

# 大容量全息摄影存储的某些问题

本文叙述的是全息摄影存储容量为  $10^8$  比特的详细情况。通过数学计算阐明了系统各个参数的影响。推导出存储材料中存储密度为最大空间频率的函数，数字输入板的长宽比和叠像。同时，讨论了系统的最佳存储密度和光学效率。

## I 引 言

许多实验室为将来大型计算机和数字指示所用的数字存储方法进行了研究。在这个领域的某些部分中，利用光学数字存储系统可以得到合理解决。从原理上，可以达到  $10^8$  到  $10^9$  比特的容量和 1 微秒/比特的读取时间。特别有几篇文章谈到了全息摄影存储系统。要实现这样的全息摄影存储系统所必需的主要部件，例如：快速光偏折器，数字输出显示和读写存储材料，这些部件绝大部分来说，才处于早期研制阶段。这个实验室在全息摄影存储研究方面采用的主要部件之一是十四级光电偏折器。这个偏折器，在  $1.6 \times 10^4$  全息图中存储容量可达  $1.6 \times 10^8$  比特。并能把激光偏折成  $2^{14} = 16384$  分辨率位置，随机读取时间少于 0.5 微秒。

在最初研究中，把照像材料用作存储介质。在应用 in-situ 处理时，这种材料仅要几分钟内就能显影。而且用 Titus 管作为一个数字输入显示。

同时，也能采用其它输入装置，例如 Ferpic 显示，但是目前，那些装置不能象 Titus 管那样完全显影。

这篇文章的目的是阐述这个系统并讨论某些基本设计方案。系统的尺寸、光学效率，叠像和存储密度的数学计算是有助于定量表示各个系统参数的影响。各部件和它们对系统性能的影响以及试验结果也将在后面文章中讨论。

第一节中讨论全息图板的光分布。第二

节讨论全息摄影存储效应。接着讨论全息图象再现和全息图孔径的限制。最后阐述再现图象的线性叠像和全息图的最大空间频率，得出计算存储密度的限制。

全息摄影存储是基于这样的概念，即：利用同一参考光束纪录全息图和再现信息获得准确放在同一位置上的各个全息图再现图象。因此，全息图再现的是虚像。

这个概念的第二个不可少的要求是：一些光经过信息输入的数字显示能汇集在每个单一全息图的小区域内。另一方面，它能汇集参考光束全部激光功率，并获得再现图象的最大光辐射。

由于采用了 Fourier 变换型全息图，在平面内位移显得不灵敏。因此，全息图的象差也是微不足道的，事实上，很容易进行其它部件象差的校正。

实现上述概念的存储系统的基本装置如图 1 所示。这个系统主要有五个主要部件：激光器（图 1 没有表示出来），光偏折器，蝇眼透镜（板 1—1'），信息输入的数字显示装置（板 2—2'），全息图板（4—4'）和接收阵列（板 6—6'）。

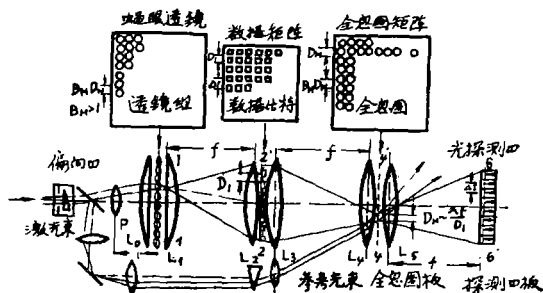


图 1 透射的数字输入全息存储系统

为了下面的计算,采用数字输入的数码板,宽度为 $D_1$ ,包含 $M^2 = 10^4$ 透明或不透明小孔,其中心距离为 $\Delta_1$ ,每个孔表示一位信息,例如透明小孔构成二进制1和不透明小孔构成二进制的零。

全息图排成 $N^2 = 128 \times 128$ 阵列。阵列中全息图中心间的距离用 $\Delta_H = \beta_H D_H$ 表示,其中 $D_H$ 为全息图直径, $\beta_H$ 为相应的全息图距离。最后,接收阵列是由排成与数字阵列中相同孔样形式,由 $M^2$ 个光电接收器组成。

为了说明系统的配置,考虑到全息图的曝光。 $TEM_{00}$ 模激光光束通过光电偏折器。射出的光用光束分束器分开并用透镜,反射镜和棱镜引向到全息图上。这个光束表示为参考光束。可用开关偏折器改变它在全息图板上的位置。

光束的另一部分,称为物光,通过投影透镜P直接投向蝇眼透镜中的一个。由于准直透镜LO,使得进入次透镜的光束接近平行于系统光轴。蝇眼透镜的作用是增加光束发散角度,使得照射整个透镜 $L_2$ 的孔径以及数字掩模的面积。透镜 $L_1$ 保证:在各种情况下,光锥面的中心同数字掩模的中心相一致。

两个透镜 $L_1$ 和 $L_2$ 完成平面1—1'和2—2'之间的Fourier转换。

其次,透镜 $L_2$ 和 $L_3$ 是成像系统即把蝇眼透镜所聚焦的图象投射到用参考光束照射的全息图正中心。这样,这个系统使物光和参考光在全息图平面上相重合。通过开关光偏折器,使蝇眼透镜的寻址和参考光的移动相同步,使得全息图的成像点移到另一全息图的中心。

数码板的信息在Fourier平面2—2'上调制物光。此结果落在全息图平面上。决定了转换函数的分布具有这样的特性:即一个全息图的正确面积是被物光所照明的面积。

$L_3$ 和 $L_4$ 透镜构成另一付里叶转换系统。因此,全息图平面上的物光是通过数码板光束的Fourier转换。

关于再现,只有参考光对准了包含存储信息的子全息图中的一个。如果光偏折器后面的分束器用反射镜来代替或者最好是采用能控制分配比率的分束器,整个激光器的光就能用于再现。

数码板的实象(倒置的)通过透镜 $L_5$ 的付里叶转换在接收平面上再现。二个透镜 $L_4$ 和 $L_5$ 表示数码板和接收器平面之间的成像系统。然而这个成像系统是由子全息图的小孔径来限制光束。

系统的总容量用 $N_2 = 128 \times 128$ 全息图个数和数码板位数来获得。假设数码显示为 $M^2 = 10^4$ 比特,则总容量为 $1.6 \times 10^8$ 比特。此系统的突出特点之一是全部部件,除全息图本身以外,有很小的光损失。对于光偏折器来说,典型的光学效率为80%,这个也认为取决于它的开关位置。这样,这个系统的排列有希望得到好的光学效率。

一种经修改的适实反射型数据输入的排列如图2所示。这个装置已采用Titue管作为反射型工作。原理上,这个系统的工作状态如同上述的一样良好。

## II 数字输入和全息图平面上的光照

如果利用存储材料的曝光特性线性区域就能获得优质和高效率全息图。为了寻求最佳曝光条件,应懂得全息图平面上物光和参考光的光分布。

为了便于分析,我们只研究全息图板中心的全息图,这个全息图假设表示所有其它的全息图。这样,用数学表示法变得很容易。在各个平面上的迪卡尔座标用符号I代表数字输入平面,用H代表全息图板平面和用D代表接收器平面。

数码板用下列的周期结构来表示:

$$B_1(xy_1, xy_1) = \sum_{\nu, \mu} \text{rect} \left( \frac{xy_1 - \Delta_1 \nu}{D_1} \right) \text{rect} \left( \frac{xy_1 - \Delta_1 \mu}{D_1} \right) \quad (1)$$

如果数码板用振幅A的平面波来照射，全息图的光渗用Fourier转换的绝对值F[D(x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>)]给出

$$I_{H1}(x_H, y_H) = \frac{1}{2} \frac{|A|^2}{4\pi^2} F[B(x_1, y_1)] F^*[B(x_1, y_1)] \quad (2)$$

假设所有物点在方形阵列中是相等振幅。光束产生相当不均匀的作用，如图3所示。对于一个比特数据，由于点分布作用通过 sinc[(kD<sub>1</sub>/2f)X<sub>H</sub>] sinc[(kD<sub>1</sub>/2f)Y<sub>H</sub>] 得出，使全息图平面上的光改成：

$$I_{H1}(x_H, y_H) = \frac{k^2}{2\pi^2 f^2} A^2 D_1^4 \text{sinc}^2\left(\frac{kD_1}{2f} x_H\right) \text{sinc}^2\left(\frac{kD_1}{2f} y_H\right) \times \frac{\sin^2(k/2f)M\Delta_1 x_H \cdot \sin^2(K/2f)M\Delta_1 y_H}{\sin^2(k/2f)\Delta_1 x_H \cdot \sin^2(k/2f)\Delta_1 y_H} \quad (3)$$

(K = 2π/λ)

多数的光集中在少量的大尖峰上，相隔距离为 2πf/KΔ<sub>1</sub>。这样的波前存储产生非常低的信号噪音比(SNR)，因此数字存储系统的效率是很低的。

如果在数码板之前加上一块随机相位板，如同参考22所提议那样就能获得几乎是均匀的场分布。在实际应用中，使用两二进制相位级0°和180°的板是比较充足的。然后输入板的光分布成为：

$$B(x_1, y_1) = \sum_{\nu, \mu} \exp(i\varphi_{\nu\mu}) \text{rect}\left(\frac{x_1 - \Delta_1 \nu}{D_1}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 - \Delta_1 \mu}{D_1}\right) \quad (4)$$

式中φ<sub>νμ</sub>是无规则相位项。全息图的光得出

$$I_{H1}(x_H, y_H) = \frac{k^2 |A|^2}{8\pi^2 f^2} D_1^4 \text{sinc}^2\left(\frac{kD_1}{2f} x_H\right) \text{sinc}^2\left(\frac{kD_1}{2f} y_H\right) \times \left| \sum_{\nu, \mu} \exp[i\varphi_{\nu\mu} - i\frac{k}{f} \Delta_1 (x_H, y_H + y_H, \mu)] \right|^2 \quad (5)$$

由于无规则的相位分布，平均的光照变成：

$$\langle I_{H1}(x_H, y_H) \rangle = \frac{K^2 |A|^2}{8\pi^2 f^2} D_1^4 M^2 \text{sinc}^2\left(\frac{kD_1}{2f} x_H\right) \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{kD_1}{2f} y_H\right) \quad (6)$$

这个公式是坐标 x<sub>H</sub> 和 y<sub>H</sub> 很慢变化的函数，因此，平均的光照几乎是均匀地分布在全息图区域内 (图4)。

据我们所知，用无规则相信分布的 M<sup>2</sup> 物点 Fourier 转换的强度的密度概率大约是

$$P\left[\frac{I_H(x_H, y_H)}{\langle I_H(x_H, y_H) \rangle}\right] = \exp\left[-\frac{I_H(x_H, y_H)}{\langle I_H(x_H, y_H) \rangle}\right] \quad (7)$$

这样，光强度超过数值 2⟨I<sub>H</sub>(x<sub>H</sub>, y<sub>H</sub>)⟩ 的只 13.5% [对 4⟨I<sub>H</sub>(x<sub>H</sub>, y<sub>H</sub>)⟩ 只有 2%]。

然而，关于存储材料的曝光特性，知道参考光的光分布比知道物光的光分布要重要得多。

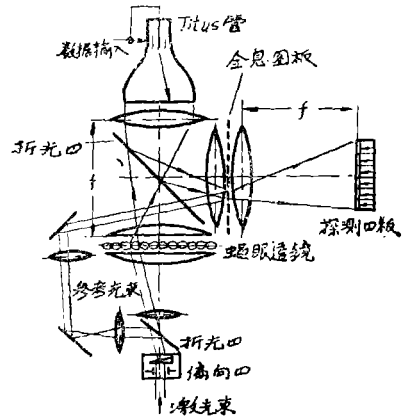


图2 反射的数字输入全息存储系统

用零型高斯激光光束能代表参考光束，它通过全息图板的入射角为r<sub>0</sub>。

$$R(x_H, y_H) = R \exp\left[-\frac{4}{D_R^2} (x_H^2 + y_H^2) + ikx_H \sin r_0\right] \quad (8)$$

D<sub>R</sub>表示 1/e<sup>2</sup> 强度的光束直径。为了便于分析，引出下面的假设和定义。(1) 曝光比L，

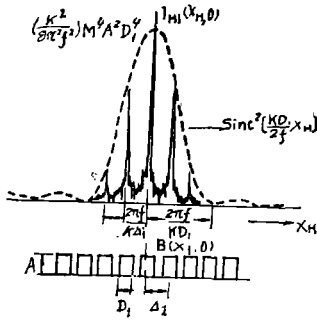


图3 全息图板对内相位数字输入情况的物波光照

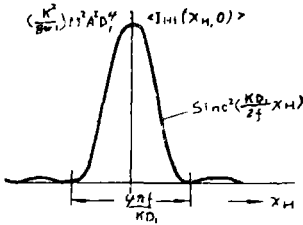


图4 对数字掩模板随机相位分布的全息图平面均光物光光照

定义为物光强与参考光强之比。

$$P_{\text{参考}} = \frac{1}{2} |R|^2 (\pi/8) D_R^2 \quad (9)$$

$$P_{\text{数据}} = \frac{1}{2} M^2 |A|^2 D_1^2 \quad (10)$$

得出:

$$L = \frac{P_{\text{数据}}}{P_{\text{参考}}} = \frac{8M^2 |A|^2 D_1^2}{\pi |R|^2 D_R^2} \quad (11)$$

(2) 全息图平面上物光孔径大约是函数  $\exp\{-(1/\pi)(kD_1/2f)^2(x_H^2 + y_H^2)\}$  化标准为(3)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \text{sinc}^2\left(\frac{kD_1}{2f}x_H\right) dx_H = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{k^2 D_1^2}{4\pi f^2}x_H^2\right) dx_H$$

选择数码板孔直径为曲线  $\exp[-(k^2 D_1^2/4\pi f^2)x_H^2]$  的直径  $D_{H1}$ 。等于参考光的直径  $D_r$ 。

$$D_{H1} = D_R^2 = (32\pi f^2)/(k^2 D_1^2) \quad (12)$$

利用这些假设, 全息图板的光成为

$$I_H(x_H, y_H) = \frac{L \langle I_H(0,0) \rangle}{M^2(1+L)} \exp\left[-\frac{8}{D_R^2}(x_H^2 + y_H^2)\right] \times \left| \sum_{\nu, \mu} \exp\left[i\varphi_{\nu, \mu} - i\frac{f}{k}\Delta_1(x_H\nu + y_H\mu) - i\frac{M}{\sqrt{L}}\exp(-ikx_H \sin\gamma_0)\right]^2 \right. \quad (13)$$

其中全息图中心的平均光照可得出

$$\langle I_H(0,0) \rangle = \frac{1}{2} |R|^2 (1+L) \quad (14)$$

如同参考24已得出的那样〔等式13〕全息图板的光密度概率为:

$$P[I_H(x_H, y_H)] = \frac{1 + L \exp[(8/D_R^2)(x_H^2 + y_H^2)]}{\langle I_H(0,0) \rangle} \times \exp\left[-\frac{1}{L} - \frac{I_H(x_H, y_H)}{\langle I_H(0,0) \rangle} \frac{1+L}{L}\right] \exp\left[-\frac{8}{D_R^2}(x_H^2 + y_H^2)\right] \times I_0 \left\{ \frac{2(1+L)^{1/2}}{L} \exp\left[\frac{4}{D_R^2}(x_H^2 + y_H^2)\right] \left[ \frac{I_H(x_H, y_H)}{\langle I_H(0,0) \rangle} \right]^{1/2} \right\} \quad (15)$$

式中  $I_0$  表示为零位指令改进的贝塞尔 (Bessel) 函数。图5表示不同曝光比的  $P[I_H(x_H, y_H)]$  函数图形。与物光的分布相似, 多数光在  $0 \leq I_H(x_H, y_H) \leq 2 \langle I_H(0,0) \rangle$  范围内集中。在低于  $2 \langle I_H(0,0) \rangle$  范围内发现强度概率随全息图中心的距离而增加, 即意味着, 大尖峰信号在全息图中心占优势。同时, 最大强度概率随曝光比的增加而增加。

一般来说, 存储物质的曝光特性只在有限区域内几乎是线性的, 在一定曝光时间内曝光强度超过某一定值  $I_0$  最大值材料即饱和光束超过个阈值即产生非线性畸变。为了求

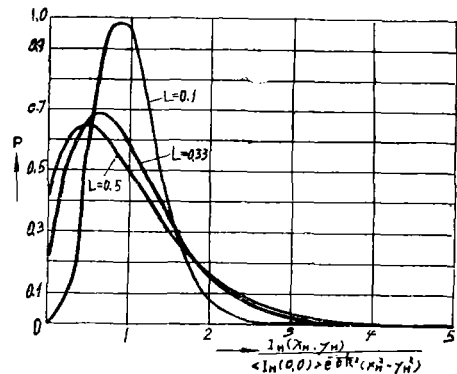


图5 各种曝光比率的标准全息图光照密度概率。

得这个阈值，超过饱和数值  $I_{H\text{最大值}}$  的光束强度是可以计算出来。

$$\begin{aligned}
 P(I_H > I_{H\text{最大值}}) &= \frac{1}{P_{\text{总数}}} \int_{-\infty}^{+\infty} dx_H dy_H \int_{I_{H\text{最大值}}}^{\infty} I_H(x_H, y_H) \\
 &\times p[I_H(x_H, y_H)] dI_H(x_H, y_H) = \frac{1}{1+L} \exp\left(-\frac{1}{L}\right) \int_0^{\infty} \exp(-t) dt \\
 &\times \int_{\frac{1+L}{L} \exp(t)}^{\infty} \frac{I_{H\text{最大值}}}{\langle I_H(0,0) \rangle} z \exp(-z) I_0\left(\frac{2}{\sqrt{L}} \sqrt{z}\right) dz. \quad (16)
 \end{aligned}$$

结果，从这个式中的计算，如图 6 表示，可以看出，对于曝光比  $L=0.1$  为例只有很少的光强 ( $\sim 1\%$ ) 超过了  $I_{H\text{max}} = 2 \langle I_H(0,0) \rangle$  值。

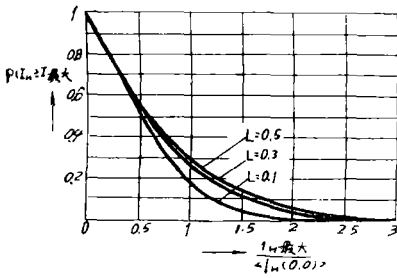


图 6 对各种曝光比  $L$ ，强度超过饱和数值  $I_{H\text{max}}$  的相应光强

曝光比  $L$  越大，超过  $I_{H\text{max}}$  强度的全息图光照能量也越大。这样，假定记录过程的误差相同，曝光比越少，则平均光强  $I_H(0,0)$  增加。

### Ⅲ 最佳效率

在这节中，计算了振幅全息图全息存储

$$\begin{aligned}
 it_H &\cdot \frac{(2L)^{1/2}}{M(1+L)^{3/2}} \frac{\langle I_H(0,0) \rangle^{3/2}}{I_{H\text{最大值}}} \exp\left[-\frac{12}{D_R^2} (x_H^2 + y_H^2)\right] \\
 &\times \sum_{\nu, \mu} \exp\left[i\varphi\nu, \mu - i\frac{k}{f} \Delta_I (x_H\nu + y_H\mu)\right] \quad (18)
 \end{aligned}$$

因此，得出虚象的光强：

$$\frac{L t_{H0}^2}{(1+L)^3} \frac{\pi D_R^2}{24} \frac{\langle I_H(0,0) \rangle^3}{I_{H2\text{最大值}}}$$

衍射效率为

$$\eta_{HD} = t_{H0}^2 \frac{L}{(1+L)^2} \frac{1}{3} \frac{\langle I_H(0,0) \rangle^2}{I_{H\text{最大值}}^2} \quad (19)$$

同样，总效率化为总输入能量  $P_{\text{总数}}$  的函数：

利用方程式(15)的密度概率，曝光时相对于全部光能的光强：

的效率。考虑有二个定义，第一个是如可知的衍射效率  $\eta_{HD}$ 。它定义为再现像光强对参考光强的比。第二个是将要讨论的总效率  $\eta_{HT}$ 。这个效率由再现图象的光功率确定，也就是同曝光的总光强有关，也考虑数码板的传输效应  $\eta_D$ 。

依据参考光束光强，总光强可写成：

$P_{\text{总数}} = p_{\text{参考}} [1 + (L/\eta_D)]$ ，式中  $P_{\text{参考}} \times (L/\eta_D)$  是数码板照射所需的光强（见图 1）。总效率是最利于评价全息摄影读写存储量的。因为它表示，如果要求固定读出功率时，对于一定容量的存储来说需要有多少的光强。

为了导出效率的表达式，存储材料可以当成有线性的曝光特性。

$$\begin{aligned}
 t_H(x_H, y_H) &= t_H \\
 &- (t_{H0}/I_{H\text{最大值}}) \cdot I_H(x_H, y_H) \quad (17)
 \end{aligned}$$

式中  $t_H(x_H, y_H)$  是存储材料的透过系数。

如果，在再现和记录中利用同一参考光束虚象的再现波可写成：

$$\begin{aligned}
 \eta_{HT} &= t_{H0}^2 P_{\text{总数}}^2 \left(\frac{8}{\pi D_R^2}\right)^2 \frac{1}{3} \frac{1}{I_{H\text{最大值}}^2} \\
 &\frac{L}{[1 + (L/\eta_D)]^3} \quad (20)
 \end{aligned}$$

达到输出功率最大值的曝光比：

$$L = 0.5 \eta_D \quad (21)$$

这就是说，依线性理论产生最大总效率能求出最佳曝光比：



$$P_D(s\beta_D)/P_{D\text{最大值}} = (4/\pi)\text{erf}^2[\sqrt{2s\beta_D}] \quad (27)$$

这个函数表示于图 8 对于  $s\beta_D = 1$ , 几乎 90% 的光被光电接收器所接收。为了获得这个效果,  $\beta_D$  必须比 1 ( $s < 11$ ) 大, 也就是说, 从公式(25)得出数码板孔间距  $\Delta_1$  必须至少大于  $D_1(6/\pi)^{\frac{1}{2}}$  倍。因此, 入射在数码板上的光强小部分  $[1 - (D_1^2/\Delta_1^2)] = [1 - (\pi/6\beta_D^2)]$  被损失了, 在实际系统中, 这个损失  $\pi^2 D_1^2/4\Delta_1^2$  将至少是 50%。当然在研究读写系统时, 这是很重要的。在这种情况下, 用总输入功率  $P_{\text{总数}}$  (等式 20) 为函数, 接收信号变成

$$\frac{t_{H0}^2}{M^2} P_{\text{总数}}^2 \left( \frac{8}{\pi D_R^2} \right)^2 \frac{2}{3I_{H\text{max}}^2} \frac{L}{[1 + (L/\eta)_D]^3} \frac{4}{\pi} \text{erf}^2[\sqrt{2s\beta_D}] \quad (28)$$

数码板的效率,  $\eta_D$ , 可以用  $\eta_{D0}$  来代替,  $\eta_{D0}$  是数码板小孔的通路, 并乘上小孔的相应面积  $\pi/6\beta_{D0}^2$  即,

$$\eta_D = \eta_{D0} \times (\pi/6\beta_D^2) \quad (29)$$

采用最佳曝光比  $L = \frac{1}{2}\eta_D$ , 等式(28)的接收信号正比于

$$[\eta_{D0} \text{erf}^2(\sqrt{2s\beta_D})]/\beta_D$$

这个函数随  $\beta_D$  的增加而相应减少, 也就是说,  $\beta_D$  应保持尽可能的小。但一个很小的  $\beta_D$  就意味着一个很大的叠像, 如后节所示。

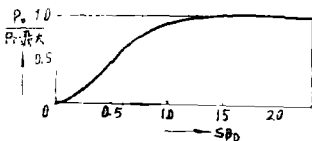


图 8 相应接收信号为接收器相应尺寸的函数。

## V 数码板的最大位数

本节着重讨论数码板上能分布多少小孔的问题。当确定全息图最大空间频率和存储

材料的截止频率时就能得出它的答案。

为了计算最大空间频率, 必须考虑在再现的信息旁全息图产生了增宽的零级。

为了从再现图象中分开增宽的零级, 参考光束的入射角  $\gamma_0$  必须满足如下条件:

$$\gamma_0 \geq 3(B_x/2f) \quad (30)$$

式中  $B_x$  是数码板沿着 X 轴的宽度。(仅  $\gamma_0$  在较小值)

接收器板的光分布如图 9 所示。等式(30)的条件能很容易理解, 因为增宽的零级分别比数码板宽度和再现图象宽度大 2 倍。

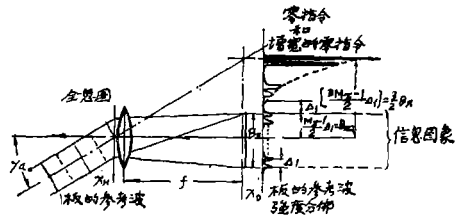


图 9 再现图象和加宽零级的距离 ( $M_x^2$  二数码板体积内孔数)

因此数码板中心的物点以下述空间频率存储在全息图内,

$$F_0 = \gamma_0/\lambda = 3B_x/2\lambda f \quad (31)$$

在数码板边上的点, 离参考光轴最远产生最大的空间频率。包括了数字输入板和全息图板的设计图如图 10 所示。光束和参考光束之间的最大角用阴影斜线的三角形表示。

$$\gamma_{\text{最大值}} = (1/2f)[(4B_x)^2 + B_y^2]^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

$B_y$  用长宽比  $\alpha$  和  $B_x$  来表示,  $B_y = \alpha \times B_x$ 。这样, 如果增宽的零级接近数码板的图象, 最大角为

$$\gamma_{\text{最大值}} = \frac{1}{3}\gamma_0(16 + \alpha^2)^{\frac{1}{2}} \quad (33)$$

同时, 最大频率是

$$F_{\text{最大值}} = \frac{1}{3}F_0(16 + \alpha^2)^{\frac{1}{2}} \quad (34)$$

另一方面, 数码板孔数是  $M^2 = (B_x \times B_y)/\Delta_1^2 = \alpha \times (B_x^2/\Delta_1^2)$ 。用方程式(31)和(34), 数值  $M^2$  可用最大空间频率的函数和长宽比

束表示:

$$M^2 = (4\alpha/16 + \alpha^2)[(\lambda f/\Delta_1)F_{\max}]^2 \quad (35)$$

如果  $\alpha = 4$  可存储的最大倍数

$$M_{\max}^2 = \frac{1}{2}(\lambda f/\Delta_1)F_{\max}]^2 \quad (36)$$

函数  $M^2(\alpha)/M_{\max}^2$  如图10。这样, 如果长宽比是  $(B_y/B_x) = \alpha = 4$ , 才能实现截止频率  $F$  最大值的存储介质的贮存容量。

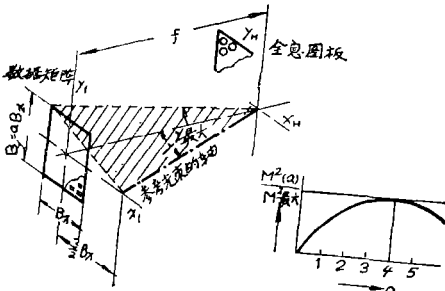


图10 全息板入射光之间的最大角

如果长宽比是 1:1 只能存储最大倍数的 47%。这对采用相当低的截止频率存储介质时, 是很重要的。

但是最佳的长宽比对于光学孔径角带来不利。因为如果截止频率相当高, 为了保持孔径小和避免太大的象差效应, 最好不要使存储容量过高。

## VI 线性叠像

在 IV 部分中推导出光电接收器的接收信号。但是除了这种理想的接收信号而外, 每个光电接收器又接收其它信息通道的光。原则上, 有二个这样的来源, 即线性叠像和非线性效应以及有缺陷存储材料引起的噪音。

在这篇文章中, 讨论了线性叠像。它是由全息平面上全息图的重叠和接收器平面上像点的扩展所引起的。因此, 全息图的叠像  $c_H$  与点扩展的叠像  $c_p$  之间有所差别。按高斯强度分布的再现用的参考光束也照射了邻近的全息图。这样邻近全息图的信息也被再现为低光强的水平。全息图的叠像将由邻近

全息图的再现光强与理想像重构的光强  $P_D$  (由方程式(26)给出) 的比值来决定。

当邻近的全息图相对参考光束所寻址的全息图位移了  $(\delta x_H, \delta y_H)$ , 则邻近全息图的再现光波, 同方程式 (18) 一样, 用下列式得出:

$$\begin{aligned} & \sum_{\nu, \mu} \exp\{-i\varphi_{\nu, \mu} - i\frac{k}{f}\Delta_1 \\ & [(x_H + \delta x_H)\nu + (y_H + \delta y_H)\mu]\} \\ & \times \exp[-\frac{4}{D_R^2}(x_H + \delta x_H)^2 \\ & (y_H + \delta y_H)^2] \times \text{sinc} \\ & [\frac{kD_1}{2f}(x_H + \delta x_H)] \text{sinc} \\ & [\frac{kD_1}{2f}(y_H + \delta y_H)] \times \exp \\ & [-\frac{4}{D_R^2}(x_H^2 + y_H^2)] \end{aligned}$$

最后一项,  $\exp[-(4/D_R^2)(x_H^2 + y_H^2)]$ , 表示了没有位移的用于再现的参考光束。假定扩展的光点 ( $C_p = 0$ ) 没有重叠时, 上述光波产生的接收信号  $p_D(\delta x_H, \delta y_H)$ :

$$\begin{aligned} p_D(\delta x_H, \delta y_H) &= p_D(0, 0) \exp \\ & \left\{ -\frac{16}{9D_H^2} [(\delta x_H)^2 + (\delta y_H)^2] \right\} \end{aligned}$$

代入两个全息图中心之间的相对距离  $(\delta x_H = \beta_H \times D_H, \delta y_H = \beta_H \times D_H)$  则全息图在距离  $(\delta x_H, \delta y_H) = (\beta_H D_H, 0)$  产生的叠像为:

$$c_{H1,0} = \exp[-(16/9)\beta_H^2] \quad (37)$$

在距离  $(\beta_H D_H, \beta_H D_H)$  的全息图,

$$c_{H1,1} = \exp[-(32/9)\beta_H^2] \quad (38)$$

$c_{H1,0}$  和  $c_{H1,1}$  是全息图相对距离的函数。如图11所示。在  $\beta_H = 1$  的点上, 全息图在距离  $(\beta_H D_H, 0)$  的产生 17% 的叠像。

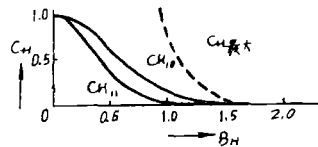


图11 全息图重叠的叠像

由于每一个全息图周围有 8 个全息图，所以在最坏的情况下，可以产生  $4c_{H1,0} + 4c_{H1,1}$  最大的叠像。（因为集合了光电接收器的面积，内调制项几乎消失）这种最坏情况也如图 11 所示。因而全息图的距离必须比  $\beta_H D_H = 1.5 \times D_H$  大才能避免叠像超过 7% 的最坏情况。

如果认为不存在全息图叠像的情况下在接收器板平面上扩展点的叠像图可用同样方法导出。

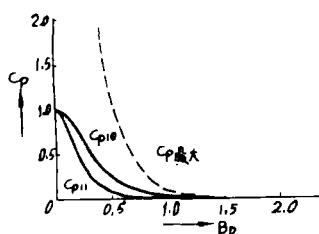


图 12 接收器平面像点重叠的叠像

邻近像点在光电接收器  $(\delta x_D, \delta y_D)$  距离之内产生的接收讯号：

$$P_D(\delta x_D, \delta y_D) \approx \int_{-(s/2)\beta_D D_D}^{(s/2)\beta_D D_D} dx_D dy_D \times \exp\left\{-\frac{8}{D_D^2} [(x_D - \delta x_D)^2 + (y_D - \delta y_D)^2]\right\}$$

因此对于距离为  $(\delta x_D, \delta y_D) = (\beta_D D_D, 0)$  的点，叠像用杂光光强与理想讯号光强之比而得出。

$$c_{p1,0} = \frac{\text{erf}[\sqrt{2}\beta_D(s+2)] - \text{erf}[\sqrt{2}\beta_D(s-2)]}{2\text{erf}(\sqrt{2}s\beta_D)} \quad (39)$$

对距离为  $(\delta x_D, \delta y_D) = (\beta_D D_{D1}, \beta_D D_D)$  的点，

$$c_{p11} = \frac{\{\text{erf}[\sqrt{2}\beta_D(s+2)] - \text{erf}[\sqrt{2}\beta_D(s-2)]\}^2}{4\text{erf}^2(\sqrt{2}\beta_D s)} \quad (40)$$

当  $s = 1$  时， $c_{p1,0}$  和  $c_{p1,1}$  的函数如图 12 所示，假设在最坏情况，近似于全息图的叠像情况，所有周围 8 个像点都有叠像，这个叠像的平均值为  $4c_{p1,0} + 4c_{p1,1}$ ，因此如果  $\beta_D$  为 1 时最坏的叠像少于 10%。

如果 虑光电接收器是较小面积时，假定在  $0.5 < s < 1$  的范围内，图 11 的曲线大约不能改变。

## VII 存 储 密 度

存储系统最重要的参数之一是全息图板的存储密度。平均的存储密度由允许的全息图板尺寸对整个系统的给定容量进行计算得出：

$$\langle s_H \rangle = M^2 / (\beta_H D_H)^2 \quad (41)$$

由全息图区域  $(\pi/4)D_H^2$  内的存储介质的理想局部存贮容量得出局部存贮密度：

$$s_H = 4M^2 / \pi D_H^2 \quad (42)$$

平均存储密度与局部存储密度的关系：

$$s_H = (4/\pi)\beta_H^2 \langle s_H \rangle, \quad (43)$$

从等式(12)，(23)，(25)，(35)和等式(41)，平均存储密度可用最大空间频率的函数  $F_{\max}$ ，数码板长宽比  $\alpha$ ，相应全息图距离  $\beta_H$  和相应的点距离  $\beta_D = \Delta_1/D_1$  来表示。

$$\langle s_H \rangle = \frac{\pi^2 F_{\max}^2 \alpha}{4(16 + \alpha^2)} \times \frac{1}{\beta_H^2 \beta_D^2} \quad (44)$$

这个等式可以求出平均存储密度的上限，因为右侧项的变化已在先前章节中表示出受到限制。参数  $\beta_H$  和  $\beta_D$  决定的叠像如果叠像处于给定限度内，这样就不能任意小。存储材料最大空间频率不能超过截止频率，因此也受到限制。长宽比  $\alpha$  最终应选在 1 和 4 之间。

例如，取  $\alpha$  的最佳值和假定一个点和全息图的叠像不大于 10% ( $\beta_H = 1.5$  和  $\beta_D = 1$ )，存储密度为

$$\begin{aligned} \langle s_H \rangle &= \frac{\pi^2}{32} F_{\max}^2 \frac{1}{\beta_H^2 \beta_D^2} \\ &= 0.137 F_{\max}^2 \end{aligned} \quad (45)$$

对分辨率为 1000 条线/毫米，也只能达到  $1.37 \times 10^7$  比特/厘米<sup>2</sup> 的最大密度。譬如一个局部点的存储，在理论极限内（每周期长度为 2 比度）每个单位面积能存储  $4/F_{\max}^2$ ，在

全息摄影数字存储中只能达到点存储密度的3.5%。

系统的总容量以下式表示

$$c = (A_H \pi^2 F_{\max}^2 \alpha) / [4(16 + \alpha^2)] \times 1 / (\beta_D^2 \beta_H^2) \quad (46)$$

式中,  $A_H$ 是存储板的面积。对于20厘米直径的透镜, 这个面积为314厘米<sup>2</sup>。假定现在最大存贮密度为 $0.137F_{\max}^2$ , 则能达到 $431F_{\max}^2$ 的总容量。1000条线/毫米的分辨率因此产生 $4.3 \times 10^9$ 值的总容量。实际上要想超过这个理论数值是非常困难的。

## VIII 全息图存贮设计 参数和结论

在前面文章中导出的公式可用于计算 $10^8$ 比特全息存贮的某些数值。

可以做到 $0.7 \times 10^6$ 比特/厘米<sup>2</sup>平均存储密度。这个存贮面积为不太大的12厘米<sup>2</sup> × 12厘米<sup>2</sup>。单一全息图的局部存储密度可以确定出允许的平均存贮密度和相应的全息图距离 $\beta_H$ 。因此, 用最坏情况的叠像得出相应的全息图距离 $\beta_H$ 。为了保持很小的全息图叠像, 至少应选择相应全息图距离 $\beta_H = 1.5$ 。即使这样也产生7%的最坏叠像。然而, 这个数值将产生 $2 \times 10^6$ 比特/厘米<sup>2</sup>这么大的局部存储密度。再现图象点的直径与点间距离的比值决定了点扩展的叠像。当相应点距离 $\beta_D$ 等于或大于1也可获得低于10%的最坏叠像。如果 $M^2 = 10^4$ 信息点是存储在单一全息图中, 在这种情况下, 全息图直径就可确定。全息图直径为 $D_H = 0.8$ 毫米。相应地, 参考光束直径是 $D_R = \sqrt{3} \times D_H = 1.4$ 毫米。

至此, 存储板和全息图的尺寸由平均存储密度和叠像来测定。并且, 这些参数可用于计算全息图的最大空间频率和参考光束入射角。除此之外, 仅须选择数码板和光波长的长宽比。假设长宽比 $\alpha = 1$ , 全息图的最大空间频率为328/毫米。如果采用波长 $\lambda = 0.63$ 微米, 因此参考光束的入射角是 $8.7^\circ$ 。

现在, 如果选择焦距 $f$ , 就能计算数码板的尺寸。假设 $f = 30$ 厘米, 数码板的孔宽 $D_1 = 220$ 微米, 相应的点距离 $\beta_D = 1$ , 则小孔中心之间的距离 $\Delta_1 (6/\pi)^{1/2} \beta_D \times D_1 = 300$ 微米。

最后, 考虑振幅全息图, 曝光比决定于数码板的效率 $\{\eta_D = \eta_{D0} (\eta/6\beta_D^2)\}$  曝光比应是

$$L = 0.26 \eta_{D0}$$

式中 $\eta_{D0}$ 表示数码板小孔的透过系数, 如果存储材料的曝光特性是接近线性的, 那么就能达到最佳总效率。但是, 理论极限的总效率只有 $\sim 1\%$ 。

计算表明: 一些参数, 如平均存储密度, 叠像存储材料的最大空间频率, 都使全息照像存贮系统的尺寸受到很大限制。

由于叠像和最大空间频率的限制一直使得很难超出 $10^6$ 比特/厘米<sup>2</sup>的平均存储密度。但是, 从理论上讲, 总容量可以达到 $10^8 - 10^9$ 比特。在这篇文章中, 究竟只讨论了理想元件系统的限制。当然除此限制外, 在实际元件系统中还会有许多缺陷, 它们也产生附加的限制。

译自 “Applied optics” Vol.11  
No. 1 p.182, 1972.