数字信息全息存储密度的理论极限

陈 颜 (激光研究室)
李宗泳 (光仪教研室)

摘 要

本文给出了计算数字信息全息存储密度的普遍公式。证明利用会聚光照明的方法将使全息存储系统的数字信息存储密度超出 Y. Takeda 给出的理论极限，但其极限[1]值仍处于由光学系统特性所予言的理论极限范围内。

The Thoeretical Limit on Holographic Digital Data Storage Density

Chen Yan Li Zong-Yong

Abstract

A general fomura for calculating holographic digital data storage density is presented. It is demonstrated that by means of converging beam illumination, the digital data storage density ofthe holographic system goes beyond the theoretical limit derived by Y. Takeda[1], but it is still within the theoretical limi of storage density predicted by the properties of the optical system.

一、引 言

全息存储器往往采用一个透镜的付里叶（或准付里叶）变换系统，在谱平面的中心制作付氏变换全息图被认为是最理想的。这种全息存储器具有（1）在没有高分辨率透镜的情况下获得高的信息存储密度；（2）存储信息存取对谱平面和象平面的焦深不敏感；（3）存储机构的冗余度；（4）读出装置或存储信息快速存取的简单性；（5）不同信息的多重存储；（6）数字或模拟信息的存储；（7）快速复制的可能性；（8）函数存储器等特性，

本文于1983年3月26日收到。

而引起人们的注意，被认为是全息术最有希望的用途之一。

开始，人们倾向于认为一个全息图能够在二维介质上存储比照片所能存储的更多得多的信息。但是，1972年 *Y*、*Takeda* 指出，全息照相存储密度因受存储系统激光波长和光学系统相对孔径的限制，其最高存储密度不超过 10^5 比特/毫米²。这一理论极限使全息术和照相术在信息存储领域中的竞争几乎成为平局。本文作者进一步研究了全息存储器的光学特性，认为：一个全息存储器的存储密度除了受到激光波长和光学系统的相对孔径限制之外，还受到照明光束孔径角的影响，在会聚光照明条件下，将使全息存储器的实际存储密度超过 *Y*、*Takeda* 所指出的理论极限。在此基础上，本文作者给出了一个计算全息存储器存储密度理论极限的一般公式。

二、数字信息存储密度的理论极限

全息存储器的存储密度受两个因素所限制。一个是每平方毫米存储介质上感光单位的数目，另一个是包括激光波长在内的光学系统的特性。*Mikaeline* 等人对存储介质上感光单位的数目与最大存储密度之间的关系提出了如下公式[2]

$$\Gamma_{max}=\frac{Q}{C} \tag{1}$$

Γ_{max}（比特/²毫米）为最大存储密度；Q（1/毫米²）为存储介质上感光单位的数目；C为用光强度比来量度的所期望的信噪比。由公式（1）计算，Γ_{max} 可达 10^7 比特/毫米²[3]。

进一步的研究表明，在全息照相中，（1）式中的 Γ_{max} 可用与物光波和参考光波有关的参量来表示。这样将会给全息存储系统的设计和存储密度的理论计算带来某种方便。Γ_{max} 与存储介质所能记录的干涉条纹的最大空间频率即截止频率 γ_0（1/毫米）有如下关系

$$\Gamma_{max}=\gamma_0^2 \tag{2}$$

在全息照相中，存储介质所能记录的全息图的最大空间频率由（3）式计算

$$\gamma_{max}=\frac{\sin\beta_{max}+\sin\alpha'_{max}}{\lambda} \tag{3}$$

式中 β_{max}，α'_{max} 分别为参考光束，物光光束与存储介质平面法线的最大夹角；λ 为光波波长。由公式（1）（2）（3）得

$$\sin\alpha'_{max}=\sqrt{\frac{Q}{C}}\lambda-\sin\beta_{max} \tag{4}$$

在图（1）所示的全息存储装置中，（4）式中的 α'_{max}为物光束的最大孔径角。由（4）式可看出，当激光波长 λ 和参考光波的入射角 β 一定后，物光束的最大孔径角将受到存储介质的感光单位的数目的限制。

下面讨论包括激光波长在内的光学系统的特性对存储密度的限制。*Y*·*Takeda* 采用图（1）所示的存储系统。用准直的激光波照明由点阵构成的信息源（比特板）如图（2）。径透镜聚焦在存储介质上，再引入一束平面参考光波叠加在上述物光波上。存储介质上物光波强度分布的包迹为熟知的Airy函数曲线[4]（如图3），全息图的大小应与Airy斑的大小相一

致。据此 Y·Takkeda 导出了一个受包括激光波长在内的光学系统特性限制的计算存储密

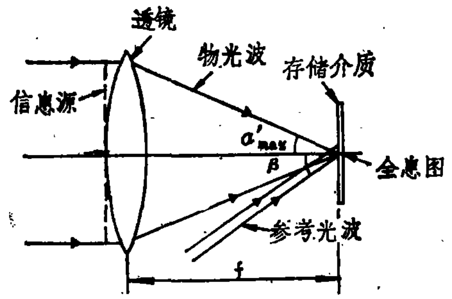


图 1

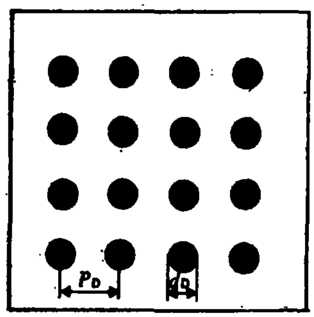


图 2

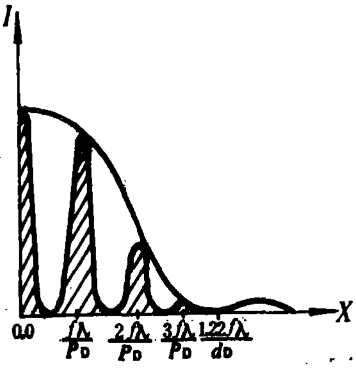


图 3

度理论极限的公式为[5]

$$\Gamma_{max}=\left[\frac{r_D}{r_H}\right]^2\frac{1}{9.4[F\lambda]^2} \tag{5}$$

式中 $r_D=d_D/P_D$；$r_H=d_H/d_A$；$F=f/D$。d_D 为组成信息的点的直径；P_D 为点排列的间距；d_A 为 Airy 班直径；d_H 为全息图的直径；D 为透鏡的有效口径；f 为透鏡的焦距。取 r_D/r_H 近似为 1，$F=2\sim1$，$\lambda=0.5$，，则 $\Gamma_{max}=1.1\sim4.2\times10^5$ 比特/毫米^2。由此 Y·Takeda 得出结论：全息存儲器的存儲密度仅受到激光波长和光学系统相对孔径（$1/F$）的限制，其最高理论极限值为 10^5 比特/毫米^2。但是，波动光学理论指出：在相干光照明条件下，衍射物的付里叶谱平面与照明光源的象平重合[6]。当采用球面激光波照明时，把信息源紧貼透鏡放置，则信息源的付里叶谱平面中心的 Airy 班直径为

$$dA_f=\frac{2.44l'\lambda}{d_D} \tag{6}$$

l' 为信息源到谱平面的距离。

当照明光束为平行光时，$l'=f$，$d_A=d_{Af}$ 则：

$$d_{Af}=\frac{2.44f\lambda}{d_D}$$

当用发散球面光波照明时，如图（4）a，$l'>f$，$d_A>d_{Af}$，Airy 班变大，由于其它条件不变，这时存儲密度将低于 Y·Takeda 所给的理论极限值。当用会聚球面波照明时，如图（4）b，$l'<f$，$d_A<d_Af$，Airy 班变小，存儲密度高于 Y·akeda 的理论极限。

假定在信息源点阵排列中有最大信息量，则透鏡直径 D 等于信息源点阵的对角线。

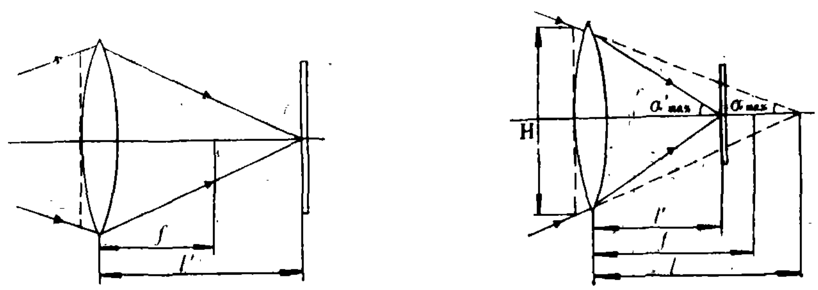
$$H=\frac{D}{\sqrt{2}}=\frac{d_D}{r_D}N \tag{7}$$

式中 H 为信息源宽度；N 为信息源点阵中点的行或列数。由图（4）b得

$$H=2l'\operatorname{tg}\alpha'_{max} \tag{8}$$

由式(5)，(6)，(7)，(8)得

$$d_H = r_H \frac{1.22\lambda N}{r_o \operatorname{tg}\alpha'_{max}} \tag{9}$$



(a) 图(4) (b)

全息图的面积 S_H 为

$$S_H = \frac{\pi}{4}\left[\frac{r_H}{r_D}\right]^2\left[\frac{1.22\lambda N}{\operatorname{tg}\alpha'_{max}}\right]^2 \tag{10}$$

存储密度的定义式为

$$\Gamma_{max} = \frac{S}{S_H' S_D} \tag{11}$$

式中 $S_D = P_D^2$ 为信息源中比特信息的面积； $S = \left[\frac{N d_D}{r_D}\right]^2$ 为信息源的总面积。

由式（10），（11）得：

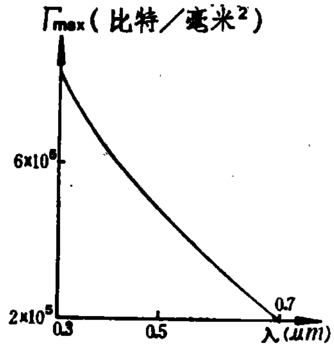
$$\Gamma_{max} = \left[\frac{r_D}{r_H}\right]^2\left[\frac{\operatorname{tg}^2\alpha'_{max}}{1.17\lambda^2}\right] \tag{12}$$

由理想光学系统的角放大率的计算公式得

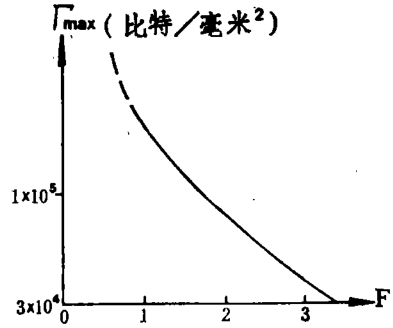
$$\Gamma_{max} = \left[\frac{r_D}{r_H}\right]^2 \frac{[2.83F\operatorname{tg}\alpha_{max}+1]^2}{9.4\lambda^2 F^2} \tag{13}$$

式中 α_{max} 在采用会聚光照明信息源时为正，反之为负。公式（13）为计算全息存储器存储密度的普遍公式。当信息源用平行光照明时（$\alpha_{max}=0$），公式（13）变为公式（5）（$Y \cdot Takeda$），用会聚光照明时（$\alpha_{max}>0$，Γ_{max}），Γ_{max}将大于(5)式给出的极限值。若取 $\lambda=0.5\mu m$； $F=2\sim1$； $\alpha_{max}=10°$，按（13）式计算得 $\Gamma_{max}=2.5\times10^5\sim1\times10^6$ 比特/毫米^2。α_{max} 最大可取到多少，要从两个方面考虑。其一是存储介质上感光单位的数目，在（4）式中若取$\sqrt{Q/C}=4\times10^3\cdot1$/毫米，$\lambda=0.5\mu m$，$F=$，$\beta=50°$，则 $|\alpha_{max}|=0\sim90°$，可见 α_{max} 不会受到存储介质上感光单位数目的限制。其二是照明系统光学特性的限制，这一问题需要专门讨论。因此，全息存储系统最大存储密度 Γ_{max} 要受到激光波长、光学透镜的相对孔径 F、照明光束的孔径角 α_{max} 等三个主要因素的限制，其关系分别用图（5），图（6），图（7）表出。图（8）是使用一个 $F=3.6$ 的透镜作存储透镜，分别采用平行光照明（$\alpha=0$）和会聚光照明（$\alpha=3°$）条件下获得的实验结果的比较。平行光照明时存储密度理论计算值为 5×10^3 比特/毫米^2，实验值为 5×10^3 比特/毫米^2；会聚光照明

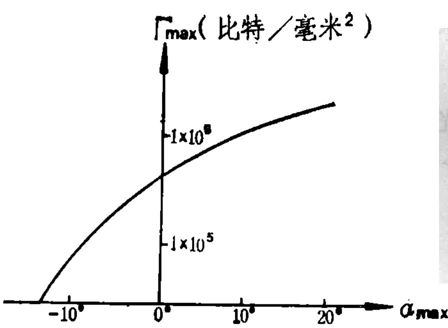
时存储密度理论值为1.2×10⁴比特/毫米²，实验值为1.1×10⁴比特/毫米²。



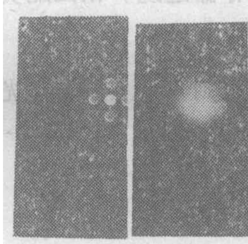
图（5）Γmax与λ的关系（F＝1；αmax＝0）



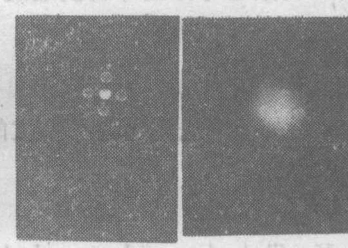
图（6）Γmax与F的关系（αmax＝0；λ＝0.5μm）



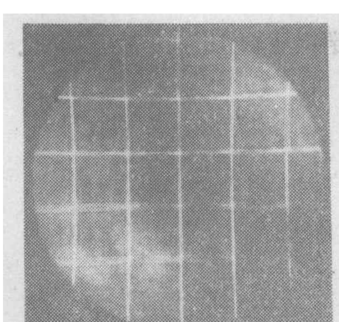
图（7）Γmax与αmax的关系（F＝1；λ＝0.5μm）



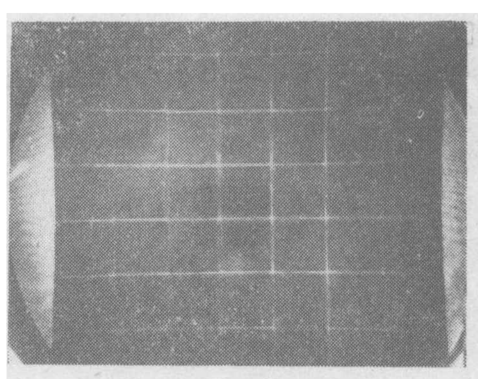
8—a 平行光照明时的Airy斑和全息图



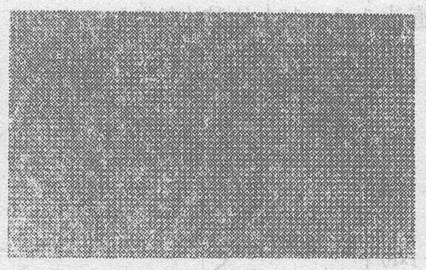
8—b 会聚光照明时的Airy斑和全息图



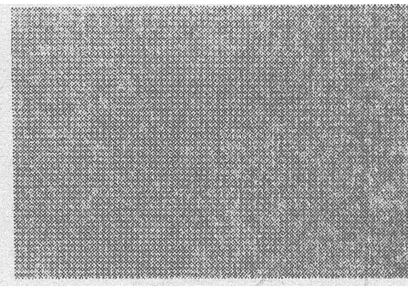
8—c 平行光照明时全息图再现的信息源的象



8—d 会聚光照明时全息图再现的信息源的象



8—e 平行光照明时，全息图再现的信息源的局部放大象



8—f 会聚光照明时全息图再现的信息源的局部放大象图

三、结 束 语

本文从理论和实验上证实 *Y·kaeda* 所给出的数字信息全息存储密度理论计算公式并不能予测全息存储系统信息存储密度的理论极限值。采用会聚光照明信息源，使实现具有高衍射效率和高信噪比的存储密度达 10^6 比特/毫米^2 的全息存储器将成为可能。问题在于设计出使照明系统与付里叶变换透镜（存储透镜）相匹配实现大角度会聚光照明的光学系统。这有待进一步探索。

致谢：本文在写作和实验过程中，曾得到北京工业大学光仪教研室袁继信、邢英杰老师的帮助，707 所胡国华先生参与了本文的实验验证，在此一一致谢。

参 考 文 献

[1] Y·Takeda, 《Japan. J. Appl. Phys》., 1972, vol 11, 5, 656—665.

[2] A. L. Mikaeliane, V. I. Bobrhnev, S. M. Naumov and. L. 2. Sokolora, 《IEEE. J. Quantum Electronics》QE-6, 1970, 193.

[3] 同[1].

[4] M·Born and E·Wolf, 《Principles of Optics(Pergamon Press, 1965)》, 3rd ed. P395.

[5] 同[1].

[6] M·Bron and E·Wolf《光学原理》上册，科学出版社 1978 年版，P501.