全息术和信息编码

王之江

（中国科学院上海光学精密机械研究所）

全息照相和重现的过程可看作是将图象信息进行编码记录和译码的过程．视参考光束形式不同，它将一点编码为一组菲涅尔环或将正弦光栅编码为二组频率不同的光栅，可称之为菲涅尔编码或傅利叶编码．对于这类图象信息编码是否充分利用信息通道的容量（如底片的信息容量），这种信息源和通道是否匹配的问题是值得讨论的．可以表明，一般全息照相方式未充分利用高分辨率底片的信息容量；容量匹配对照相光路有严格要求；在一定限度下立体图象的信息量不比平面图象更多；可用普通照相底片记录物体的全息图，并达到普通照相的图象质量；这就预示全息电影记录是易于实现的；立体电视传输不须加宽通频带．这种编码方式用于X光全息术也将使之成为可能．还表明，所用的光源不须过高的相干度，要求的相干度由图象信息量而定．

一、全息图的信息容量和原物的信息量

全息图的信息容量由所用底片尺寸 c，分辨能力 d，以及底片所能反映的动态范围 R 决定．即等于 $(c/d)^2 \log R$．其中 $c/d = s$ 是底片能分辨的线行数，若不考虑动态范围的差异，则行数 s 完全决定了信息量大小．（考虑到光学传递函数不恒等于1以及噪声的影响时，上式尚须作仔细修正[1]，本文先不讨论这些细致的方面）．当用普通照相（经光学系统成象在底片上）记录原物时，信息量相同（即总行数相同）的物体被放大或缩小后即可为底片所记录．此时为使光学系统不影响信息传送，它的分辨能力应与物和象相匹配，而且要对焦正确．当用全息照相作类似记录时，物体位置和参考光束形式都将使全息图变化，从而得到不同的编码记录．电讯编码是充分利用通道容量的极重要手段，但通常作全息图时不考虑不同的编码对信息传输有何影响，这就使全息图不能充分记录原物的信息．底片虽有很大的信息容量，所记录的信息量却可甚小．以一个简单的例子说明之．

如图1，以平行光束为参考光束并与全息图 H 正交，物体 O 是离 H 距离为 l 的一点，它衍射发出的球面波和参考平面波干涉，形成此点的全息图——牛顿环或菲涅尔环带．底片直经 c，则二波面最大夹角 θ 是 $c/2l$，因此最细的干涉条纹间距 d 是：

$$d = \lambda/\theta.$$

式中 λ 是记录全息图所用的光波波长．若将此全息图用同一光路同一波长重现，则得以 O 点为中心的球面波，由于波面尺寸有限，它对 O 点张角 θ，故 O 点成为直径 δ 的焦斑，显然：

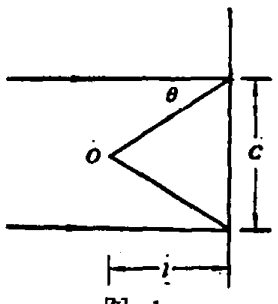

图 1

本文1978年8月1日收到．

$$\delta = \lambda/\theta.$$

即恰和全息图的最细条纹相等.

因此，若用分辨能力为 d、尺寸为 c 的底片(行数 $s = c/d$)，记录 O 点附近的小尺寸(小于 c)物体时，底片信息容量(以行数表示)就会远大于物体信息量. 当物体尺寸等于 c 时，它边缘上一点发生的球面波与参考平面波的最大夹角将是 2θ，形成干涉条纹最小宽度变为 $d/2$. 实用的全息术为分离实象和虚象运用偏置的参考光束就属这种情况，它使干涉条纹的调制频率随之提高，于是要求底片具有更高的信息容量.

行数与底片相同的物体，无论它分辨能力大于或小于 d，图 1 所示的光路都不能将此原物信息有效记录. 概括起来说，全息图不能充分利用底片容量的原因有二，一是偏置参考光束导致不必要的高的载波频率，二是为记录小量信息(一个斑点)而使用过高的载波频率(密条纹). 由此可见，为充分发挥底片的信息容量的作用，全息编码的光路不能任意安排，而应有恰当的布置才行. 一种可行的光路如图 2 所示.

参考光束由尽量靠近原物 GE 的 K 点发出，原图尺寸 a，希望被记录的最细线度 b，底片尺寸 c，分辨能力 d，则当

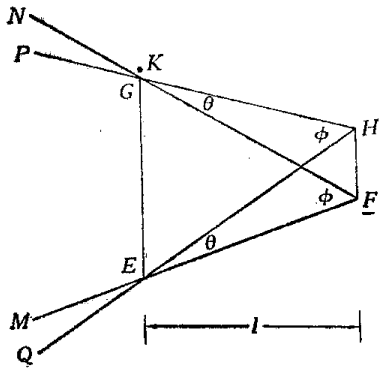

图 2

$$a/b = c/d, \tag{1}$$

则二者行数相等. 若不考虑二者动态范围差异则二者信息量相等. 取二者间距 l 使波面张角和衍射角分辨力相当，即

$$\theta = c/l = \lambda/b. \tag{2}$$

则由 (1) (2) 可得:

$$\phi = a/l = \lambda/d. \tag{3}$$

亦即波面最大夹角 ϕ 所决定的干涉条纹间距恰可为底片分辨. 这就是非冗余的全息编码方式. 在这种情况下，谱面的尺寸恰给出所须的空间分辨能力，同时，谱面的分辨能力则决定能记录的空间视场大小.

上面讨论是对具有确定空间位置的平面图象而言的. 全息图将重现出原空间位置的图象，亦即所记录的是三度空间的信息. 对于在折线 NKH 以下并在 MEH 以上的点发出的波面和参考波面的夹角均小于 ϕ，即干涉条纹均可被底片所分辨记录. 并随距离 l 变大变小而具有较低或较高的空间分辨能力 b. 由此可见，将三度空间看作是多层的二度平面图，满足(2)、(3)式的每个平面图均可被底片所记录(即折线以内的空间). 每个平面图的线行数都和底片相等. 因此立体图象的信息量似乎比底片大得多，它们都被底片记录似是谬误. 解释是: 多层平面图记录可看作是一般全息底片上作多次照相记录，一一叠加之所以可能，要求一次次曝光的曝光总量在底片的动态范围之内，亦即每个物体的动态范围小于底片从而信息量小于底片之故. 对于实际的空间物体而言，平面叠加的动态范围小于或等于底片是总可自然满足的. 在这种意义下，三度空间物体的信息量不比平面图象大. 全息底片不须要为此而加大信息容量.

注意到普通电影或照相所用底片分辨能力不高，尺寸不大，画面信息容量不大，一般而言线行数在 10^3 时图象质量已很满意了. 由上述讨论可见，用同一底片作全息记录时，也就可以得到同一质量的全息图，高分辨的特殊底片是没有必要的. 这就可以克服全息电影要求高亮度激光照明的困难，这困难完全是因高分辨底片的极低灵敏度所引起. 由于立体图象不要求更大的信息容量，传输全息电视不要求更宽的频带. 因此采用非冗余全息编码记录，用地址光闸管[2]作相干译码重现，应可实现主体电视.

一般观察全息重现的图象时，常有不如普通照相清晰的感觉．通常这是由于重现光路和照相不同从而导致象差，另外是眼瞳没有充分接受衍射光束，因此分辨能力相应下降之故．

二、全息照相对光束相干度的要求

从用白光形成全息图的方案[3]可以看出，光路适当时，全息照相对光束相干度的要求不高，对于非冗余全息记录光路（图 2），底片线行数和物体相等，而 $s = c/d$ 也就是 K 点和 E 点形成的干涉条纹总数，也就是全息图上的最大干涉级．（设 GE 平面和 K 点在一等位相面上，从而干涉条纹从 0 级开始）．因此可见，它要求的光束单色度 $\Delta\lambda/\lambda \leqslant 1/s$，要求光束发散角 $\Delta\theta \leqslant 1/s$．即行数愈小要求愈低，这是合理的．

如前述，电影照相要求线行数在 10^3 以下，一般低压气体放电光源就可达到全息记录的要求．

三、重现时波长变化的效应

对于全息记录和重现时用不同的波长导致图象倍率的问题已早有人讨论过[4]．但对图 2 所示的光路，它的倍率和信息量变化的规律更简单清楚．

将物体看作点的集合，则全息图记录的就是各点和参考点相干涉而形成的杨氏干涉条纹，条纹间距 d 由二点间张角 ϕ 决定，即

$$d = \lambda_1/\phi_1,$$

此条纹由波长 λ_2 的光重现时，张角变为 ϕ_2：

$$d = \lambda_2/\phi_2.$$

故

$$\phi_2 = \phi_1 \cdot (\lambda_2/\lambda_1).$$

波长变长时张角 ϕ 也变大，即重现的象变大．与此同时由于 θ 不变，波长变长使分辨能力下降，而二者之比，即总线数则不变，总信息量不变．这也是合理的．按照光栅成象理论[5]，这样的放大重现象一般是有象差的，应予以校正．

四、X 光全息显微术或 γ 射线全息术

前已述及，物体线数和底片线数相同时即可能被底片所记录，并可以改变重现波长而将象放大．因之 X 光全息显微术应是可能的．具体来说，希望分辨 1 Å 而且物体尺寸为 0.01mm 时线数 $s = 10^5$，和直径 100 mm 分辨能力 10^{-3} mm 的底片相同．采用记录用波长为 0.5 Å，则在图 2 中令 $l = 200$ mm 即可．此时 $\theta = 0.5$，即要求较大孔径角的参考光束．这是不易形成的．

引入大孔径角参考光束的一个可能方案是用已知结构（如晶体）与未知结构（如大分子）相关，从而求出未知物体的谱，从而重现原物，如图 3 所示．

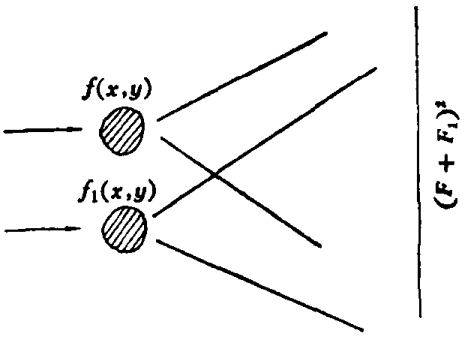

图 3

光束同时照射 $f(x, y)$ 和 $f_1(x, y)$，在谱面上得到的是二者谱之和的平方：

$$(F + F_1) \cdot (F + F_1)^* = F_1^2 + F^2 + FF_1^* + F^*F_1.$$

前二项分别是只有单一物时的简单X衍射谱，可以减去，后二项则为二者之相关项，包含了未知物体谱的强度和位相. 就如一般全息重现那样，当 F 已知时，F_1 是可被重现的.

前已述及对光源相干度的要求，显然当 s 值愈小要求愈低，愈易于实现，用现有X射线源(例如同步辐射)加以单色器和发散角限制似已可用. 穆斯堡尔谱已具足够的单色性，定向发射更将使它在定向有更大强度.

由于角 θ——参考光束张角等于 λ/b，故当分辨要求 b 不变时，λ 愈小则 θ 愈小，故采用更短的波长也许是有利的，此时要求间距 l 加大.

参 考 文 献

[1] Shannon, C. E., *Bell. Syst. Tech. J.*, **27** (1948), 379, 623;
Fellegett, P. B. & Linfoot, E. H., *Phil. Trans. Roy. Soc.*, **A247** (1955), 369.
[2] 如 Tonas, *IEEE Trans.*, **ED-22** (1975), 765.
[3] 如 Goodman, J. W., 傅利叶光学导论，科学出版社，280.
[4] 同上，247.
[5] 王之江，光学设计，国防工业出版社，1964，143.

[上接 707 页]

拉斯加的文化遗物的共同性. 根据日本和美国研究者近些年发现的文化遗物，无疑地可以判断，古猎人曾由北海道经过千岛群岛、堪察加半岛和阿留申群岛，而到达北美的阿拉斯加半岛*. 这是一个在相当长的时期内发生的人类居群的移动过程，这个过程中，包括对不同的生活环境的适应和生产活动类型的改变. 因此，对于这个过程，要采取综合的、全面的方法进行研究，即要看到基本的文化传统的稳定性，又要看到文化发展中出现的各种变化. 从这个角度来说，深入研究华北与北海道之间在旧石器时代的文化联系，对于探索北太平洋地区的古代文化的发展具有关键性的意义.

从旧石器时代文化的研究上可以看出，日本旧石器时代各时期的文化或工业大体上同华北地区有相似的性质和交替顺序，但是在两方面还有很多问题没有解决. 举例来说，"细石器文化"在日本是分布较广的，在文化发展上占有重要的位置，但是对于它的来源问题还需要进一步研究，关于这方面的问题，看来只有把华北的材料和日本的材料综合在一起加以考虑才有可能得到解决.

* 华北与北美之间的另一条文化联系的通路是由华北沿松花江和黑龙江流域北上，经鄂霍次克海沿岸到达楚科奇半岛，再通过白令及亚进入北美的西北地区.