

全息图记录三维散射目标信息的 基元微观方式

许 蕾 张肇群

(华中理工大学图像技术开发公司, 武汉 430074)

(1995 年 6 月 2 日收到; 1995 年 8 月 29 日收到修改稿)

从一个新的角度——微观结构对全息图进行认识和分析, 用基元分析的观点, 将物体信息的全息表现方式分解到物点, 对实际制作时典型记录情况下物体信息的微观编码方式进行讨论.

PACC: 4240; 4230

1 引 言

用基元全息图观点分析全息图的方法是傅里叶光学中线性叠加原理在全息领域的推广. 全息图的基元分析方法是将被记录的物体分解为众多的相干基元发光点, 各点源所发出的子波分别与参考波干涉, 形成一个基元全息图. 所有点源的基元全息图在记录平面上线性叠加起来, 合成整体意义上的记录物体信息的全息图. 记录时, 由于物体各点源间的相干性, 使它们在记录平面上形成一些低频的干涉周期结构, 全息图再现时, 再现出偏离直接透射光很小角度的晕轮光^[1]. 晕轮光的实际存在, 也说明物光确实是以各基元点来参与作用的. 因此, 用基元的观点来分析全息图是有理论和实际依据的.

通常情况下, 物光波前是一个形状复杂的综合波面, 因此, 实际全息图的结构也是很复杂的, 对整幅全息图干涉结构的分析无疑是困难的, 并且对于不同的物体, 物光波性质(包括波面形状, 振幅和位相分布)各异, 也使得这样的分析失去普遍性. 然而, 在微观领域, 物体上每一点发出的光波与参考光波构成基元全息图所遵循的规律是相同的, 因此基元分析法的结论具有普遍性. 这样的微观方法是从根本上了解全息图结构和原理的一条途径. 通过对全息图干涉结构的物理意义研究, 深刻理解全息图的记录和再现机理, 对实践可能具有指导作用.

2 全息图记录物体信息的基元微观方式

在全息图的实际拍摄光路中, 比较典型的记录情况是物光波为散射光波, 而参考光波为发散球面波. 这种情形下, 其基元分析对象是物体上单一点光源发出的相干球面波与参考点源发出的球面波的干涉.

2.1 空间干涉形态

为简化讨论,假设物光点源与参考光点源的初位相相同,讨论它们在空间产生的干涉形态及其规律性.分别以 s_0 及 s_1 点代表参考点源及物光点源.如图 1 所示,令 $p(x, y, z)$ 为干涉场中任一观察点,则空间干涉形态的数学表示为

$$\frac{x^2}{(\Delta/2)^2} - \frac{y^2 + z^2}{(d/2)^2 - (\Delta/2)^2} = 1. \quad (1)$$

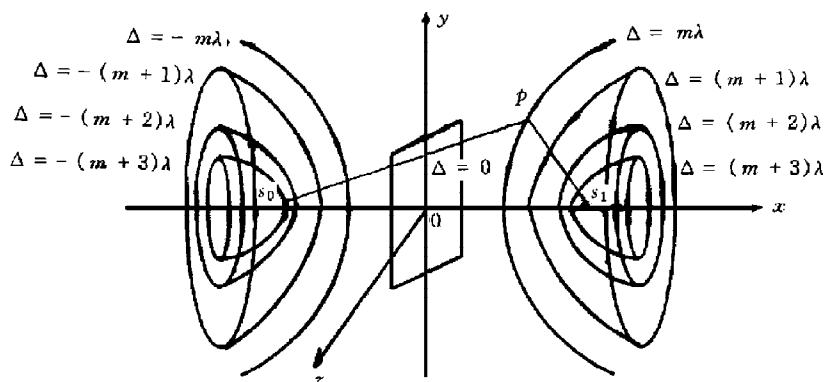


图 1 两点光源的等光程差曲面

可见,这是以 s_0, s_1 为焦点, x 轴为旋转轴的一族旋转双叶双曲面.记录平面上的干涉条纹是平面与该等光程差曲面族的交截线.随记录平面在干涉场中的位置不同,记录平面上的基元干涉结构也有各自的特点和规律.

如图 2 所示,在 s_0, s_1 的基元干涉场中,有以下三种典型的记录位置^[2]:

1. 记录平面置于 $z = D$ 处记录无透镜傅里叶变换全息图.记录平面上干涉条纹为双曲线分布,数学表达式为

$$\frac{(d/2)^2 - (\Delta/2)^2}{(\Delta/2)^2[(d/2)^2 - (\Delta/2)^2 + D^2]} x^2 - \frac{1}{(d/2)^2 - (\Delta/2)^2 + D^2} y^2 = 1. \quad (2)$$

2. 记录介质位于 $x = D$ 平面记录同轴全息图,其上的干涉条纹是以 x 轴与 $x = D$ 平面的交点为圆心的一族同心圆.数学表达式为

$$y^2 + z^2 = [(d/2)^2 - (\Delta/2)^2] \times \left[\frac{D^2}{(\Delta/2)^2} - 1 \right] = R^2. \quad (3)$$

3. 记录平面置于上面的两个位置

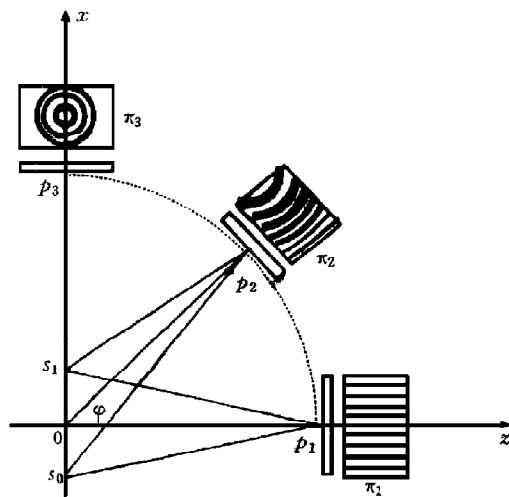


图 2 不同记录平面上的干涉条纹形状

之间记录离轴全息图,此时的干涉条纹可以通过联立方程(1)和记录平面的位置方程来描述,形态可能是双曲线、抛物线等,具体由记录平面的位置而定。

以上讨论的前提是在理想记录情况下,即各发光点的初位相与参考点源相同.但实际情况是,由于物体表面上各点的物理性质不同,将它们视为点光源时,它们所发出的球面波复振幅的初位相是不同的,但每一点与参考点源的初位相差保持恒定,所以能产生稳定的干涉条纹。

保持恒定初位相差的两点在空间产生的干涉形态与初位相差为零的情况有一些差异.假设 s_0, s_1 两点的初位相各为 δ_0, δ_1 , 初位相差 $\Delta\delta = \delta_0 - \delta_1 > 0$, 为一常数, 则初始程差 $\Delta_0 = \frac{\lambda}{2\pi}\Delta\delta$. 在前面对 $\Delta\delta=0$ 分析的基础上, 推导 s_0, s_1 的干涉形态, 得到

$$\frac{x^2}{[(\Delta - \Delta_0)/2]^2} - \frac{y^2 + z^2}{(d/2)^2 - [(\Delta - \Delta_0)/2]^2} = 1. \quad (4)$$

从方程形式上看, s_0, s_1 点所形成的空间干涉形态仍为绕 x 轴旋转的双叶双曲面族形式, 如图 3 所示, 其零程差面是与 x 轴交于 $(-\Delta_0/2, 0, 0)$ 点的双叶双曲面中开口朝向 x 轴负向的那一叶双曲面, 此外, $\pm m$ 级的两曲面是不对称的。

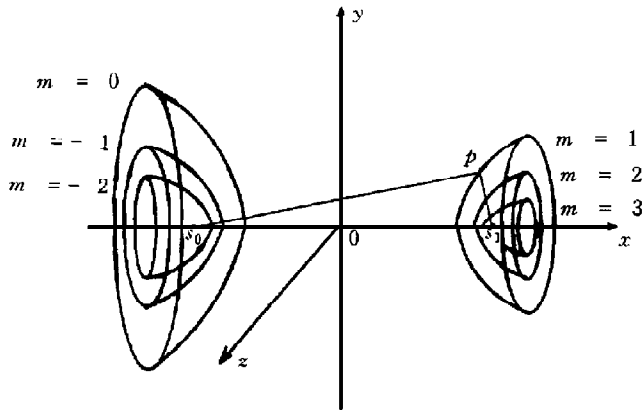


图 3 初位相差恒定的两点光源的等光程差曲面

按定义,干涉条纹的空间频率是单位长度内光程变化的波长数,由此可以讨论各记录情况下干涉条纹的空间频率的变化规律.除空间频率以外,记录平面上干涉条纹的性质还有弯曲度,条纹取向等指标。

图 4 显示了 $z=D$ 平面上扫描电子显微镜(SEM)下干涉条纹的微观结构形态(放大 5 000 倍)。

2.2 各物点信息的基元记录方式

将实际的物体视为众多单一物点的集合体,各物点发出的相干球面波的线性叠加,得到实际的物光波前.物体上各点的不同信息,反映在各点所发出的子波复振幅的振幅和位相上.其中振幅项表示该点的亮暗程度,位相项则代表该点对记录平面某点而言的空间位置信息(距离、方位等).各点与参考波干涉所形成的基元结构也唯一地代表了该点的所有

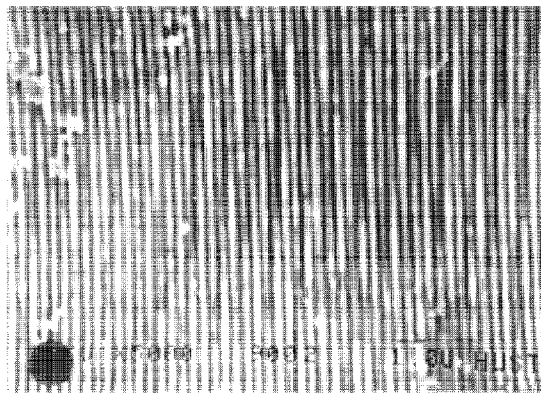
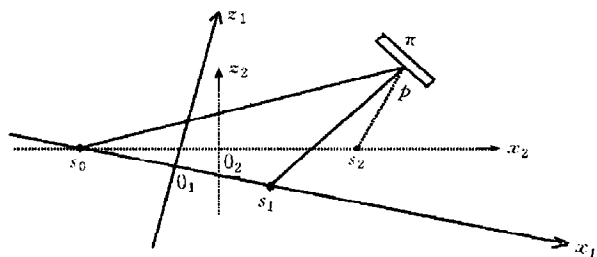
图 4 $z = D$ 平面上干涉条纹的 SEM 照片

图 5 空间不同点的干涉形态分析(入射面内)

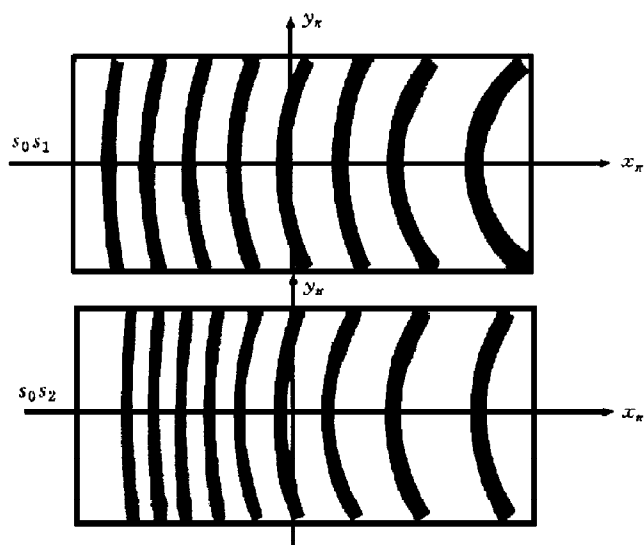


图 6 空间不同点在记录平面上的干涉形态

信息. 以下即讨论不同位置的各物点在全息记录介质上的基元记录方式, 以此来理解二维的全息记录介质记录物体三维信息的机理.

由于物体是立体空间分布的, 所以将物体上的物点分为位于入射面内的点与不在入射面内的点两种情况进行讨论. 图 5 所示为入射面内空间不同点的干涉形态分析.

1) 位于入射面内各点的基元记录方式 s_1, s_2 同是位于入射面内的物点, 它们相对于记录平面上任一点 p 有不同的位置关系, 体现在它们发出的物光波到达 p 点时不同的位相上. 正是这些不同的位相信息体现了物体的立体结构, 而这些信息在二维的全息记录介质上只能以干涉条纹的不同形态来表示.

对 s_1 点, 建立如图 5 所示的直角坐标系 $x_1 o_1 z_1$, s_0, s_1 点分别位于 o_1 的对称两侧. 对空间位置不同的 s_2 点, 用同样的办法建立坐标系 $x_2 o_2 z_2$, 得到 s_0 与 s_2 干涉的等位相面族. 由于坐标系的差异, 它与 s_0, s_1 的等位相面族是不同的. 焦点位置的不同导致了双曲面族具体形态以及其对称轴在入射面内位置的不同. 如图 5 中的实线和虚线所示. 因此, 对固定的记录平面 π , 它与两组双曲面族相交所得的截痕当然也随之不同, 两组干涉条纹的差异主要体现在条纹在 π 上的几何形态上, 包括条纹的坐标位置、空间频率和弯曲程度, 其定性比较示于图 6.

同样的方法可以对入射面内的其它点进行分析. 总之, 由于它们各点与 s_0 所形成的空间双叶双曲面族的坐标、方向以及具体形态的不同, 介质平面与它们相交所得的干涉条纹的形态也不会相同, 具体的由条

纹的位置、空间频率和弯曲程度反映出来.记录介质就是利用各点干涉条纹的这些差异体现了它们不同的位相信息.由于同位于入射面内,这些点在 π 上的干涉条纹也具有一个共性,即因为它们所形成的双叶双曲面族都是以入射面为旋转对称面,所以在 π 上所得到的条纹的取向都一致,都平行于入射面.

2)位于入射面外各点的记录方式 如图 7 所示, s_1 是入射面内的物点, s' 位于入射面外,由前面的分析可知, s_0, s_1 在 π 平面上的干涉条纹的取向是 x_π 轴.对 s' 点,建立坐标系 $x'o'y'$,则在 π 上得到的双曲线由于焦点位置的改变,其空间频率和弯曲程度较之于 s_1 点都不同,但最突出的区别是 s' 的条纹的取向是 x'_π 轴方向,不同于 s_1 ,两者间有一夹角 φ ,这是由 s' 的空间位置决定的,两者的定性比较如图 8 所示. s' 偏离入射面的空间位置,决定了记录面上条纹取向与 x_π 轴的夹角,那些偏离入射面角度相同的点,它们在记录平面上的条纹取向是一致的,但表征条纹的其它特征参数不同,分析与 1) 相同.也就是说,以条纹的取向确定物点相对于入射面所在的空间面,以同一取向的条纹的具体形态确定各点在空间面上的位置,此二维信息即确定了空间一物点的位置.

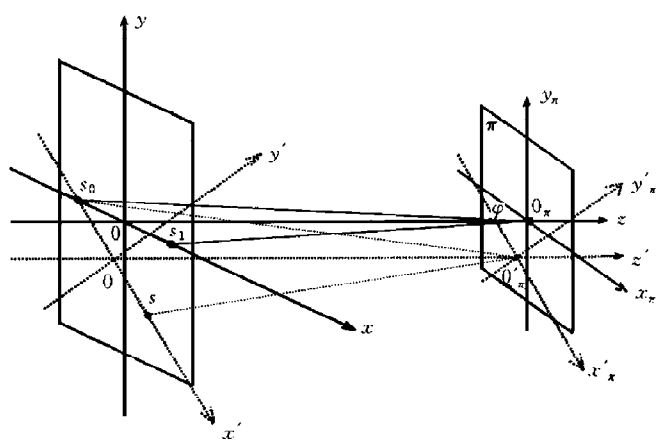


图 7 空间不同点的干涉形态分析(入射面外)

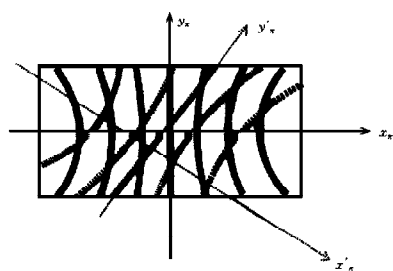


图 8 记录平面上的干涉条纹形态

综上所述可得结论:一个实际物体的立体信息是由各物点所发出的光波的振幅和位相来携带的,其中位相项体现了物点相对于观察点的距离和方位.在全息摄影中,通过参考光波的参与,两束光波相互干涉,将位相的空间调制转变成了用干涉条纹表现出来的强度的调制.记录介质上干涉条纹的调制强度代表了物点的强弱振幅,而条纹的具体形态,包括形状、位置、空间频率、弯曲程度以及取向则充分记录下了物光波的位相.各物点的相对空间位置不同,记录介质上的基元结构也就唯一地反映了这些差异.如此大量的基元结构独立叠加在同一记录介质上,再现时,根据光波的迭加原理,各基元点独立恢复出它所代表的物点的性质,综合而得到原物体的再现.这样,也就理解了物体信息在记录介质中的编码方式,对于全息记录和再现机理的认识深入到微观领域.

3 结 语

本文深入到微观领域阐述了在全息制作过程中典型记录情况下物体信息在记录介质上的记录形式,以物点为单位分析了基元全息图的信息编码方式,所得到的结论从本质上说明了全息图形成的微观机理.

[1] 于美文等,光学全息及信息处理(国防工业出版社,北京,1984).

[2] 董守荣,波动光学(华中理工大学出版社,武汉,1988),第 63—66 页.

THE ELEMENTARY MICROSTRUCTURES OF THREE-DIMENSIONAL SCATTERING OBJECT INFORMATION RECORDED IN HOLOGRAMS

XU LEI ZHANG ZHAO-QUN

(Image Technology and Development Company, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(Received 2 June 1995; revised manuscript received 29 August 1995)

ABSTRACT

Hologram is analysed from a new point of view—the microstructures of elementary hologram. The elementary analysis theory is developed to decompose the information of three-dimensional scattering object recorded in hologram to that of a elementary point of the object. The microcoding patterns of the object information under typical recording conditions are discussed.

PACC: 4240; 4230