

光学信息处理讲座

第八讲 非相干光(白光)信息处理

羊 国 光

(中国科学技术大学)

光学信息处理在六十及七十年代的发展,主要集中在相干光处理技术上,它取得了许多重要的成果。与此同时,计算机图象处理也以惊人的速度发展着,并得到了广泛的应用。即使如此,光学信息处理仍未失去它的青春活力。其主要原因在于,光学系统对二维信号(图象)具有高容量的平行处理能力,这是计算机处理所望尘莫及的。

然而,相干光学处理的发展存在着一些根本性的障碍。因此,自七十年代后期以来,非相干光(白光)信息处理开始发展起来,并且愈来愈为人们所重视。

我们先简单说明相干光与非相干光系统的基本区别,并对相干光系统存在的主要困难进行分析,然后讨论非相干光系统对噪声的抑制作用,最后对非相干光处理系统及白光彩色图象处理系统作一些典型的介绍。

一、相干光与非相干光处理系统的基本区别

我们知道,一个单色光信号在某点的振动可用在该点的复振幅表示。对完全相干光其波阵面是稳定的。因此,当用相干光去照明一张底片时,所得到的输出是复振幅输出。当有几束相干光迭加时,它满足复振幅迭加的原则,即

$$U(x, y, z) = \sum_i U_i(x, y, z), \quad (1)$$

就是合成的复振幅为各束光的复振幅之和。然而人眼、底片或其他光接收器可感知的是光强

度,它是复振幅的平方,即

$$\begin{aligned} I(x, y, z) &= |U(x, y, z)|^2 = \left| \sum_i U_i \right|^2 \\ &= \sum_i |U_i|^2 + \sum_{i \neq j} U_i \cdot U_j \\ &= \sum_i I_i + \sum_{i \neq j} U_i \cdot U_j. \end{aligned} \quad (2)$$

然而,完全非相干光系统却有不同的特点。这是由于对非相干光源,每个原子(或分子)的发光是完全独立的,或者说是完全无规的,故其波阵面的位相随时间无规变化,而观察是对时间的平均效应。这样(2)式中的第二项,在非相干光情况下其平均值为零,则有

$$I(x, y, z) = \sum_i I_i, \quad (3)$$

由此可知,非相干光系统的总光强度是各束光的强度之和。

因此,相干光与非相干光系统的基本区别在于,前者满足复振幅迭加原则,后者满足光强度迭加的原则。显然,复振幅可取正值、负值或其他复数值。这样使得相干光处理系统有可能完成加、减、乘、除、微分、卷积积分、傅里叶变换等多种运算。而非相干光系统中,光强度只能取正值。故相干光系统处理信息的能力比起非相干光系统要丰富得多。这就是为什么一般采用相干光而不用非相干光进行信息处理的主要原因。

然而,相干光处理存在着几个基本困难。首先,相干光系统要求输入以复振幅形式出现,即输入图象要制成透明片,用激光去照明它。这就排除了直接使用显象管的荧光屏或发光管列

阵作为输入信号的可能性。而在许多实际应用中信号是以这种形式提供的。现已发展了一套光学与电子学混合处理系统，可以直接使用这类非相干信号^[1]。

其次，激光是单色性很好的光源，因此相干光系统原则上只能处理单色图象。对彩色图象处理几乎无能为力。

最后应指出，相干光处理系统的主要困难是相干照明引起的噪声。由于这种噪声，使得相干光处理的图象总是斑纹重迭，有时甚至会把信号淹没。因此噪声问题成了相干光学信息处理发展的一个严重障碍。正是上述后两点，促进了对非相干光处理技术的研究。

二、相干光系统中的噪声

激光是一种很好的相干光源，用它很容易进行干涉或衍射实验。然而，正是由于极好的相干性却带来了令人烦恼的相干噪声。

在光学系统中(如透镜、反射镜、分束器等)不可避免地存在一些缺陷，如气泡、擦痕以及尘埃、指印或霉斑等。当用相干光照明时，这些小缺陷将产生衍射，而这些衍射波之间又会互相干涉，从而形成一系列杂乱无章的条纹，与图象重迭在一起，无法分开。这就是所谓相干噪声。

另外，当用激光照明一个漫射物体时，物体表面上各点反射的光在空间相遇而发生干涉。由于漫射物体的表面是粗糙的，其微观起伏是无规则的，故这种干涉效应也是混乱的。因此，观察用相干光照明的漫射物体时，这个物体总是麻麻点点的。这种噪声称为散斑噪声。同样，一个透明漫射体也能产生散斑噪声。

由于相干噪声及散斑噪声的存在，使得相干光处理的结果总不令人满意。这就是近年来发展非相干光处理技术，以改善光学处理的输出数据的信噪比的基本原因。

三、非相干光系统对噪声的抑制

非相干光系统对噪声的抑制作用，是从通

讯论中的多余通道的概念发展而来的。例如发送某个信号用了 N 个信息通道(象同时用几路电话通道来传一个电话)，那么第 i 个通道的输出信号振幅为

$$a_i = s + n_i \quad (4)$$

其中 n_i 为第 i 个通道上的噪声，不同通道上的噪声是不同的； s 为信号，它对所有的通道却是相同的。这样，总的输出强度为

$$I = E \left\{ \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2 \right\}, \quad (5)$$

这里 $E\{ \}$ 表示取平均。把(4)式代入(5)式，则

$$I = N^2 s^2 + 2Ns \sum_{i=1}^N E\{n_i\} + \sum_{i,j=1}^N E\{n_i n_j\}, \quad (6)$$

由于噪声是完全无规的，故其振幅的平均值为零，即 $E\{n_i\} = 0$ 。应注意，不同通道的噪声是互不相关的，因此

$$E\{n_i n_j\} = 0, \quad (i \neq j)$$

而

$$E\{n_i^2\} = \sigma^2,$$

其中 σ 为平均噪声水平。最后可得

$$I = N^2 s^2 + N\sigma^2. \quad (7)$$

由上面分析可知，单一通道上的信噪比为 s^2/σ^2 。当引入 N 个多余通道后，信噪比为 Ns^2/σ^2 。因此，多余通道的引用使输出信噪比可以提高 N 倍。

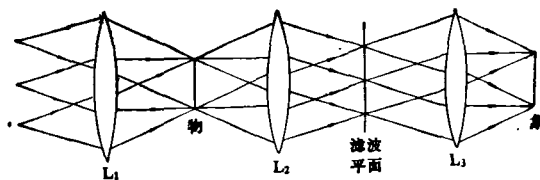


图1 扩展光源引入的多余通道

这一点在光学中也容易理解。如图1所示，用三个互不相干的点光源代表单色非相干扩展光源。光源放在准直镜 L_1 的焦平面上。显然，不同的点光源发的光经准直镜后，将通过不

同的路径到达象平面.由图可见,不同路径的光所成的象是相互重迭的,也就是不同通道的信号是相同的.但由于不同的路径所通过的光学系统的区域不同,故不同通道上的缺陷分布不相同,也就是说不同通道上的噪声分布是不相同的.而这些点光源之间互不相干,故输出平面上的噪声是不同通道上噪声的强度相加,最终的效应就是对噪声的平均.因此,用空间非相干的扩展光源可以提高输出图象的信噪比.

同样也可降低光源的时间相干性(即多色光源)达到相同的目的.例如在白光系统中插入某种光栅结构,由于不同的照明波长,光栅的衍射角各不相同.不同波长的光以不同通道通过光学系统.这与空间非相干光照明的情况相类似.因此白光系统同样对噪声有抑制作用.

四、非相干光信息处理与全息术

现在发展的非相干光处理系统实际上采用的不是完全非相干光,而是部分相干光.其主要思想在于^[2],适当地降低光源的相干性,使该系统不失去相干光处理的优点,即仍满足复振幅迭加而不是强度迭加的原则.但由于非相干光源的应用,使系统获得了多余通道,从而降低了噪声.因此,这种系统兼有相干光系统与非相干光系统的优点,十分引人注目.

通常用的白光源,由于灯丝或电弧总有一定大小,总是扩展光源.它不具有所要求的空间相干性.那么如何得到这种非相干光源呢?一般可以将白光源通过一个透镜聚焦,焦点就是光源的象,也是有一定大小的.为获得足够的空间相干性,最简便的方法就是在焦点上放一个针孔.这相当于把一扩展光源变为一个点光源.这就从扩展白光源中选出了适当的空间相干性,以保证系统满足振幅变换的原则.针孔的大小要根据实际处理系统的要求来决定,一般取几十微米到二百微米范围.

下面举几个典型例子对非相干光系统加以说明.

1. 非相干光图象消模糊^[3-5]

模糊图象一般是指在曝光过程中相机与目标之间的相对运动引起的线性运动模糊,或由于相机调焦不正确而引起的离焦模糊.通常图象消模糊方法是所谓逆滤波法,这已在本讲座中有另文介绍,不再赘述.

在消模糊中噪声问题特别严重.我们知道,由于线性运动模糊使原来清晰的边缘变得模糊.用频率分析的语言来说,就是在模糊过程中大多数高频分量损失了.逆滤波法就是压制低频分量,增强图象的高频成分,以达到恢复原图象的目的.这样在输入图象上以及由光学系统产生的噪声(一般是高空间频率噪声)在消模糊过程中都会被相当地放大.所以被恢复的图象总是不可避免地夹杂着十分显著的噪声.

为此,发展了一种非相干光图象消模糊方

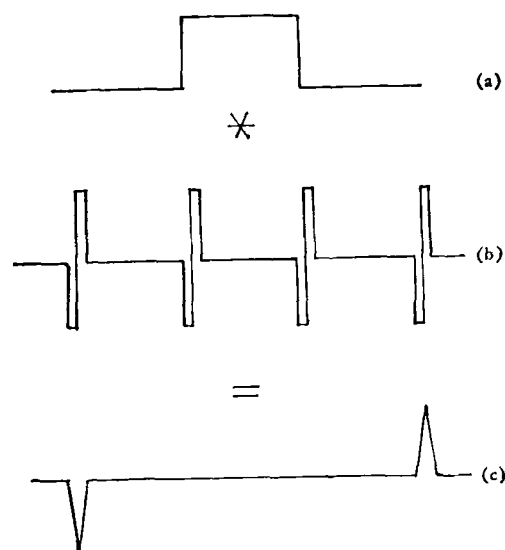


图2 消模糊运算过程

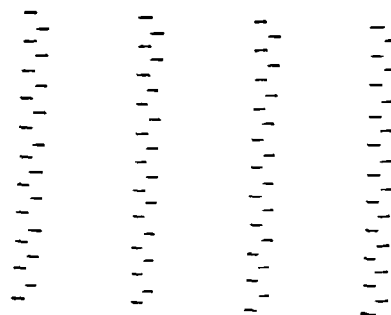


图3 消模糊函数的实现

法。其基本过程如图 2 所示。大家知道，线性运动模糊将一个点变为一条线。因此可用一个矩形状的函数 $r(x)$ 模拟最基本的模糊图象[见图 2(a)]。图 2(b) 为消模糊函数 $h(x)$ 。将二者进行卷积运算（在光学中只要在透镜前焦面上将 $h(x)$ 与 $r(x)$ 的傅里叶变换函数重叠在一起，在透镜的后焦面上就可以得到 $h(x)$ 与 $r(x)$ 的卷积运算），就获得图 2(c) 的卷积结果，为两个恢复的图象。在光学上可采用如图 3 所示的光栅结构的膜片来实现消模糊函数 $h(x)$ 。由于两个相邻狭缝光栅之间位错相差二分之一周期，当用光照明时，在两个光栅的第一级衍射处，可得到相邻脉冲间的位相差为 π 。这就是所要求的消模糊函数。由于两个相邻脉冲间的位相差只与两个光栅的位错有关，而与照明波长无关，因此，即使采用白光照明，也可得到相同的消模糊函数。这个系统可用点白光光源照明。再之，消模糊运算只是在一个方向上的消模糊，在另一个方向上只是简单的成象关系，故可在成象方向上把光源扩展为线光源而不会影响复振幅运算。线白光源的采用使该系统获得了足够的多余度，使它对噪声有相当的抑制能力。实验结果表明，非相干光处理给出几乎无噪声的消模糊图象。

2. 非相干光全息术

同样道理，采用非相干光记录全息图，可以改善全息象质。然而，问题是如何利用白光源或单色扩展非相干光源获得干涉条纹，使其能

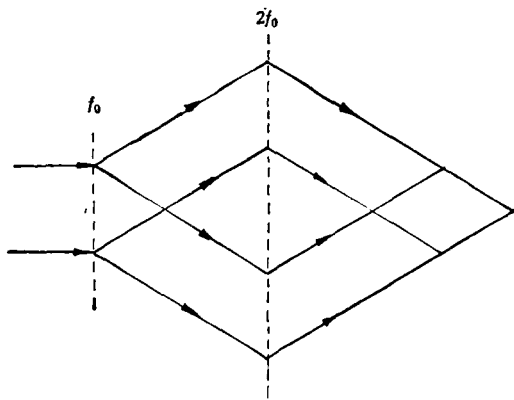


图 4 白光双光栅干涉仪

记录全息图？

如图 4 所示的消色差双光栅干涉仪系统，采用白光源照明时，可以获得高对比度的白光干涉条纹^[6]。这是由于白光在通过第一块光栅后引起的色散，在通过第二块光栅时得到了补偿。这个系统的一个直接用途就是获得低噪声的全息光栅^[7]。把双光栅干涉仪稍作修改，可以用白光记录象平面全息图及傅里叶变换全息图。

用单色扩展非相干光源也可以记录非相干光全息图。我们知道，一个干涉仪如用扩展光源照明，当光源尺寸适当时，可以在两束光相交区域的某个平面上获得干涉条纹。这称为定域条纹。在定域面上放置全息底片，可以记录全息图。我们用这种方法改善了全息显微象的象质^[8]，并且同样可以记录反射物体的彩虹全息图^[9]。实验结果表明，这种方法大大减弱了全息图的相干噪声与散斑噪声，改善了全息象质。因此这是一种简单而有效的方法。

五、白光彩色图象处理

白光包含了丰富的颜色成分，因此白光技术特别适于进行彩色图象的处理。

1. 彩色胶片的保存^[10]

彩色胶片档案的保存长期以来是电影工业一个未解决的问题。主要是由于彩色胶片用的有机染料在长期保存中通常是不稳定的，这就引起胶片颜色逐渐退化。为此，可采用在黑白底片上保存彩色图象的方法来解决这个问题。

首先，要在黑白底片上对彩色图片进行空间彩色编码。其方法如图 5 所示。利用三个原色滤色片（红、绿、蓝），将彩色图片与黑、白相间的光栅一起，依次记录在黑白底片上。而对于不同的颜色，光栅具有不同的方位角。例如第一次曝光用红色滤色片，而光栅的方位角为 0° 。第二次与第三次曝光分别用蓝色与绿色滤色片，而对应的光栅方位角分别为 60° 及 120° 。这就将彩色图片的不同彩色成分分别编码在不同方位的光栅上，而记录在黑白胶片上。

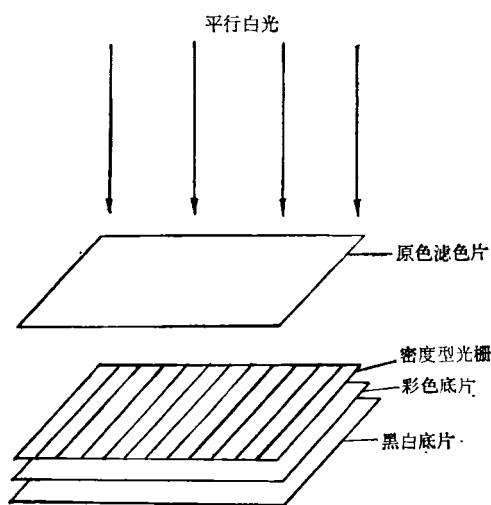


图5 空间彩色编码方法

当需要恢复这个彩色图象时,可用平行白光照明这个载有彩色图象信息黑白底片。把这个黑白底片放在透镜的前焦面上,则在后焦面上可得到三个不同方位光栅的三个衍射图。在相应的三个一级衍射处,分别放置相应的红、绿、蓝三个滤色片。再经一个透镜成像,在象平面上就得到恢复的彩色图象。这是一种简单易行的方法,效果很好。

近来,母国光等制作了三原色光栅,只要将它放在相机的底片前,可以实时地对彩色物体直接编码,用黑白底片记录,从而避免了用彩色底片翻印的中间过程,使这个方法实用化。

2. 白光假彩色密度编码^[11]

由于人眼对黑白图象的识别能力较差,只能分辨 15 至 20 个不同的灰度等级,而对彩色要敏感得多,可分辨 10^3 个等级。因此,希望能用不同的颜色来表示底片的不同灰度等级(底片中不同的银粒子密度相应于不同的灰度),这就是假彩色密度编码。这在医学上,如同 X 射线照片对病灶的判别一样是十分有用的。

将黑白底片与两个相互垂直的光栅相重

迭,放在透镜的前焦面上,用白光照明。然后,在后焦面上,在两个光栅的一级衍射处分别作空间彩色滤波。再经一个透镜成像,就可以实现假彩色密度编码。

3. 彩色模糊图象的消模糊^[12,13]

对线性运动模糊及离焦模糊的彩色图象都可以用白光系统处理。由于白光照明时,相应的信号谱对应于不同波长而散开成一扇形彩虹颜色。这时要制作一个扇形逆滤波器,即相当于在不同颜色的信号谱位置上放上不同尺寸的逆滤波器。这样可以对彩色模糊图象的不同颜色成分分别进行处理。再经过一个透镜成像,就可综合得出消模糊的彩色图象。

非相干光(白光)信息处理的发展只有短短的几年历史,但已显示了它的生命力。除了上面介绍的一些研究成果之外,还可用白光进行黑白及彩色图象的相加、相减、复数滤波、信号检测、图象微分等,从而开拓了一个新的研究方向。

参 考 文 献

- [1] W. T. Rhodes and A. A. Sawchuk, *Incoherent Optical Processing in Optical Information Processing*, Edited by S. H. Lee Springer-Verlag, (1981), 69.
- [2] E. N. Leith and J. Roth, *Appl. Opt.* **16-9**(1977), 2565.
- [3] G. G. Yang and E. N. Leith, *Opt. Commun.*, **36-2**(1981), 101.
- [4] G. G. Yang and E. N. Leith, *Appl. Opt.*, **20-23**(1981), 3995.
- [5] 羊国光等, *光学学报*, **3-1**(1983), 1.
- [6] E. Leith et al., *J. Opt. Soc. Am.*, **64**(1974), 558.
- [7] E. Leith and G. Swanson, *Appl. Opt.*, **20**(1981), 3081.
- [8] 羊国光等, *光学学报*, **4-5**(1984), 419.
- [9] 羊国光等, *光学学报*, 待发表。
- [10] F. T. S. Yu, *Appl. Opt.*, **19**(1980), 2457.
- [11] F. T. S. Yu et al., *Appl. Opt.*, **19**(1980), 2986.
- [12] T. H. Chao et al., *Appl. Opt.*, **22**(1983), 1439.
- [13] X. J. Lu et al., *Opt. Commun*, **46**(1983), 278.