体视感的人不太多，并且经常看也十分劳累。电子技术发展以后用阴极射线管对体视对照片扫描，并由计算机算出其间的相关性，然而这种电子仪器只能对两个小面积的相应成区扫描匹配，然后测出其视差。应该说，用光学方法自动进行体视图的匹配更有利，因为光学系统本能地适宜于这种计算，而且速度快，这是由于图像是二维的，可以同时进行相关，而不是像电子计算机那样必需相继地逐个点进行相关计算。图3—45表示了利用改进的马赫—珍德 (March—Zehnder) 干涉仪作图像的一维匹配滤波相关^[26]。利用这个系统可以作航空照片体视对的视差测量。

设视差测量中两个体视照片表示为

$$g_1(x, y), g_2(x, y) \\ = g_1(x + p_x, y) \quad (3-38)$$

其中 p_x 为 x —视差位移量。图3—45中参考光束用 $K e^{i2\pi x_0 \omega_x}$ 表示，其中 K 为振幅， x_0 为参考源虚像偏离 p_1 面中心的量，它在 p_2 面上产生倾斜的平面波。

在图3—45的 p_1 面放入体视照片之一，则经过柱面镜和球面镜在 p_2 面上给出一维的富氏变换，用 $g_1(x - X_1, y)$ 表示体视照片中第一个照片，用 G_1 表示 g_1 的一维富氏变换频谱，则我们采用如下表示方式；

$$g_1(x - X_1, y) \longleftrightarrow G_1(\omega_x, y) e^{-i2\pi X_1 \omega_x} \quad (3-39)$$

其中符号 \longleftrightarrow 表示富氏变换。这样在 p_2 面上得到的全息照片为

$$G(\omega_x, y) = \left| K e^{i2\pi x_0 \omega_x} + G_1(\omega_x, y) e^{-i2\pi X_1 \omega_x} \right|^2 \\ = [|K|^2 + |G_1(\omega_x, y)|^2] \\ + K^* \cdot G_1(\omega_x, y) e^{-i2\pi X_1 \omega_x} \cdot e^{-i2\pi X_0 \omega_x} \\ + K \cdot G_1^*(\omega_x, y) e^{i2\pi X_1 \omega_x} \cdot e^{i2\pi X_0 \omega_x} \quad (3-40)$$

把这个拍摄的全息照片放回 p_2 面，在 p_1 面上放置第二个体视照片。这时第二个体视照片的富氏变换关系是

$$g_2(x - X_2, y) = g_1[x - (X_1 + p_x), y] \\ \longleftrightarrow G_1(\omega_x, y) e^{-i2\pi (X_1 + p_x) \omega_x} \quad (3-41)$$

因此经过全息照片滤波之后的光波为

$$G_1(\omega_x, y) e^{-i2\pi (X_1 + P_x) \omega_x} \cdot G(\omega_x, y) \\ = [|K|^2 + |G_1(\omega_x, y)|^2] \cdot G_1(\omega_x, y) e^{-i2\pi (X_1 + P_x) \omega_x} \\ + K^* \cdot G_1(\omega_x, y) \cdot G_1(\omega_x, y) \cdot e^{-i2\pi (x_0 + 2X_1 + P_x) \omega_x} \\ + K \cdot G_1^*(\omega_x, y) \cdot G_1(\omega_x, y) \cdot e^{i2\pi (x_0 - P_x) \omega_x} \quad (3-42)$$

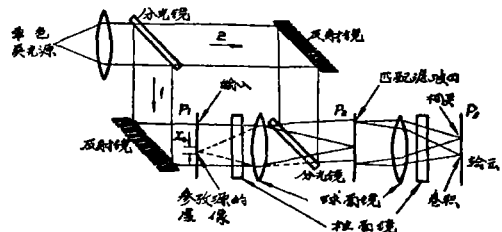


图3—45 利用改进的Mach—Zehnder干涉仪作图像的一维匹配相关处理

再利用球面镜和柱面镜在 p_3 面上得到(3-42)式的一维逆富氏变换,这时在 p_3 面上的输出对应于(3-42)式的三项,其中由(3-42)的第一项给出以 $x' = X_1 + P_x, y' = 0$ 为中心的衰减了的第二个体视照片的像,由第二项给出以 $x' = (x_0 + 2X_1 + P_x), y' = 0$ 为中心的 $g_1(x, y)$ 的卷积输出,由第三项给出以 $x' = -x_0 + P_x, y' = 0$ 为中心的所希望的 $g_1(x, y)$ 的自相关输出。这儿 x_0 是参考束位相移动决定的常数,故这个相关输出给出 P_x 随着 y' 坐标变化的量,这就给出 x —视差随照片上的 y 坐标变化的函数关系,从而测得所希望的 x —视差剖面图。图3-46表示了航空照片体视对的 x —视差剖面处理器^[26]。在处理时,体视照片之二的后

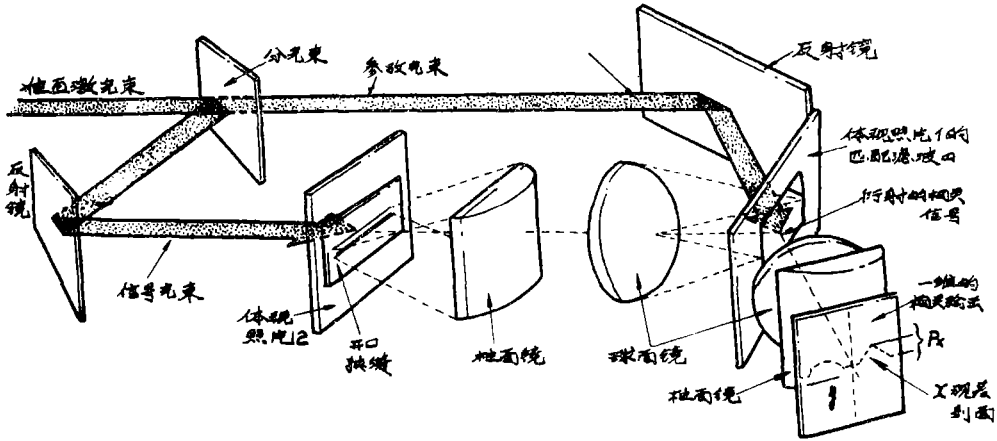


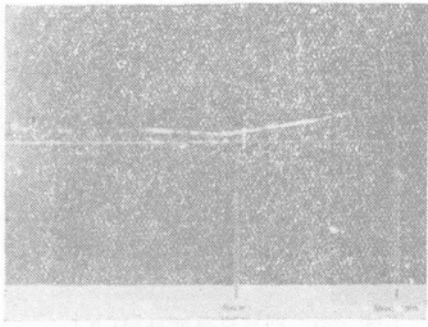
图 3-46 x —视差剖面处理

面放置狭缝,狭缝平行于 y 坐标,如果狭缝宽度小于参考光束的偏移量 x_0 的话,在输出面上三个输出互相不会重选,这样就可以同时得到照片上某一个给定的 x 坐标(即放置狭缝的位置坐标 x)的对应于所有 y 坐标的 x —视差剖面图,从而同时得到照片上该 x 坐标的地形断面图。然后根据狭缝位置的移动测得不同的 x 坐标的地形断面。图3-47是被处理的航空照片,图3-48的两个结果是从不同的滤波器得到的 x —视差剖面,从图中看到山和山顶以及盆地的位置。

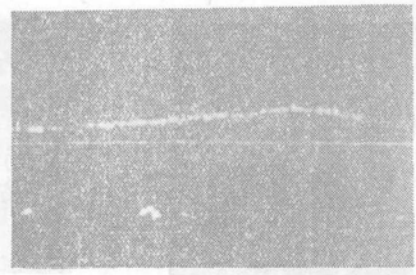


图 3-47

光学匹配滤波相关处理在测量方面实际得到应用的另一个例子是从气象卫星摄得的云的照片测得云的运动。美国F. B. 罗兹(Rotz)^[27]和A. Vander Lugt^[28]报告了从气象卫星(ATSI以及ATSIII卫星)得到的云的照片测得云的运动。人造卫星照相的云的运动分析可以用于预报局部地区和全球的气象情况。云的运动情况是对不同时间次序收集到的云的照片的比较观察来测得的。因为云在运动中它的形状和密度改变,人工分析器必须判断云在观察的时间间隔内位在多远的距离处。又因为云的不同部分可以向不同方向移动并速度也不同以及旋转和改变形状,故云的运动的测量是很麻烦的工作。但是利用光学相关处理器很方便地实现云的运动测量。因为光学相关器可以直接地作两张图像的互相关的二维显示。这些工作也可以对不同时间拍摄的地球某地区的航空照片进行处理。



(a)



(b)

图 3-48

图 3-49 表示了这种光学处理器的光学系统。用一个照片作富氏变换全息图放在变换平面，并另一个照片放在输入面，光学相关器输出面上的光强分布将对应于这两张照片的互相关输出。在两张图片中相同特征的部分将引起亮点，具有足够相同形状的转移了的图样将在输出面上产生离轴的亮点。这个点从中心的(输出面的中心)偏移量成比例于图样的位移量。利用输入面上放置的开口(光栏)的移动来显出感兴趣的图样的移动。在输入面中移动这个开口并且记录出现在输出平面中的互相关峰值的位置，对每一个开口位置进行记录，这样整个视场上的云的移动图可以展现出来。云的旋转是可以根据简单地旋转画幅使在输出平面

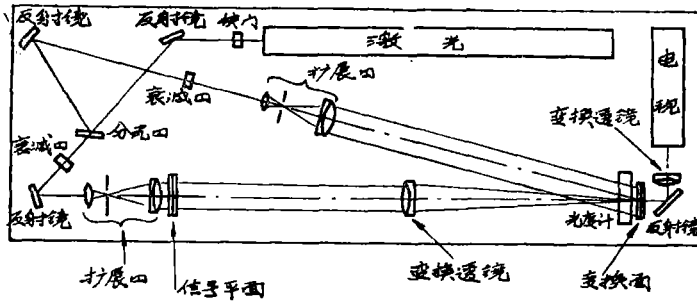


图 3-49 产生滤波器和光学处理的系统

中互相关的峰值成为最大的方法来测出。互相关峰值的大小是每一个画面中图样的类似性的量度。如果该图样的形状明显地改变了，互相关峰值将是相应地降低。根据这一点量度图样的类似性，用于云的形状的变化的判断上。图 3-50 表示了气象卫星 A T S III 于 1968 年 4 月 23 日拍摄的云的照片，其中画圆圈的图样部分被测量并绘出云的速度矢量。图 3-52 表示一些实验结果，实验中使用的匹配滤波器全息照片是用光塑料来制作的。图 3-52(a)(b) 表示作参考函数的和作匹配滤波处理的画面。在这个实验中使用的工作画面是只用了图 3-52(c) 表示的部分，减少了的画面仍然提供互相关峰值，如图 3-52(d)(e)，它具有足够的信噪比以便精确地测量整个画面的位置。由于光塑料材料作匹配滤波器是实时地



图 3-50

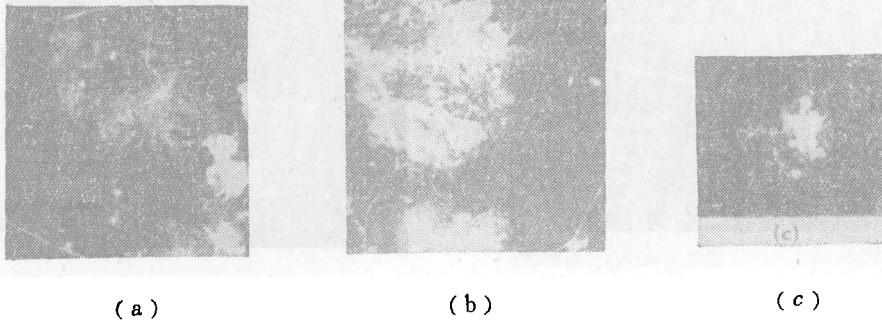


图 3-52

进行，图像的相关处理也是可以连续地进行。为了人造卫星拍摄的云的运动分析，发展了光学—电视—数字计算机联合的处理系统，图 3-54 表示了系统的读出系统。把光学匹配相关处理和计算结果用绘图仪自动描绘出来。

光学处理在地球科学方面的应用也是很广的^[29]，比如地震数据的光学处理方面，它的最广的应用是石油勘探时使用的地震反射方法。一个冲击波动力源放在地球表面附近，地震波产生并扩散，沿着各个方向进入地球内。当这个波打中地质带，如这儿岩石特征在改变，这时地震波的部分能量被返回到地球表面，把这个地震回波利用摆在地表面的一系列地震接收器接收，把这些信号记录在磁带上。把这些记录的信号利用光学相关处理，检出其中的有用信息，并利用空间滤波的方法滤掉不必要的频谱，如噪音谱，提高了分辨本领。

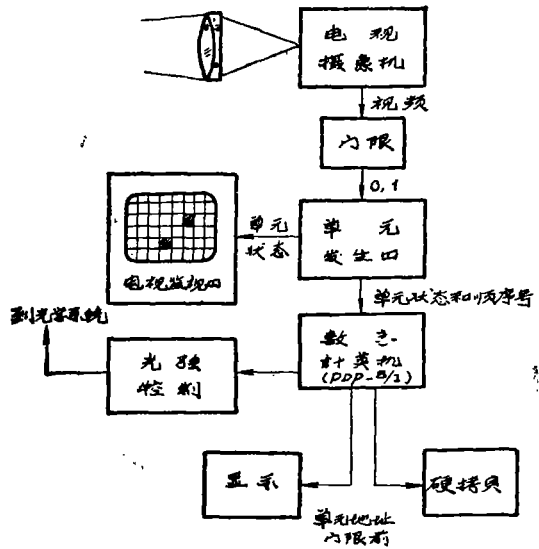


图 3-54 读出系统

2. 特征的识别

上节我们介绍了在给定的图像中消除噪音检出已知的特定信号的光学匹配滤波相关处理。在这一节中我们介绍的是对于给定的图像作这个未知图像的特征识别，即辨认物体。

首先介绍利用全息滤波相关处理作符号变换，用于文字识别，实现文字的自动读取的方法。

在通常的全息照相中，参考波是平面波，它不包含信息内容，但是如果参考波也包含信息内容的话，则再生时，物体波具有的信息和参考波具有的信息相互变换，比如信息内容 A 和信息内容 B 来作全息图，然后用信息 A 照明全息图，则再生出来信息 B ，反过来如果用信息 B 照明全息图，则再生出信息 A 。这叫信息的相互变换也叫符号变换全息术。

图 3-55 表示了信息变换的示意图，利用图 3-55(a) 的装置记录信息变换全息照相板，把相互变换的信息 A 和信息 B 分别放在相干光的各路中，从两个图像衍射出来的波面用照相干板重迭记录下来。这就成为信息变换器。在这个全息照相板上，如图 3-55(b) 所示，例如用信息 B 照射的话再生出信息 A 的波面，把这个波面用适当的镜头成像在输出面

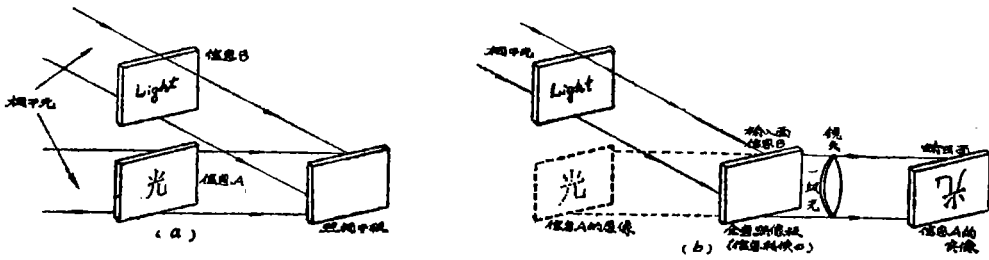


图 3-55

(a) 信息变换全息照相板的制作 (b) 信息变换, 英文输入中文输出的例

上, 在输出面可以读出信息 A。这些变换器可以作英文中文的相互变换翻译器, 这是毫无疑问的。

我们可以利用上节介绍过的图 3-34 的光学系统实现上述的信息变换。我们在上节已经指出在图 3-34 的装置中, 如果由 $g_1(x, y)$ 和 $g_2(x, y)$ 制作的全息图利用 $g_3(x, y)$ 再生的话, 根据 (3-35) 式和 (3-36) 式得到

$$\left. \begin{aligned} g_2'(x', y') &= g_2(x', y') \otimes [g_1^*(x', y') \star g_3(x', y')] \otimes \delta(x' - x_0, y') \\ g_1'(x', y') &= g_1(x', y') \otimes [g_2^*(x', y') \star g_3(x', y')] \otimes \delta(x' + x_0, y') \end{aligned} \right\} (3-43)$$

这儿若使 $g_1^* \star g_3 = \delta$ 的话, 那么 $g_2'(x', y') = g_2(x' - x_0, y')$, 又若使 $g_2^* \star g_3 = \delta$ 的话, 那么 $g_1'(x', y') = g_1(x' + x_0, y')$ 被得到。为此当我们取 $g_3 = g_1$ 则得到 $g_1^* \star g_3 = \delta$, 又当我们取 $g_3 = g_2$ 则得到 $g_2^* \star g_3 = \delta$ 。根据这个性质, 在图 3-34 中, 把 g_1 放在 p_1 面的 p_{11} 处, 把 g_2 放在 p_1 面的 p_{12} 处, 作富氏变换全息图, 然后把这个全息图放回 p_2 面, 如果用 g_2 再生的话, 在 p_3 面上 $x' = x_0, y' = 0$ 为中心得到 g_2 , 又如果用 pg_1 再生的话, 在 p_3 面上 $x' = -x_0, y' = 0$ 为中心得到 g_1 , 如此实现了 g_1 和 g_2 信息的相互变换。

日本的中岛真人等^[30]利用了上述的信息的相互变换原理制作了符号变换全息照相自动特征读取系统, 从显微胶卷上的文章自动读取文字。这是光学相关处理在实际中得到应用的一个重要方面。

图 3-56 表示了制作符号变换全息图的光学装置。从 He-Ne 激光器发出的光经过光束快门在半透板 HM 处分成两路。其中一路由反射镜 M_1 反射经过光强调节器 (衰减器), 然后又被反射镜 M_2 反射到光束偏折器中, 光束在光束偏折器中偏折之后经过由 L_1 和 L_3 组成的光束扩展器 (例望远镜) 变成宽的平行光束。用这个光束照明放在物面 p_1 上的记录文字的照相

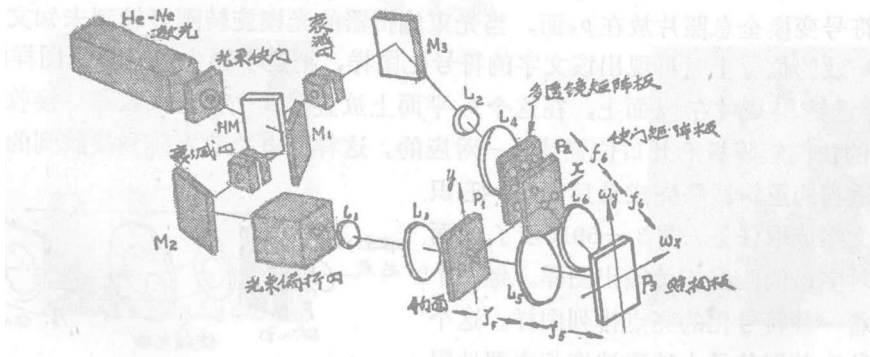


图 3-56 制作符号变换全息图的光学装置

底片，则经过富氏变换镜头 L_5 在 p_3 面上形成这个输入文字的富氏变换空间频谱。经过半透板 HM 的另一路光束是经过光强调节器（衰减器）之后被反射镜 M_3 反射，经过由 L_2 和 L_4 组成的光束扩展器（倒望远镜系统）变成宽的平行光束。这个平行光束经过具有 9 个小透镜的多透镜矩阵板被分成 9 个小光束，这 9 个小光束在小透镜的共同焦平面 p_2 上形成 9 个会聚的小亮点。在 p_2 面上放置着对应于这 9 个小亮点的 9 个开口快门矩阵板，根据控制这 9 个开口的开启和关闭，可以产生出 2^9 个符号化，利用这个 2^9 个符号化来实现 2^9 个文字的符号化，每一个文字对应于 2^9 个符号化中的一个符号。然后利用富氏变换镜头 L_6 在 p_3 面上形成 p_2 面的符号化图样的富氏变换空间频谱。这样在 p_3 面上记录 p_1 面上的输入文字和对应于该文字的符号化的 p_2 面图样的符号变换全息图。为了增加全息照片的储存能力，利用了光束偏折器，图 3—58 表示了 this 偏折器的原理。利用薄的光楔的旋转来实现光束的偏折方向的改变，这样在 p_3 面上输入文字的富氏变换的零级谱的位置在一个园周上旋转，因此可以沿着这个园周每一个输入文字被记录，为了在每一次曝光中避免低的空间频率成分的相互重迭，每一次曝光时稍微移动每个频谱中心的位置（沿着园环的间隔为约 200μ ），这样在直径为 15 毫米的高分辨率干板上可以记录 300 个文字。

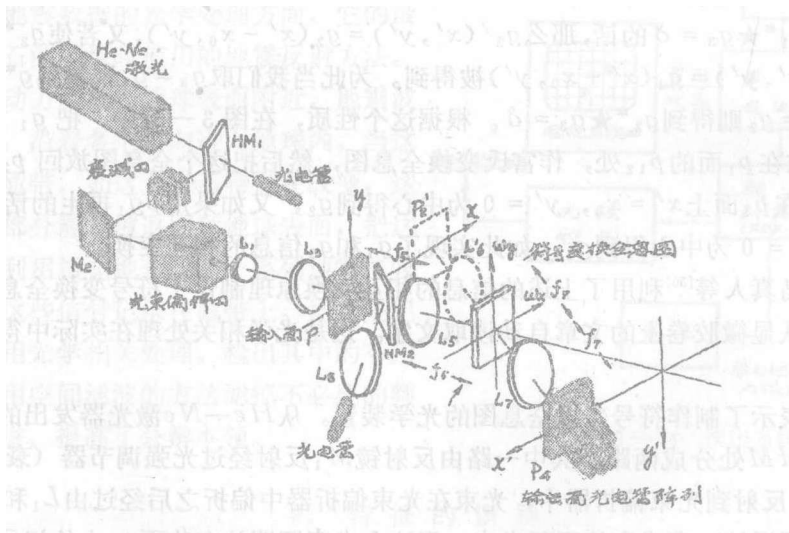


图 3—57 用于特征读取的光学装置

图 3—57 表示了用于特征读取的光学装置。把未知的文字放在输入面 p_1 ，把记录着各种文字的符号变换全息照片放在 p_3 面，当光束偏折器的光楔旋转刚好转到未知文字和被储存的文字一致的位置上时再现出该文字的符号化图样，把这个再生的符号化图样的虚像平面 p_2' 面利用透镜 L_7 成像在 p_4 面上，在这个 p_4 平面上放置了 9 个光电接收器，接收器的位置和 p_2 面上的快门矩阵板的开口位置是一一对应的。这样光电接收器阵列接收到的符号化信号再经过适当的逻辑线路完成最后的特征识别，完成文字读取任务。图 3—59 表示了 p_4 面上输出的对字母的匹配相关输出图样。每一个字母对应着一种符号化的亮点排列图样。这个文字自动读取装置的最大读取速度将主要地限制在光楔的旋转速度上，实验结果表明利用快

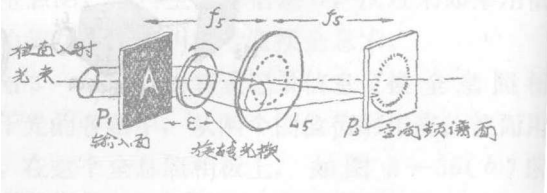


图 3—58 旋转楔光束偏折器原理

速马达能够得到500特征/秒的读取速度^[31]。这样的读取速度如果利用一般的电子计算机实现的文字自动读取装置的话很难达到的。

在图像的特征识别技术中有时利用光学镜头的富氏变换特性，把图像的频谱显示出来，然后根据分析这个频谱来判断图像类别。例如，从航空照片中的飞机，飞机场，道路，建筑物，荒原等的频谱进行分析，不仅可以辨认物体，而且还可以估计其大小。又如物体有大有小（如飞机），但它各部分有近于固定的比例，因此其特性频率和谐波之间也有固定的关系，可以作为识别的线索。美国的通用汽车公司根据这种研究，制成型号为AC-DRL DPS S^[32]的自动辨认机。它的任务是将航空拍摄的地面图像分类。特别着重于两个大类，即大规模人工经营过的地面与未经人工加工的地面。而在人工加工过的大类中，可分出道路，道路交叉点，建筑，果园等，据称，在试验的两大类中荒芜地区的正确率达86.1%，人工经营的正确率达98.8%。图3—60表示自然地貌及其谱，图3—61表示自然地貌上的路及其谱，图3—62表示交叉的公路及其谱，图3—63表示果园及其谱，图3—64表示大建筑物群及其谱，图3—65表示飞机场跑道及其谱。

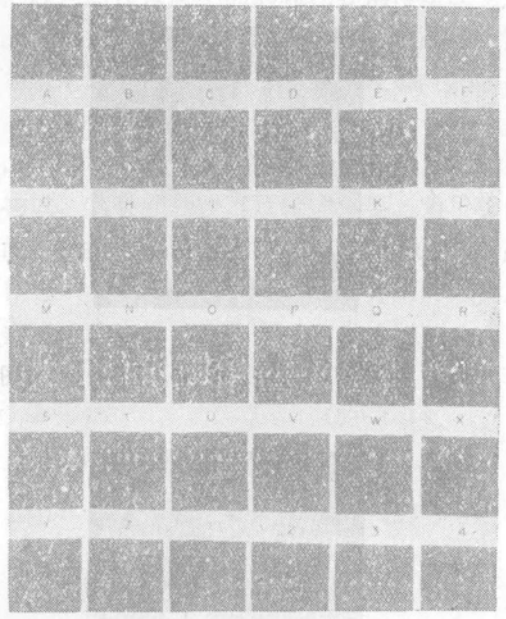
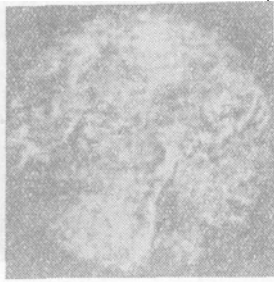
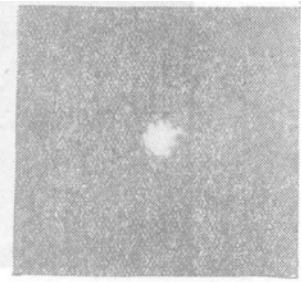


图 3—59 对字母的匹相关输出

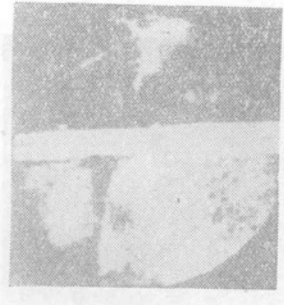


(a)

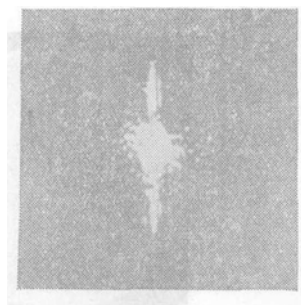


(b)

图 3—60

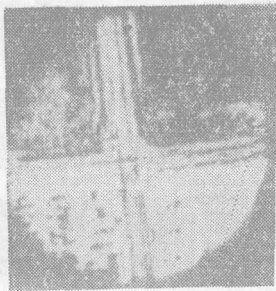


(a)

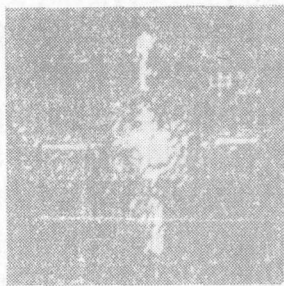


(b)

图 3—61

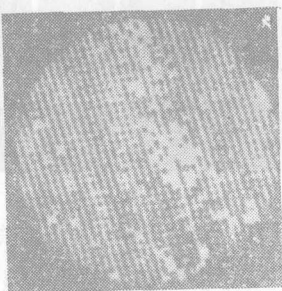


(a)

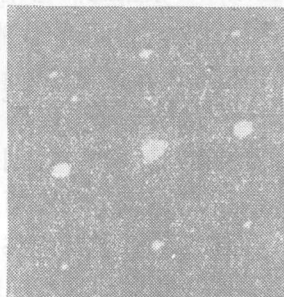


(b)

图 3-62

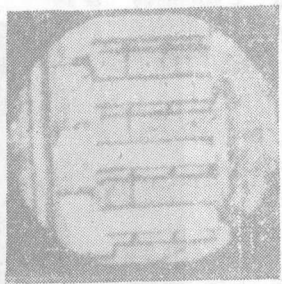


(a)

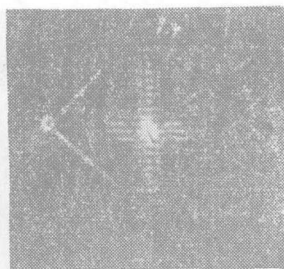


(b)

图 3-63

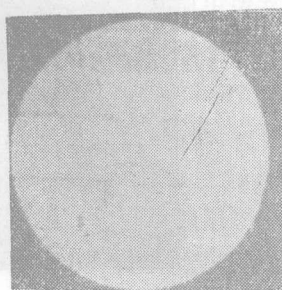


(a)

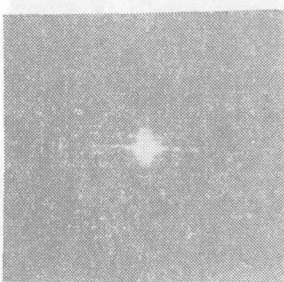


(b)

图 3-64



(a)



(b)

图 3-65

这种技术的进一步发展是多色的频谱分析。把彩色照片按着不同的颜色分别作富氏变换取得各自的频谱^[33]，利用三组不同方向的光栅使三种颜色的频谱在不同方向上出现而不致重叠。这种分析对于图像识别是有很大好处的，因为航空照片对于地面上具有特征颜色的目标将得到更容易地识别。

人眼对于图像的辨认关键在于图像中的边缘，因为视觉对于边缘轮廓比较敏感。实际上这是个常识，特别在国画中，景物常由若干线条构成，其余部分远不及轮廓重要。为了突出图像中的边缘轮廓，我们可以利用空间滤波的方法，去掉图像中的低频而突击图像中的高频，使轮廓突击，这方面的内容将在像质改善中作进一步介绍。我们在下面要介绍的是利用相干光学相关方法作空间的微分处理，从而专门描出像的边缘的方法^[34]。

函数 $f(x, y)$ 的一阶导数可以表示为差分式

$$\Delta x f = [f(x+h, y) - f(x, y)]/h \quad (3-44)$$

这儿 h 是小的正数。由于 δ 函数和任意函数 $f(x, y)$ 的相关表示为

$$\iint f(\xi, \eta) \delta[\xi - (x+a), \eta - (y+b)] d\xi d\eta = f(x+a, y+b) \quad (3-45)$$

方程 (3-44) 可以写成

$$\begin{aligned} \Delta x f &= \frac{1}{h} \iint f(\xi, \eta) [\delta(\xi - x - h, \eta - y) - \delta(\xi - x, \eta - y)] d\xi d\eta \\ &\equiv \left(\frac{1}{h}\right) \cdot f(x, y) \star g_1(x, y) \end{aligned} \quad (3-46)$$

其中

$$g_1(x, y) = \delta(x+h, y) - \delta(x, y) \quad (3-47)$$

而符号 \star 表示相关。

因此函数 $f(x, y)$ 的一阶导数是用两项相关的极限来表示，当 h 趋近于零

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \lim_{h \rightarrow 0} \Delta x f = \lim_{h \rightarrow 0} \left[\left(\frac{1}{h}\right) \cdot f(x, y) \star g_1(x, y) \right] \quad (3-48)$$

类似地可以得到

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \lim_{h \rightarrow 0} \left[\left(\frac{1}{h}\right) f(x, y) \star g_2(x, y) \right] \quad (3-49)$$

其中

$$g_2(x, y) = \delta(x, y+h) - \delta(x, y) \quad (3-50)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} = \lim_{h \rightarrow 0} \left[\frac{1}{h} f(x, y) \star g_3(x, y) \right] \quad (3-51)$$

其中

$$g_3(x, y) = \delta(x+h, y) + \delta(x, y+h) - 2\delta(x, y) \quad (3-52)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = \lim_{h \rightarrow 0} \left[\left(\frac{1}{h^2}\right) f(x, y) \star g_4(x, y) \right] \quad (3-53)$$

其中

$$\begin{aligned} g_4(x, y) &= \delta(x+h, y) + \delta(x-h, y) + \delta(x, y+h) \\ &\quad + \delta(x, y-h) - 4\delta(x, y) \end{aligned} \quad (3-54)$$

其中

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \lim_{h \rightarrow 0} \left[\left(\frac{1}{h^2}\right) f(x, y) \star g_5(x, y) \right] \quad (3-55)$$

其中

$$g_5(x, y) = \delta(x+h, y+h) + \delta(x, y) - \delta(x, y+h) - \delta(x+h, y) \quad (3-56)$$

前面已经讲过利用全息照相空间滤波的方法容易实现相关和卷积处理。从(3-48)式,对一阶导数 $\partial f/\partial x$ 的所希望的脉冲响应是两个,即

$$g_1(x, y) = \delta(x+h, y) - \delta(x, y) \quad (3-47)$$

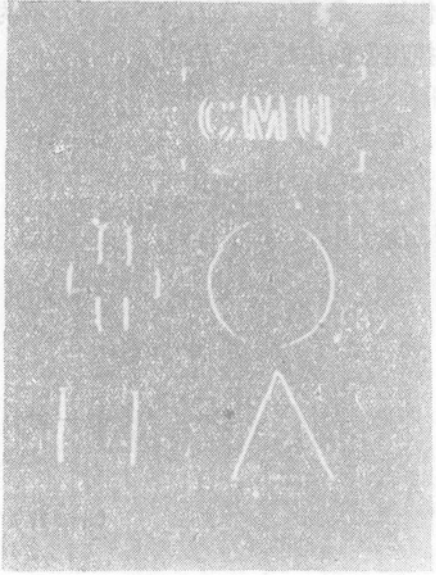
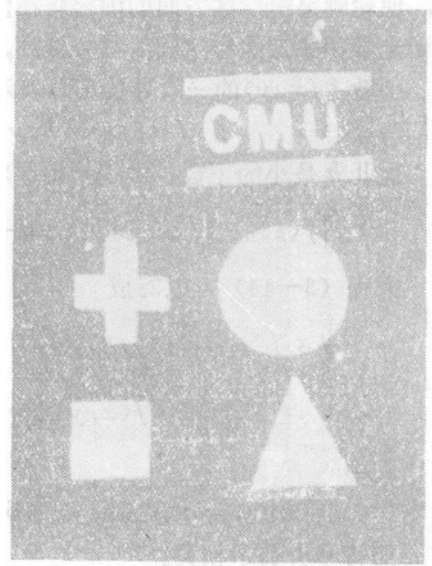


图 3-66



图—3—67

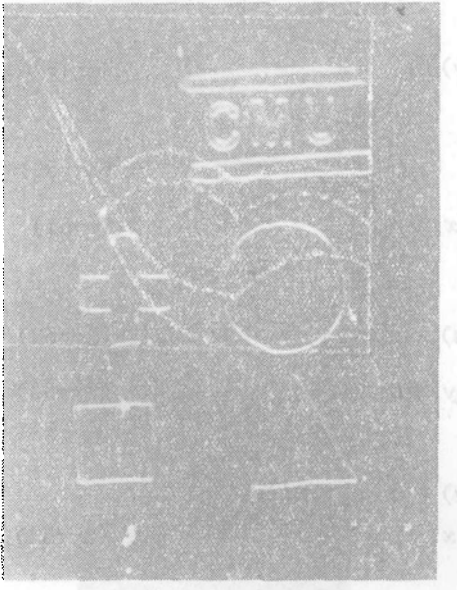


图 3-68



图 3-69

因此，所希望的空间滤波器是可以由两次曝光技术产生。这时参考波的干涉是在第一次曝光时与脉冲响应 $\delta(x, y)$ 进行，而在第二次曝光时与脉冲响应 $\delta(x+h, y)$ 进行。这个脉冲响应即 δ 函数可以由透镜聚焦平面波的焦点来近似，而负号的实现是靠引进位相移动 π 的位相延迟板或者靠两次曝光中有一次把记录底片移动半个光栅周期的方法。把这样制作的空间滤波器放在图3—34表示的光学系统的频谱面 p_2 面上，把被处理的函数 $f(x, y)$ 放在输入面 p_1 面上，进行空间滤波处理，则在输出面 p_3 面上产生出 $\partial f/\partial x$ 的微分结果。图3—66表示了微分处理 $\partial f/\partial x$ 的实验结果，图3—67表示了被处理的函数的物体图样，图3—68表示了 $\frac{\partial f}{\partial y}$ 的处理的实验结果，图3—69表示了 $\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y}$ 的处理的实验结果，图3—70表示了 $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$ 的处理的实验结果，图3—71表示了 $-\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}$ 的处理的实验结果。

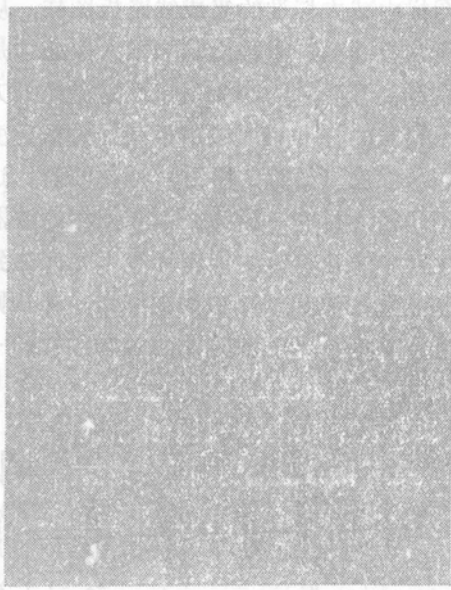


图3—70

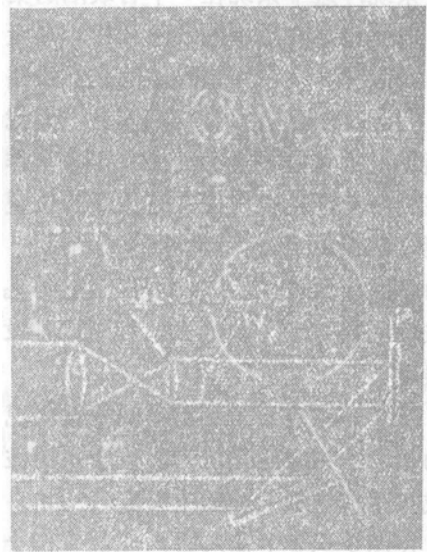


图3—71

3. 图像的相减

本节要介绍的是图像识别中应用的一种专门技术，在图像中检出新的目标图样。这种技术在侦察摄影照片的处理中非常有用，比如对某一个景物先照一张照片，过一个时间再照一张照片，把这两张照片相减使差别显示出来，以便发现新的目标，如发现新建的导弹发射井或新修的公路等。图像的相减技术在很多方面有重要应用，在医学诊断方面，把两张不同时期拍照的 x —光照片相减可以发现新的病变，在大规模的集成电路生产中检查产品质量时可以检出产品和标准样品之间的别差来检查产品的缺陷等等。下面我们介绍图像相减的三种典型的方法。

(1) 利用光学空间滤波的方法

图3—72表示了集成电路产品检验中使用的产品缺陷增强系统^[35]。在目视检验集成电路的质量时用普通光学显微镜检查很高的重复性线路是很困难的，故迫切需要提供一种没有主

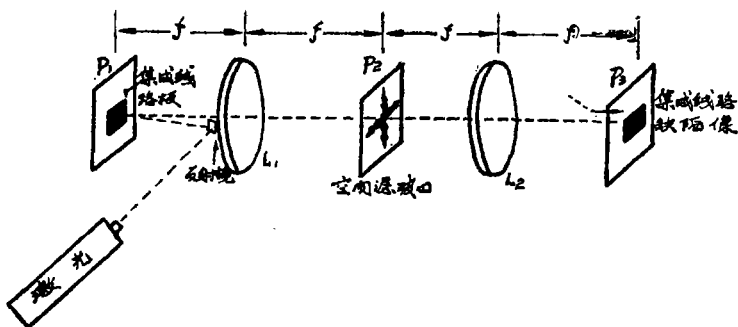


图 3—72 集成线路板缺陷增强系统

观因素的标准目视检验设备。为了减少目视检验的主观性，发展了利用光学空间滤波的缺陷检查系统，这个系统在一个有缺陷的集成线路板图样中减去标准的集成线路板图样，从而突出了集成线路产品中的缺陷图样。在大量的集成线路板的生产中被检验的输入像必须是反射像，所以图 3—72 中被检验的集成线路板是通过稍微离开光轴的小反射镜反射激光的方法照明，因此得到接近垂直的照明。空间滤波器是把无缺陷的标准集成线路板图样的富氏变换空间频谱记录在高分辨力的照相干板上作成。因此它是强度（振幅的平方）逆滤波器。这是为了在大量生产中输入面和滤波面的位置精度可以不严格之目的，因为振幅和位相滤波器的位置精度是按微米（ μ 级）级的高精度，而在大量生产中快速检验的周围环境不允许达到这么高的精度。通过逆滤波之后在输出面 p_3 上显示出被检验的集成线路板的缺陷像，并规则的集成线路图样被大大地消去。利用这种设备可以检查出 2.5 微米的缺陷像，每 30 秒检验一块集成线路板。

图 3—73 表示了利用空间滤波实现复数振幅的相加或相减的系统^[36]。这个系统被应用到集成线路掩模板的检验上^[37]。

在图 3—73 中输入面 p_1 上放置两个照相掩模板，用准直光束照明 p_1 面，其透过光束经过双开口板，这个开口的宽度选择为它们之间的间隔距离的一半。设放置在输入面 p_1 上的两个照相掩模板的振幅透过率分别为 $g_1(x-x_0, y)$ 和 $g_2(x+x_0, y)$ ，这两个照相掩模板的位置分别对应于双开口的位置。经过富氏变换镜头 L_1 在 p_2 面上形成的振幅分布为 G ，则

$$G = F[g_1(x-x_0, y) + g_2(x+x_0, y)] \\ = G_1(\omega_x, \omega_y)e^{-i2\pi\omega_x x_0} + G_2(\omega_x, \omega_y)e^{i2\pi\omega_x x_0} \quad (3-48)$$

其中 $F[\]$ 表示富氏变换。设在 p_2 面上放置正弦光栅的照相板，这个正弦光栅是利用两个振幅相同的平面波干涉而得到的，其振幅透过率为

$$T = 2 + 2\cos 2\pi\omega_x x_0 = 2 + e^{i2\pi\omega_x x_0} + e^{-i2\pi\omega_x x_0} \quad (3-49)$$

则透过正弦光栅的光振幅分布是

$$G \times T = 2G_1e^{-i2\pi\omega_x x_0} + 2G_2e^{i2\pi\omega_x x_0} \\ + G_1e^{-i4\pi\omega_x x_0} + G_2e^{i4\pi\omega_x x_0} + G_1 + G_2 \quad (3-50)$$

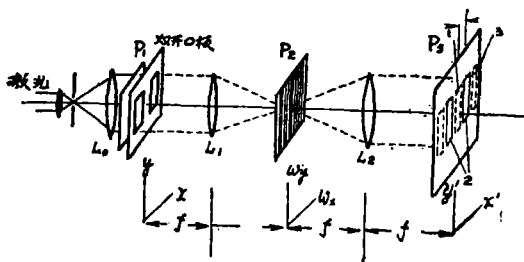


图 3—73 空间滤波复数相减系统

这个振幅分布再经过镜头 L_2 富氏逆变换, 在 p_3 面上给出的振幅分布为 $F^{-1}[G \times T]$, 则

$$F^{-1}[G \times T] = 2g_1(x' - x_0, y') + 2g_2(x' + x_0, y) + g_1(x' - 2x_0, y') \\ + g_2(x' + 2x_0, y') + g_1(x', y') + g_2(x', y') \quad (3-51)$$

其中 $F^{-1}[\]$ 表示富氏逆变换。从(3-51)式的最后两项表示在 p_3 面的中心处得到两个图像 g_1 和 g_2 的振幅相加, 这种处理可以用在像的清晰上。

如果我们把 p_2 面上的正弦光栅移动四分之一周期, 则其振幅透过率表示成

$$T = 2 + 2\sin 2\pi\omega_x x_0 \\ = 2 - ie^{i2\pi\omega_x x_0} + ie^{-i2\pi\omega_x x_0} \quad (3-52)$$

这时

$$G \times T = 2G_1 e^{-i2\pi\omega_x x_0} + 2G_2 e^{i2\pi\omega_x x_0} \\ + iG_1 e^{-i4\pi\omega_x x_0} - iG_2 e^{i4\pi\omega_x x_0} - iG_1 + iG_2 \quad (3-53)$$

在 p_3 面上的振幅分布为

$$F^{-1}[G \times T] = 2g_1(x' - x_0, y') + 2g_2(x' + x_0, y') + ig_1(x' - 2x_0, y') \\ - ig_2(x' + 2x_0, y') - ig_1(x', y') + ig_2(x', y') \quad (3-54)$$

从(3-54)式的最后两项看到

$$-ig_1(x', y') + ig_2(x', y') \\ = g_1(x', y') e^{-i\frac{\pi}{2}} + g_2(x', y') e^{+i\frac{\pi}{2}}$$

因此在 p_3 面的中心处得到两个图像的振幅相减。这个方法直接应用到集成电路掩模板的检验上。这时两个开口的一个位置对应于放置标准掩模板, 另一个位置对应于放置被检验的掩模板, 则在输出面的中心显示出两个掩模板的差别部份, 即缺陷部分^[37]。

(2) 利用全息照相的方法^{[38],[39]}

如图3-74所示, 在通常的全息照相中信号波为 $\psi_s(x, y) = A_s(x, y)e^{i\phi_s(x, y)}$, 参考波为 $\psi_R(x, y) = A_R e^{ikax}$, 其中 $k = 2\pi/\lambda$, λ 是波长, $a = \sin\theta$,

参考波和信号波相加的振幅为

$$\psi(x, y) = \psi_R(x, y) + \psi_s(x, y)$$

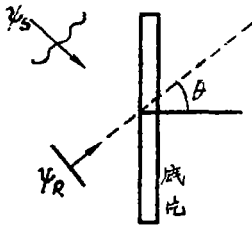


图3-74

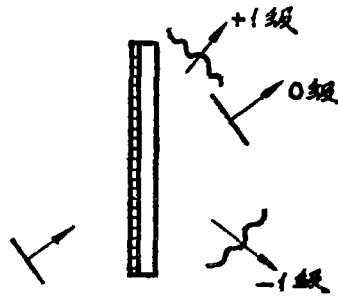


图3-75

$$= A_R e^{ikax} + A_s(x, y) e^{i\phi_s(x, y)} \quad (3-55)$$

记录在照相底片上的光强为

$$\begin{aligned} I(x, y) &= \psi(x, y) \cdot \psi^*(x, y) = A_R^2 + A_s^2(x, y) \\ &+ A_R A_s(x, y) e^{i[kax - \phi_s(x, y)]} \\ &+ A_R A_s(x, y) e^{-i[kax - \phi_s(x, y)]} \end{aligned} \quad (3-56)$$

在线性处理的范围内振幅透过率 η 和曝光时间 t_e 的关系是 (见图3-76)

$$\eta = \eta_0 + st_e(I - I_0) \quad (3-57)$$

为此必须是 $A_R/A_s(x, y)$ 足够大, 并选择合适的 t_e 使 E_0 在线性记录范围的中心, $I_0 = A_R^2 + [A_s^2(x, y)]_{\text{最大}}$ 取最佳值, 但通常由于参考束比信号束强得多, 故用 $I_0 = A_R^2$ 来代替。把这个 I_0 和(3-56)表示的 $I(x, y)$ 代到(3-57)式中得全息图的振幅透过率

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_0 + st_e A_s^2(x, y) + st_e A_R A_s(x, y) \\ &\cdot [e^{i\{kax - \phi_s(x, y)\}} + e^{-i\{kax - \phi_s(x, y)\}}] \end{aligned} \quad (3-58)$$

让我们用 $A'_R e^{ikax}$ (其中 $A'_R = \text{常数} \times A_R$) 来照明全息图 (3-58), 从全息图透过的光波为

$$\begin{aligned} \psi_H(x, y) &= A'_R e^{ikax} \cdot \eta = [A'_R \eta_0 + A'_R st_e A_s^2(x, y)] e^{ikax} \\ &+ st_e A'_R A_R A_s(x, y) e^{i[2kax - \phi_s(x, y)]} \\ &+ st_e A'_R A_R A_s(x, y) e^{i\phi_s(x, y)} \end{aligned} \quad (3-59)$$

当 $A_R > A_s$ 时, (3-59)式的第一项是正的, 而第二和第三项是负的振幅, 因为底片记录的 S 是负值 (见图3-76)。一个负的振幅相当于位相移动 π 弧度, 因为 $e^{i\pi} = -1$, 这样, 离开全息图的光波最后表示为

$$\begin{aligned} \psi_H(x, y) &= [A'_R \eta_0 + st_e A'_R A_s^2(x, y)] e^{ikax} \\ &+ [(-S) t_e A'_R A_R A_s(x, y)] e^{i[2kax - \phi_s(x, y) + \pi]} \\ &+ [(-S) t_e A'_R A_R A_s(x, y)] e^{i[\phi_s(x, y) + \pi]} \end{aligned} \quad (3-60)$$

在(3-60)式中, 第一项是直接过去的, 但振幅不再是常数, 而是全息图 H 的坐标的函数。第二项是衍射波, 在图3-75中 +1 级表示的光波, 这个波我们在这儿是不感兴趣的。第三项是衍射波, 在图3-75中 -1 级表示的光波, 这个波和原来的物体信号波 $A_s(x, y) e^{i\phi_s(x, y)}$ 非常相似, 不同的只是振幅均匀地变弱和位相移动了 π 弧度。

现在如果我们用两个波来照明全息图, 一个是参考波 $A'_R e^{ikax}$, 另一个是原来的物体波 $A'_s(x, y) e^{i\phi_s(x, y)}$ (其中 $A'_s = \text{常数} \times A_s$), 那么直接透过的 $A'_s(x, y) e^{i\phi_s(x, y)}$ 和再现衍射波中的第三项 $[(-S) t_e A'_R A_R A_s(x, y)] e^{i[\phi_s(x, y) + \pi]}$ 的部分可以完全抵消, 比如, 当这两个波的振幅相等时。这样用两个波照明全息图时再现波场表示在图3-77中, 我们用 ψ_H 表示这个光波场, 则

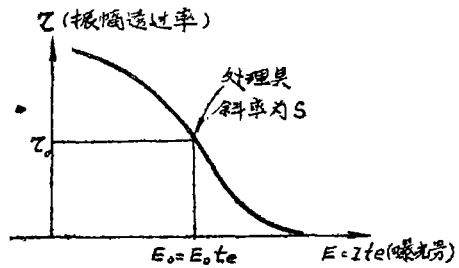


图3-76

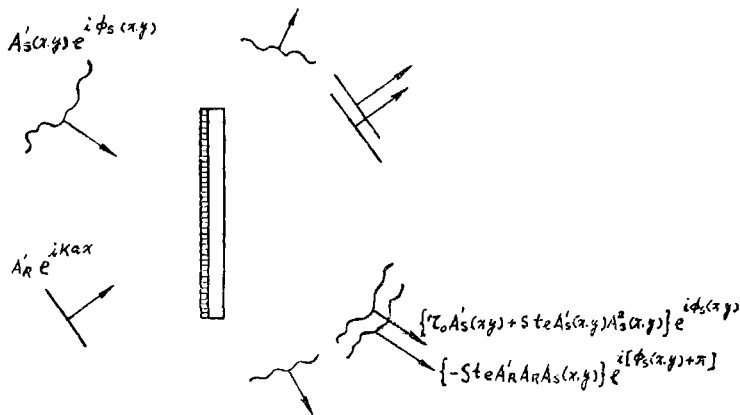


图 3-77

$$\begin{aligned}
 \psi_{H_s}(x, y) &= [A'_R e^{ikax} + A'_s e^{i\phi_s}] \cdot \eta \\
 &= [\eta_0 A'_R + St_e (A'_R A_s^2 + A'_s A_R A_s)] e^{ikax} \\
 &+ [\eta_0 A'_s + St_e (A'_s A_s^2 + A'_R A_R A_s)] e^{i\phi_s} \\
 &+ (St_e A'_R A_R A_s) \cdot e^{i[2kax - \phi_s]} \\
 &+ (St_e A'_s A_R A_s) \cdot e^{-i[kax - 2\phi_s]} \quad (3-61)
 \end{aligned}$$

这儿 A_R, A'_R 是常数, A_s, A'_s, ϕ_s 是 (x, y) 的函数。在 (3-61) 式中第二项为

$$\begin{aligned}
 &[\eta_0 A'_s + St_e (A'_s A_s^2 + A'_R A_R A_s)] e^{i\phi_s} \\
 &= [-St_e A'_R A_R A_s] e^{i[\phi_s + \pi]} \\
 &+ [\eta_0 A'_s + St_e A'_s A_s^2] e^{i\phi_s} \quad (3-62)
 \end{aligned}$$

为了把这两项完全消掉, 这两个位相差 π 的光波的振幅要相等, 即

$$-St_e A'_R A_R A_s(x, y) = \eta_0 A'_s(x, y) + St_e A'_s(x, y) A_s^2(x, y) \quad (3-63)$$

因为, $t_e = E_0/I_0, I_0 = A_R^2$, 故

$$t_e = E_0/A_R^2 \quad (3-64)$$

这样 (3-63) 变成

$$A'_s(x, y) + \frac{SE_0}{\eta_0 A_R^2} [A'_s(x, y) A_s^2(x, y) + A'_R A_R A_s(x, y)] = 0 \quad (3-65)$$

当处理时, $SE_0/\eta_0 = -1$, 则 (3-65) 式简化为

$$\frac{A'_R}{A'_s(x, y)} = \frac{A_R}{A_s(x, y)} - \frac{A_s(x, y)}{A_R} \quad (3-66)$$

又当 $A_R^2 \gg A_s^2(x, y)$ 时, (3-66) 式又简化为

$$\frac{A'_R}{A'_s(x, y)} = \frac{A_R}{A_s(x, y)} \quad (3-67)$$

也就是要求参考波和信号波的强度比在制作全息照相时和再现时相同。

图 3—78 表示了利用上述原理作实时相减的系统。镜头 L_1 和 L_2 组合成输入成像系统，镜头 L_3 和 L_4 组合成输出成像系统。光阑挡住不需要的衍射光。把某一个图像的全息图放在原来作全息图的位置上（图 3—78 中全息照相板位置），用另一个图像和参考束再现这个全息图，则这两个图像的差别显示在输出面上。图 3—79 表示了利用图 3—78 的系统处理的图像相减结果。图 3—79 中 (a) 表示一张室外景物照片，(b) 表示放大的全息图，(c) 表示在景物照片 (a) 中增加一辆吉普车的照片，(d) 表示图像 (a) 和图像 (c) 相减的输出像，只显出了一辆吉普车，其余相同部分全部被减掉^[39]。

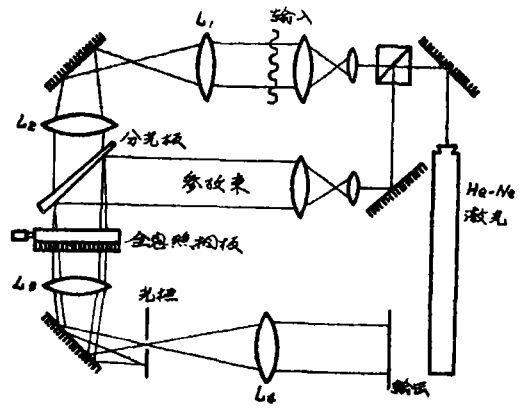
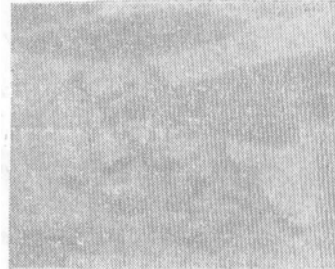


图 3—78 实时全息相减系统



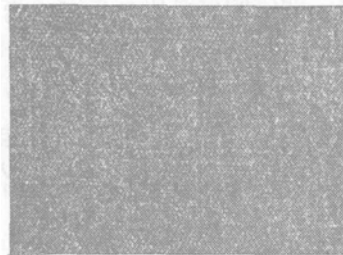
(a)



(b)



(c)



(d)

图 3—79

(3) 利用随机漫射板的方法

利用随机漫射板的光学处理可以用在两个像之间的差别的接收，像的重迭记录，在被调制的像中恢复原来的像时像的对比反转，通讯中的编码和译码，黑白记录的像中恢复像的颜色等方面^[40]。在这些处理中被处理的信号是由随机漫射板（具有高的空间频率的）调制，所以在空间滤波处理时信号的谱在频谱面上散开，这样给空间滤波带来了方便条件。

图 3—80 表示记录信号的光学装置。设 A 为被处理的信号， D 表示漫射板的透过因子。

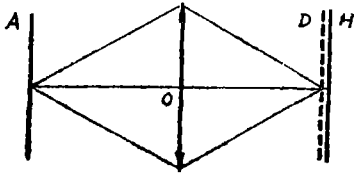


图 3—80

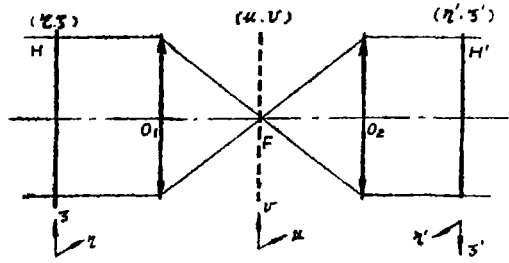


图 3—81

透明信号板 A 由镜头 O 成像在漫射板 D 上。一个高分辨力的照相板 H 紧靠着 D 后面放置，照相板的记录是 A 和 D 的相乘 $A \cdot D$ 。 D 和 H 之间的距离是尽可能地减小，使实际上可以看成在一个面上。设这个平面的坐标为 (η, ζ) 。这个照相板被两次曝光，这两次曝光之间把底片位移，如在 ζ 方向移动，则整个记录的光强是

$$\begin{aligned} & A(\eta, \zeta)D(\eta, \zeta) + A(\eta, \zeta - \zeta_0)D(\eta, \zeta - \zeta_0) \\ & = A(\eta, \zeta)D(\eta, \zeta) \otimes [\delta(\eta, \zeta) + \delta(\eta, \zeta - \zeta_0)] \end{aligned} \quad (3-67)$$

这个照相底板在通常的线性条件下被处理。

把这个照相板放在如图 3—81 所示的相干光学处理系统的输入面，用相干的平行光照明，其透过率的振幅分布为

$$t(\eta, \zeta) = t_0 - \beta_0 [A(\eta, \zeta)D(\eta, \zeta) \otimes \{\delta(\eta, \zeta) + \delta(\eta, \zeta - \zeta_0)\}] \quad (3-68)$$

其中， t_0 和 β_0 是常数。

在物镜 O_1 的焦平面上产生的振幅分布为

$$T(u, v) = t_0 \delta(u, v) - \beta_0 [\tilde{A}(u, v) \otimes \tilde{D}(u, v)] \cdot [1 + e^{-2\pi i v \zeta_0}] \quad (3-69)$$

其中， $\tilde{A}(u, v)$ 和 $\tilde{D}(u, v)$ 分别表示 $A(\eta, \zeta)$ 和 $D(\eta, \zeta)$ 的富氏变换， (u, v) 表示焦平面上的空间频率坐标。在 (3-69) 式中第一项是镜头 O_1 的后焦点处的点光源的直接像，因为这一项小，可以忽略掉。(3-69) 的第二项是乘积 $A \cdot D$ 被因子 $(1 + e^{-2\pi i v \zeta_0})$ 调制的谱。

因子 $(1 + e^{-2\pi i v \zeta_0})$ 是杨氏干涉条纹，条纹的方向垂直于照相底板的移动方向。

让我们考虑由狭缝阵列组成的栅格，设它和条纹有同样的空间频率，这样的栅格位于焦平面，并使狭缝和条纹的最大值位置相一致，则通过狭缝的信号在图 3—81 的 H' 面给出像。如果把栅格在它的平面中移动半个周期，使狭缝和条纹的极小值位置相一致，则信号的信息不能传递到 H' 面上。所以调制信号频谱的条纹系统提供一种抽取所需要的信息的滤波器。

现在利用这种方法接收照片 A 和 B 的差别，照片 A 和 B 的某些部分相同，照片都是黑白透明片。设差别 $b = B - A$ 。利用图 3—80 装置记录信号。第一次曝光是 A 被漫射板 D 调制而记录下来。第二次曝光是把底片移动 ζ_0 之后把 A 换成 B 而记录，这两次照相记录时要求 A 和 B 中相同的部分的位置要一致。这两次曝光的总照相记录是

$$\begin{aligned} & (A \cdot D) \otimes \delta(\eta, \zeta) + (B \cdot D) \otimes \delta(\eta, \zeta - \zeta_0) \\ & = (A \cdot D) \otimes \{\delta(\eta, \zeta) + \delta(\eta, \zeta - \zeta_0)\} + (b \cdot D) \\ & \quad \otimes \delta(\eta, \zeta - \zeta_0) \end{aligned} \quad (3-70)$$

如果写成对称的形式，则

$$(A \cdot D) \otimes \left\{ \delta \left(\xi + \frac{\xi_0}{2} \right) + \delta \left(\eta, \xi - \frac{\xi_0}{2} \right) \right\} + (b \cdot D) \otimes \delta \left(\eta, \xi - \frac{\xi_0}{2} \right) \quad (3-71)$$

这样的记录放在图 3—81 的输入面上，则在 0_1 的焦面上得到的频谱是（略掉点光源的直接像）

$$2 \cdot (\tilde{A} \otimes \tilde{D}) \cdot \cos \left(2\pi v \cdot \frac{\xi_0}{2} \right) + (\tilde{b} \otimes \tilde{D}) \cdot e^{-2\pi i v \cdot \frac{\xi_0}{2}} \quad (3-72)$$

如果有一个狭缝栅格，它具有与条纹的周期相同的周期，把它放在 0_1 的焦面上，并使狭缝和条纹的极小值一致，则 (3—72) 式的第一项被挡住，只让第二项通过。经过 0_2 的富氏逆变换，在 H' 面上给出

$$(b \cdot D) \otimes \delta \left(\eta', \xi' - \frac{\xi_0}{2} \right) \quad (3-73)$$

其中， (η', ξ') 为 H' 面上的坐标。我们在 $\eta' = 0, \xi' = \frac{\xi_0}{2}$ 为中心得到被 D 调制的差别 b 的像。设漫射板 D 的空间频率足够高，则 b 的重现像的质量不受影响。从而实现 A 和 B 的相减。

这样的处理对于比较两个不同时间拍摄的实际人造卫星照片方面是有用的。这些照片的变化是由大气抖动或地球表面自然现象引起的变化以及人工修建的地面新目标引起的。

图 3—82 和图 3—83 是两个不同时间拍摄的卫星照片。图 3—84 是这两张照片的差别的

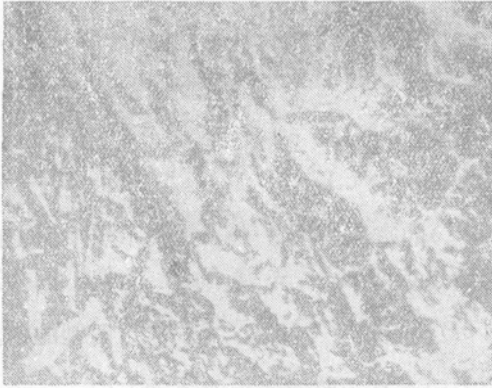


图 3—82

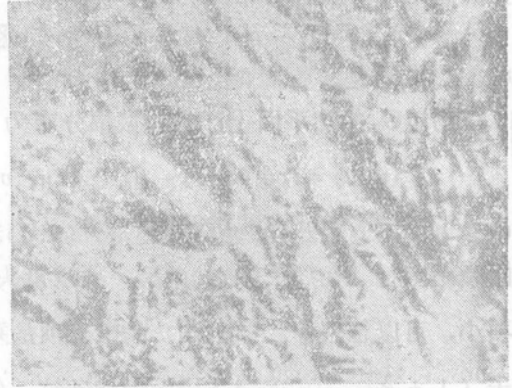


图 3—83

像，从这一张照片看到左边的相同部分（如河流）变黑，并显示出太阳高度不同和覆盖的雪不同引起的地面照度的差别。

以上我们介绍了光学相关处理在电信号以及光学图像信息的处理方面的应用，然而光学处理的潜力还没有充分发挥出来。为了增强光学处理的灵活性和应用性，我们需要（1）输入交接设备，把输入的电信号以及非相干光学信号转变为相干光学信号。（2）随机擦涂和重复记录的可逆记录材料以满足实时处理。（3）输出交接设备，把光学处理器的输出信号转变成

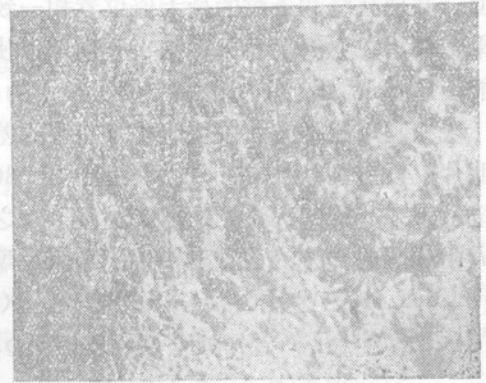


图 3—84

电子学信号。正是因为光学处理器的输入和输出交接设备还不够完善，以及可逆记录介质还没有得到应用，所以光学处理的潜力还没有充分地发挥出来。在本章结束之前我们对光学处理器的前途起很重要作用的可逆记录介质作以简要地介绍。对这些材料目前正进行着大量的研究工作，但是现状来看还没有得到充分满意的材料，还难说今后哪一种材料成为实用化。

表 1 可逆记录介质^[41]

记录材料	材 料	写 入		消 去 时 间	读 出		重 复 记 录 寿 命	
		灵 敏 度 (毫焦耳/ 厘米 ²)	时 间		效 率 (%)	分 辨 力 (条/毫米)	写 入 和 消 去 次 数	读 出 次 数
磁光材料	MnBi	10	10ps~50ns	~ μ s	10^{-2} (Paraday) 10^{-1} (kerr)	~1000	不 定	∞
电光材料	LiNbO ₃	$10^3 \sim 5 \times 10^5$	10s~分	10s~分	80	~1500	不 定	对相同波 长不可能
光致变色体材料	各种	50	~ns	~ns	1.2~3.7	~10000	不 定	漂 白
金属薄膜	Bi	50	5~20ns	~ls	6	~1000	~10	∞
强诱电光导材料	Bi ₄ Ti ₃ O ₁₂	1	~ms	~ms	10^{-2}	~800	> 10^5	不 定
压电陶瓷	PLZT	10	~S	~s	不详细	~50	疲 劳	不 定
热塑料材料	Staybelite	10^{-3}	1ms	~ls	15	~1000	100	∞

表中: s=秒 ms=毫秒 μ s=微秒 ns=毫微秒 ps=微微秒

其中利用磁光效应的是 MnBi, EuO等, 在反磁场中把方向一致的磁化状态材料根据写入的光升温到居里点以上, 并使磁化反转来进行写入。读出是, 根据磁化方向利用法拉第 (Faraday) 旋转或者克尔 (Kerr) 效果的差别来进行。这个材料的重复记录的寿命是足够的, 但是衍射效率低, 灵敏度低是缺点。

利用电光效应的是 LiNbO₃ 单晶等, 衍射效率可达80%以上、在多重记录, 彩色全息照相用记录介质方面被利用, 作为立体型位相全息照相材料的典型介质。作为这种材料还研究着 LiTaO₃, Ba_{0.75}Sr_{0.25}Nb₂O₆, Ba₂NaNb₅O₁₅ 等单晶。记录是利用光激发引起的捕获电子所产生的空间电荷电界的性质, 根据这时产生的折射率的变化来进行记录。但这种材料灵敏度过低, 像的保存性能差, 只对短波感光等是缺点。关于灵敏度掺 Fe, Rh 等杂质来提高灵敏度的研究也正在进行着。

光致变色体材料是根据光照射时改变吸收波长来进行记录。在无机结晶中被保护的电子被激发的, 碱石盐的结晶色中心, La作为杂质包含的BaF₂, 含Fe和Mo的SrTiO₃, 卤化银分散在玻璃中等, 都表现光致变色性质。这些材料是着色中心在电子或者原子的量级上, 所以分辨力非常高, 但写入用波长范围窄, 着色也得不到充分的对比度, 衍射效率低等是缺点。当利用与写入的光不同波长的光照射时得到

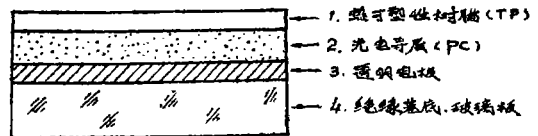


图 3-85 热塑料介质构成

消去结果。

热塑料是这些可逆记录材料中灵敏度较高的材料。图3—85,表示热塑料介质的构成,在玻璃透明绝缘基板上附着透明电极,这个透明电极上面涂上几个微米厚的高分子光电导层,然后再涂上软化点更低的热可塑性树脂0.1~1微米。记录是由静电力使(TP)变形,根据表面的凹凸来写入。即利用光电导性质,由曝光量的差引起的光电导差变成(TP)层上所加的电位差,根据这个静电力把(TP)加热软化,形成表面变形。当消去时,利用比写入时更强的加热,根据(TP)层的表面张力来再生平滑表面。热塑料介质的灵敏度是由(PC)的光灵敏度所决定的,正发展着各种增加灵敏度的方法,已经得到了与Kodak649—F高分辨率照相干板灵敏度相当的灵敏度,其灵敏度为5~100微焦耳/厘米²。这个材料的分辨率可以达到4000条/毫米,衍射效率为40%,重复寿命为500次以上,这些结果已被报告了。

其他可逆记录材料有压电陶瓷(PLZT等)和光电导性物质组合的,利用金属薄膜的蒸发,表示珀克尔效果的物质和光电导性物质组合的等等。

另外,在玻璃半导体中,有根据光照射改变折射率的性质,这些性质也被用来记录光学信息,这是有希望的。

As₂S₃是当光照射时其吸收端往长波方向移动,同时发生折射率的变化。把这个材料用作记录材料,用Ar激光写入,用He—Ne激光读出,热处理或用高能激光照射来消去。这种材料衍射效率可达80%,分辨率3000条/毫米,但灵敏度低,为此加电学的偏压来提高灵敏度的方法正进行着研究。

本文由于纸面限制没有能够列上有关光学相关处理的全部内容,比如利用计算机全息照相方法作匹配滤波器的相关处理^{[42][43][44]},利用非相干光的光学匹配滤波相关处理^{[45][46][47][48][49]}等。本文没有写上来的部分还可以参考有关评论文章^{[50][51][52]}和一些专著^{[53][54][55][56][57]}来补充。

参 考 文 献

- [1] L. J. Cutrona, G. O. Hall and E. N. Leith, Inst, Radio Engrs, Trans, MIL—5,127(1961)
- [2] L. J. Cutrona, E. N. Leith, L. J. Porcell and W. E. Vivian, Proc, IEEE 54,1026(1966)
- [3] E. N. Leith and A. L. Ingalls, Appl Opt ics 7, 539(1968)和E. N. Leith, Proc IEEE 59,1305 (1971)
- [4] W. E. Kock, "Applications of Holography" ed E. S. Barrekette et al, (Plenum Press 1971) P323,
- [5] E. N. Leith, J. O. S. A. 63,119(1973)
- [6] G. L. Martin, and K. von Bieren, Goodyear Aerospace Corp. Private Communication (1963)
- [7] A. Kozma, E. N. Leith and N. G. Massey, Appl Optics 11, 1766 (1972)
- [8] Ian N. Court, IEEE Trans, MTT—17,11,968(1969)
- [9] Leo. Slobodin, Proc IEEE, 51,12,1782 (1963)
- [10] M. Arm, L. Lambert, I. Weissman, Proc. IEEE, 52,7,842(1964)
- [11] N. F. IZZo, Proc. IEEE 53. 11. 1740 (1965)
- [12] M. B. Schulz, M. G. Holland, and L. Davis, Jr., Appl. Phys, Letters 11,7,237 (1967)
- [13] J. H. Collins, E. G. H. Lean and H. J. Shaw, Appl, Phys, Lettrs, 11,7,240 (1967)
- [14] I. L. Jernigan, Proc IEEE, 56,3,374 (1968)
- [15] G. Meltz, and W. T. Maloney, Appl, Optics, 7,10,2091 (1968)
- [16] M. King, W. R. Bennett, L. B. Lambert, and M. Arm, Appl, Optics, 6,8,1367 (1967)

- [17] L. J. Cutrona, "Optical and Electro—Optical Information Processing" m. i. t. pp83—123 (1965)
- [18] M. Arm, and M. King, Appl Optics 8,7,1413 (1969)
- [19] L. B. Lombert, M. Arm, and A. Aimette, "Optical and Electro—Optical Information processing" m. i. t. (1965) pp715—748
- [20] J. A. Boden, "Opto—Electronics Signal Processing Techniques" (AD—701805) OTS (1970) 第二十七篇
- [21] A. Vander Lugt, IEEE Trans Information Theory IT—10, 139, (1964)
- [22] A. Kozma and D. L. Kelly, Appl Optics 4, 387 (1965)
- [23] A. Vander Lugt, Optica Acta 15, 1, 1—33 (1968)
- [24] J—ch. Vie'not et J. Bulabois, Rev, Opt. 44, 621 (1965)
- [25] J. Tsujuchi, K. Matsuda and N. Takeya, "Application of Holography" ed E. S. Barrekette et al, (Plenum Press 1971) P247
- [26] S. J. Krulikowski, Jr, D. Kowalski and F. R. Whitehead, J. SPIE, 9, 104 (1971)
- [27] F. B. Rotz and M. O. Greer, IEEE. J. Quantum Electronics QE—7, 323, (1971)
- [28] A. Vander Lugt, "Developments in Holography" S. P. I. E. Seminar Proceedings Volume 25, pp117—124 (1971)
- [29] M. B. Dobrin, IEEE Spectrum 5, 9, 59 (1968)
- [30] M. Nakajima, T. Morikawa, and K. Sakurai, Appl Optics 11, 362, (1972)
- [31] Kenjiro Sakurai, Hiroshi Akahori and Takitaro Morikawa, IEEE. J. Quantum Electronics QE—7, 6, 310 (1971)
- [32] G. G. Lendaris and G. L. Stanley Proc. IEEE, 58, 198 (1970)
- [33] W. Fink, Optics Communications, 5, 1, 20 (1972)
- [34] S. K. Yao and S. H. Lee, J. O. S. A. 61, 475 (1971)
- [35] R. L. Beadles and W. M. Breen, Program Optical Society of America; Topical Meeting on the use of Optics in Microelectronics, (1971), MB4
- [36] S. H. Lee, S. K. Yao and A. G. Milnes J. O. S. A. 60, 1037 (1970)
- [37] L. S. Watkins, Appl Optics, 12, 1880 (1973)
- [38] M. A. Monahan, K. Bromley, J. F. Bryant and B. J. Thompson, Opto—Electronics Signal Processing Techniques (AD—701805) OTS (1970) 第十八篇
- [40] M. Francon, Optica Acta 20, 1, 174 (1973) 和 nouvelle REVUE D' OPTIQUE 5, 3. 153~168 (1974)
- [41] J. Bordogna 等, RCA, Rev, 33, 227, (1972)
- [42] A. W. Lohmann, D. P. Paris and H. W. Werlich, Appl Optics 6, 1139, (1967)
- [43] B. R. Brown, and A. W. Lohmann, Appl, Optics 5, 967, (1966)
- [44] A. W. Lohmann and D. P. Paris Appl, Optics 7, 651, (1968)
- [45] G. Groh, Appl, Optics 8, 967, (1969)
- [46] A. W. Lohmann and H. W. Werlich, Appl, Optics, 10, 670, (1971)
- [47] W. T. Maloney, Appl, Optics, 10, 2127 (1971)
- [48] J. D. Armitage and A. W. Lohmann, Appl Optics 4, 461, (1965)
- [49] M. De and A. W. Lohmann, Appl Optics 6, 2171, (1967)
- [50] 社内順平 "应用物理" 1972年6月号 p542
- [51] 栗田正一, 中島真人, "照明学会杂志" 1971年5月号 p248
- [52] 北山丰树, "光学技術コンタクト" 1973年 vol. 11, No. 9, p. 11.
- [53] A. R. Shulman, "Optical Data Processing" (1970)
- [54] G. W. Stroke, "An Introduction to Coherent Optics and Holography" (Second Edition 1969)
- [55] Kendall Preston, Jr, "Coherent Optical Computers" (McGraw—Hill, New York, 1972)
- [56] J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics" (McGraw—Hill, New York, 1968)
- [57] H. Lipson, "Optical Transforms" Academic Press, London, New York (1972)