

光学信息处理讲座

第一讲 相干光模糊图象处理

郑 师 海

(中国科学院物理研究所)

一、引 言

人造卫星拍摄的地面图象,天文望远镜拍摄的星体照片以及电子显微镜照片等,在拍摄过程中,由于某些因素(离焦、运动),光学系统象差,噪声背景等等技术上和物理上的原因,造成了图象模糊不清。我们感兴趣的是模糊了的图象能否恢复和怎样恢复。

模糊图象处理方法,主要包括光学方法、电子学方法和数字计算机方法等。目前几种方法组合运用已日渐增多,其中光学图象处理又分相干光图象处理和非相干光图象处理,本文仅讲述相干光模糊图象处理。

二、相干光模糊图象处理

相干光模糊图象处理分线性空间平移不变处理和线性空间平移变处理。所谓线性空间平移不变是指这样一个成像系统,物体上任意一点在象平面的象只是位置的不同,而点象本身是不变的。例如平面物体的离焦象,大气湍流,被照物体做匀速运动和透镜的球差等,得到物体的照片都是线性空间平移不变问题;如果物体上点在象平面的不同位置图象本身是变化的,例如三维物体的离焦象,被照物体做加速运动等,是空间平移变问题。设 $g(x, y)$ 表示成象系统的象, $f(\xi, \eta)$ 表示成象系统的输入物函数,凡能用

$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta (1)$$

这样一卷积分表示的成象系统叫线性空间平移不变系统。式中 $h(x - \xi, y - \eta)$ 表示在输入物体上一理想点在象上的强度分布,称为点扩展函数或脉冲响应函数,对模糊图象来说,就是模糊因素。对于只能表示为

$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) h(x, y, \xi, \eta) d\xi d\eta (2)$$

的积分的系统叫线性空间平移变成象系统,比较(1),(2)式,(2)式的点扩展函数依赖于输入点的绝对位置,也就是物体上任何一点在成象系统中的象随着位置的变化是不同的。对于(1),(2)式代表的模糊图象,必须采用不同的处理方法,前者采用消卷积空间滤波,后者必须针对不同情况进行处理。

值得指出的是,(1),(2)式只是光学成象系统的表示式。为了使光学处理系统的输入振幅或强度透过率比例于(1),(2)式的 $g(x, y)$,还必须要求在记录和化学处理后,工作在银盐片的线性区。

1. 线性空间平移不变模糊图象处理

用光学方法实现图象的傅里叶变换是现代光学信息处理的基础。它主要解决线性空间平移不变问题,即利用一个理想的薄透镜在相干光照明下的前后焦平面互为傅里叶变换性质,首先将物体图象进行一傅里叶变换,然后在图象的频谱平面进行空间滤波,消除某些模糊成分,改善增强图象某些信息或提取某些特殊信息。

(1) 消卷积空间滤波器

(1)式常常简写为

$$g(x, y) = f(\xi, \eta) \otimes h(\xi, \eta).$$

式中⊗表示卷积积分,由卷积定理知道,两个函数卷积的傅里叶变换等于两个函数各自傅里叶变换的乘积。即

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v). \quad (3)$$

式中 $G(u, v)$, $F(u, v)$ 和 $H(u, v)$ 分别为 $g(x, y)$, $f(\xi, \eta)$ 和 $h(\xi, \eta)$ 的傅里叶变换, u, v 为空间频率坐标。

由(3)式看出,如果我们在傅里叶变换的频谱平面,制作一个空间滤波器 $T(u, v)$ 并让

$$T(u, v) = 1/H(u, v), \quad (4)$$

则得到

$$G(u, v) \cdot T(u, v) = F(u, v).$$

再将 $F(u, v)$ 作一次逆傅里叶变换,就得到未被模糊的物体象。

还应该指出的是,在处理器的输出平面,如果是对强度进行记录,同样要注意线性记录。

前面我们说到,事先制作一个消卷积滤波器,实际上是假定我们预先知道了脉冲响应函数的具体形式。不同的模糊因素,具有不同类型的点扩展函数。因而进行空间滤波的关键问题,是必须知道脉冲响应函数的具体形式。

原则上讲,可以得到许多脉冲响应函数的具体形式。从脉冲响应函数的定义,知道它是成象系统对一点物体的响应,可以对一具体照片进行分析,看是否能找出一孤立的点、线或边缘象。通过对孤立点线或边缘的扫描密度测量,可以对点扩展函数进行估计。例如高分辨率电子显微镜,天文望远镜的照片,可以用这种方法得到,有些成象系统的参数是已知的,通过这些参数,可以计算出点扩展函数。有些问题的脉冲响应函数的傅里叶变换(也叫相干传递函数)的具体形式是已了解的,例如一个匀速运动物体的模糊象的相干传递函数是一 sinc 函数 (sinc 函数),大于一定离焦量的相干传递函数是一个爱里函数。我们可以通过将这类模糊照片进行一次傅里叶变换,在频谱平面测量计算出 sinc 函数或爱里函数的第一零点距离和半径。通过

$$\Delta x_0 = 2\lambda f/l_x \text{ 或 } \Delta r_0 = 1.22\lambda f/l,$$

计算出脉冲响应函数,前者是长度为 l_x 的线段,

物理

后者是半径为 l 的圆盘^[1]。

制造消卷积除法滤波器的实际光路如图 1 所示。 L_1, L_2 为正逆傅里叶变换, L_3, L_4 组成物光准直扩束装置, P_1 为针孔滤波器, L_5, L_1 组成参考准直扩束装置, P_2 为针孔滤波器。

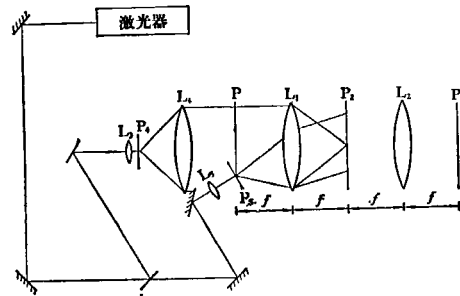


图 1 实验光路

将脉冲响应函数 $h(x, y)$ 放置在 P_1 平面,在 P_2 平面得到光的强度分布为

$$I(u, v) = |A \exp(-j2\pi vu) + H(u, v)|^2 t \\ = E \left\{ 1 + \frac{A|H|}{A^2 + |H|^2} [e^{i[2\pi vu + \phi(u, v)]} + e^{-i[2\pi vu + \phi(u, v)]}] \right\}, \quad (5)$$

式中 A 为参考束的振幅, $v = \sin \alpha_0 / \lambda$, α_0 为参考束的倾角, λ 为使用的激光波长, t 为曝光时间。用全息干板在 P_2 平面记录并经过显影处理后,得到全息片的振幅透过率为

$$T_1(u, v) \approx \frac{1}{E t^2} \left\{ 1 - \frac{\gamma A |H|}{2(A^2 + |H(u, v)|^2)} \cdot [e^{i[2\pi vu + \phi(u, v)]} + e^{-i[2\pi vu + \phi(u, v)]}] \right\} \quad (6)$$

式中 E 为平均曝光量, γ 为乳胶 H-D 曲线的斜率。由全息原理知道,只要我们适当地选择参考束倾角 α_0 , 以上三项可以分开。对于消卷积运算,我们要求的是(5)式的第三项,它的传播方向在 α_0 方向。由于全息图的衍射效率 η 比例于记录干涉条纹调制度 M 的平方,(6)式的第二,第三项系数就是干涉条纹的调制度,所以我们在 α_0 方向得到振幅透过率为

$$T_1(u, v) = \gamma A H^* / [A^2 + |H(u, v)|^2]. \quad (7)$$

*表示复数共轭,考虑两种情况:

$$(I) A^2 \gg |H(u, v)|_{\max}^2 \text{ 且 } \gamma \text{ 为常数, 则}$$

$$T_1(u, v) \approx BH^*(u, v).$$

B 为常数。由(5)式看出, 上式 $T_1(u, v) \propto H^*(u, v)$, 是 $T(u, v)$ 的相位部分, 此滤波器称相位滤波器。为此, 我们在滤波平面制作另一张所谓振幅滤波器, 方法是挡掉参考束, 并用另一张全息干板在 P_2 平面记录 $|H(u, v)|^2$, 显影、定影处理后得第二滤波器的振幅透过率为

$$T_2(u, v) = \frac{C}{[|H(u, v)|^2]^{r/2}},$$

C 为常数, 如果我们显影处理时, 控制乳胶 H-D 曲线的 $r = 2$, 则

$$T_2(u, v) = \frac{1}{|H(u, v)|^2},$$

将 $T_1(u, v)$, $T_2(u, v)$ 放置在一起, 并对准好, 调回到原光轴上, 可得

$$\begin{aligned} T(u, v) &= T_1(u, v) \cdot T_2(u, v) \\ &= B'/[H(u, v)], \end{aligned}$$

即为我们需要的滤波器, B' 为常数, 再将模糊图 $g(x, y)$ 放置在 P_1 平面, 则在 P_3 平面得到 $f(-\xi, -\eta)$ 。

(II) $A^2 \ll |H(u, v)|_{\max}^2$ 则(7)式近似变为

$$T(u, v) = \frac{A}{H(u, v)} \cdot \frac{1}{A^2/|H(u, v)|^2 + 1}, \quad (8)$$

(8)式的第一个因子是我们需要的除法滤波器, 第二个因子在 $H \gg A$ 时是一常数; 在 $H \approx A$ 时, 滤波器有振幅误差; 在 $H \ll A$ 时, 特别是 $H = 0$ 时, $T = 0$, 所以第二因子在适当选择参考束强度时, 为最佳滤波因子^[2]。为了提高全息图的衍射效率和扩展底片的线性范围^[2,3], 第二种方法往往采用低反差显影和漂白技术。当然漂白后得到的是一张纯相位滤波器, 经过适当的数学演算后, 仍可得到(8)式的关系, 但动态范围却大大地扩展了。感兴趣的读者可参阅文献[2]和[3]。第二种方法比第一种方法有效率高、动态范围宽的优点, 虽然两种方法都必须让乳胶工作在线性区, 但第二种方法不要求控制额定的 r 值。

消卷积滤波器最有成效的应用是提高电子

显微镜的分辨本领^[4]。消卷积滤波器还可以用计算机全息图来制备。因为知道了点扩展函数, 在足够密的抽样条件下, 用计算机全息图不

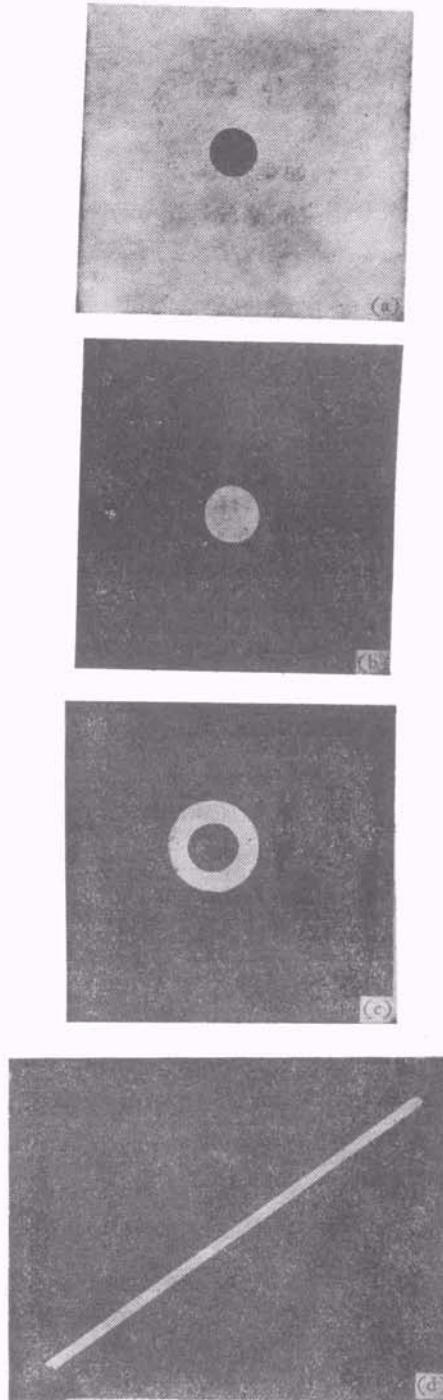


图2 各种带通滤波器

- (a) 高通滤波器; (b) 低通滤波器;
(c) 带通滤波器; (d) 方向滤波器

难制造出高质量的消卷积滤波器,而且可以把最佳滤波和动态范围都考虑在内。由于滤波器未经相干记录,信噪比也将比上述方法高。

(2) 带通滤波器

利用图 1 光路和简单振幅滤波,在某些模糊图象中,也能使象质得到一定程度的改善。图 2 是光学处理中几种常用的滤波器,下面介绍几种关于这类滤波器的应用。

(I) 周期结构电镜图象处理。自然界中某些有机物和无机物具有一种晶体结构,它们的分子或原子的结构是周期性的。在用电子显微镜观察、拍摄这些物质结构照片时,除了系统象差外,还由于制样品工艺以及其它原因,产生各种噪声叠加到照片中,影响了结构的观察和分析。对于相加噪声,它们的频谱是无规则的,而周期结构的信号频谱是有规则的,利用这一

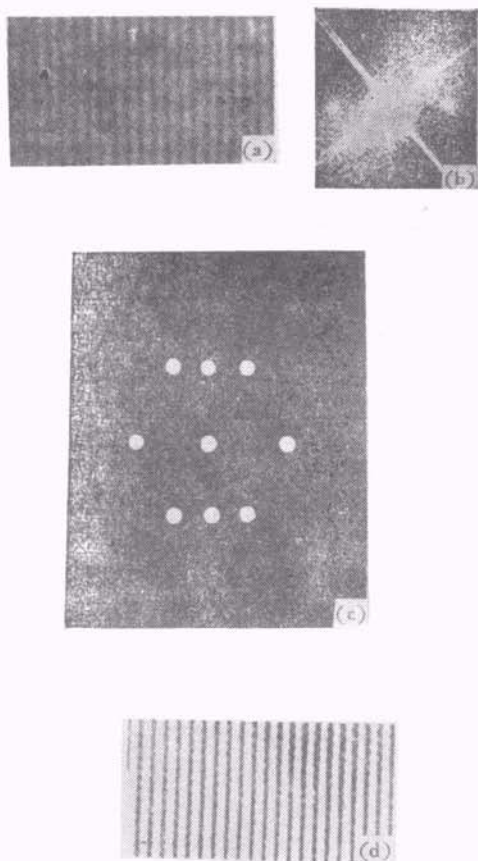


图 3 电镜照片的滤波处理(放大率未归一)
(a) 牛肝过氧化氢酶照片 (b) 它的频谱
(c) 为(a)的滤波器 (d) 为(a)的处理结果

特点,我们可以在频谱平面进行带通滤波,去掉相加噪声。

对于周期结构的电镜照片,它的频谱分布,频谱点的位置同周期结构有关,各频谱点的强度,受到单个周期结构谱的调制。图 3 是一种生物蛋白分子——牛肝过氧化氢酶的电镜照片及其用带通滤波处理的结果。在处理这种照片时,为了突出高频,在频谱的零级加了适当衰减^[5],从图片中可以看出噪声的无规性和频谱的规律性,通过带通滤波,信号全通过去了,而噪声只有那些落在通带范围内的才能被通过,因而受到很大的衰减。

(II) 图象增强处理。在上面电镜图象处理中,我们讲到了在频谱的零级加适当的衰减,实际就是图象增强技术。在电子显微镜和 X 射线成象中,特别是在透射成象中,由于样品为一透明物体,所得图象,往往对比度较差。又由于瞳孔受限的影响,高频成分衰减严重,因而进行适当低频衰减,对于提高照片的对比度和提高高频分量有很好的作用。高频成分的提高,使得图象边沿变锐,因而对整个图象,起到了增强的作用。由于是相干处理,物函数是用振幅透过率描述的,在进行零级衰减时,必须严格注意滤波器直径大小和衰减倍率。衰减的半径必须小于信号最小频率的坐标,否则信号的低频部分被衰减。又由于光检测器只能接受强度信息,不能直接接收光的振幅,为了表示光的振幅变化,需要引进一直流偏置叠加到信号中,以消除原信号的负值,因而直流偏置的大小,严重影响照片的质量:偏置小,照片对比度差;偏置过大,可能因不能抵消信号振幅的负值,而出现对比度反转。因此要控制衰减倍率的大小,使照片有最好的对比度,而又无对比度反转^[5]。

2. 空间平移变图象处理

线性空间平移不变问题是非常理想的情况,实际上存在着许多更为普遍和复杂的由(2)式描述的问题。例如图象的放大率变化、空间变象差、非匀速运动的模糊等等,都是空间平移可变问题。空间变模糊图象处理是个更为困难的问题,目前正在探索之中。

三、结束语与讨论

通过上面对于相干光模糊图象处理的叙述,可以看出,由于相干光处理的二维特性,它对于解决某些问题是非常方便的,但是相干光处理存在着两个主要问题:(1)它是一个模拟计算机,计算精度不高;(2)它的灵活性差,目前只能进行相关,卷积等一类运算。而电子计算机进行的数字计算,可以达到很高的精度。近二十年来,由于空间技术的发展,对图象处理能力的要求越来越高,因而电子计算机模糊图象处理发展非常迅速。目前已经建立了许多完备的图象处理软件和系统工程软件,及有关的专用缓冲器,寄存器,因而有一部分学者认为光学模糊图象处理将为电子计算机所取代。然而

也有许多学者认为,光学图象处理虽然有一定缺点,但它处理问题具有快速、二维、高空间带宽乘积的特点,是非常可取的。如果在克服上述缺点上有所突破,光学图象处理将是有相当前景的。还有一部分学者注意了光学处理和电子计算机处理各自的优缺点,把二者结合起来,开展了所谓混合处理^[6],受到越来越多的人的重视。

参 考 文 献

- [1] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, New York, McGraw-Hill, 1968.
- [2] S. I. Raguarsson, *Phys. Scripta*, 2 (1970), 145—153.
- [3] 郑师海等, *激光*, 7-2(1980), 55.
- [4] G. W. Stroke et al., *Optik*, 41(1974), 319—343.
- [5] 郑师海、麦振洪, *科学通报*, 27-20(1982), 1231.
- [6] B. J. Thompson, *Proc. IEEE* 65(1977), 62—76.



第二届全国电介质物理年会简讯

中国物理学会第二届电介质物理年会于 1983 年 12 月 7 日至 12 日在山东济南举行。出席代表 103 人,他们来自科研机构、高等院校和有关工厂共 50 多个单位。会议收到学术论文 90 篇,按内容可分为三个方面:即相变结构与缺陷;介电、压电与铁电性能;热电、电光及其它功能效应。大会交流了关于电介质物理研究与发展的综合报告,国外电介质学科发展动态的报告以及绝缘电介质学术会议的情况汇报。小组交流分三个会场进行,共宣读了论文 71 篇。会后将编印出版《第二届全国电介质物理年会论文详细摘要》。

自 1980 年在桂林召开的第一届全国电介质物理年会以来,我国电介质物理学科有了新的发展。已经形成了一支初具规模的研究队伍,基础研究开始走向深入,不但在理论方面进行了一些新的探索,而且注意了采用诸如光学技术、声学技术、正电子湮没、XPS 等

多种实验手段进行基础研究。重视为国民经济服务,研究和解决了电介质材料及应用中的一些问题。在电介质物理的某些研究工作中,开始具有我国的特点。另外,值得提出的是学风问题。无论会上和会下的学术讨论都是热烈的和认真的,今后应继续提倡这种学风。

为了促进我国电介质物理学科的发展,中国物理学会已批准成立电介质物理专业委员会。这次年会经过协商,选举了电介质物理专业委员会成员共 14 人。会议还倡议成立跨学科的中国电介质顾问委员会筹备小组。

会议决定,今后每两年召开一次学术年会,第三届电介质物理年会将于 1985 年由中山大学主持召开。

(鍾惟烈)