

# 全息光盘存储器的数据存取与像素匹配

王 也<sup>1</sup> 陶世荃<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国传媒大学理学院光电学系, 北京 100024; <sup>2</sup> 北京工业大学应用数理学院, 北京 100022)

**摘要** 全息光盘存储(HDS)技术作为一种非常具有潜力的新型信息存储技术,是下一代光盘发展的目标。在全息光盘存储系统中,为了实现数据精确快速地写入和读出,降低误码率,需要在整个高分辨率页面上实现空间光调制器(SLM)与光电阵列耦合器(CCD)之间 1:1 像素匹配。在体全息存储理论和光学设计理论基础上,研究实现 SLM 和 CCD 像素 1:1 匹配的方法,提出了实现像素匹配的要求和条件,并且按照此要求完成该全息光盘存储器的光学系统。实验中,分别使用随机数据掩膜版和 SLM 实现了对 CCD 的  $512 \times 512$  精确像素匹配,在光学系统中引入存储介质条件下,图像质量良好,掩膜版和 SLM 原始误码率分别为  $2.5 \times 10^{-4}$  和  $1.5 \times 10^{-4}$ 。

**关键词** 全息;全息光盘;傅里叶变换透镜;像素匹配;误码率

**中图分类号** TP333.4<sup>+</sup>2      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0095

## Data and Pixel Match in Holographic Disc Storage

Wang Ye<sup>1</sup> Tao Shiquan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Optics and Electrics, College of Science, Communication University of China, Beijing 100024, China)  
(<sup>2</sup> College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract** The holographic disc storage (HDS) technology has become one of the potential new types of optical storage technologies. In order to obtain precise input and output information, hence, reduce the bit-error rate in the retrieved data, the accurate pixel matching between the whole high-resolution page of SLM and CCD must be ensured. We discuss the method and technique of pixel matching based on volume holographic storage theory, and then accomplished an optical system to realize pixel match by imaging a random data both mask and SLM of  $512 \times 512$  pixels. The results showed that 1:1 pixel matching between spatial light modulator (SLM) and CCD was realized, and a raw bit-error-rate (BER) of  $1.5 \times 10^{-4}$  ( $2.5 \times 10^{-4}$  of mask) was achieved.

**Key words** holography; holographic disc; Fourier lens; pixel match; bit-error rate

## 1 引 言

全息光盘存储技术作为一种非常具有潜力的新型信息存储技术,是下一代光盘发展的目标。全息光盘存储与传统光盘存储的不同是写入和读出过程是一种并行处理的过程,光学系统相当于建立了一个由空间光调制器到光电探测器阵列的输入和输出通道。信息的输入和输出通道性能是存储系统数据传输量和传输速率的决定性因素。为充分发挥全息数据存储容量大、数据传输速率高和寻址时间短等优点,如何实现低误码率(BER)数据存储,输入、输出信号匹配及其关系的研究成为亟待解决的问题。目前国际上通用的输入输出像素匹配方案主要有两

种:一种是探测器过采样,即一个空间光调制器像素对应多个电荷耦合器件像素,如空间光调制器(SLM)与 CCD 的像素 1:2 或 1:3 对应等。它降低了对成像光路的要求并能有效防止信号混叠,但是成倍牺牲存储密度和数据传输速率。另外一种空间光调制器与光电探测器阵列的像素 1:1 对应。此方案充分利用了输入、输出器件的信息处理能力,光电转换过程和噪声源相对简单,但是需要能够实现像素精确匹配的光学系统。这种方案尽管有较大的难度,但是能够克服第一种方案的缺点,更能满足存储容量和速度不断提高的要求,本文就 1:1 像素精确匹配系统进行研究<sup>[1~3]</sup>。

**基金项目**: 中国传媒大学校基金(YNG0608)和国家自然科学基金(69977005)资助项目。

**作者简介**: 王 也(1974—),男,讲师,博士,主要从事光学设计、精密仪器与机械、光信息处理方面的研究。

E-mail: wangyale@cuc.edu.cn

## 2 全息光盘数据存储的光学原理和误码率的计算

### 2.1 光学系统的设计

数字式体全息存储器的基本光路是光信息处理常用的  $4f$  光学系统,为了简化光路和缩小整体尺寸,在全息光盘存储器中采用同轴全息光学系统,即物光和参考光共轴。图 1 所示为其光学系统示意图,将待存储的数据信息进行编码,形成二值化的数字图像,其中黑白像素分别代表二进制编码的“0”和“1”。然后将该二值化图像加载于空间光调制器上,通过对光束的调制来加载存储信息<sup>[4,5]</sup>。

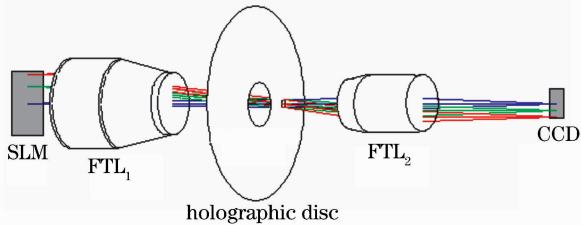


图 1 基本光路示意图

Fig. 1 Optics configuration of holographic disc storage

用一束经过整形的平行激光束照射置于傅里叶变换透镜 (FTL<sub>1</sub>) 前焦面上的空间光调制器,它将待存储的数字信息形成目标物,透过 SLM 后的光束则加载了存储的光信息,以此作为物光束,同时,利用该光束的周围部分即未透过 SLM 的那部分光作为参考光束,在 FTL<sub>1</sub> 后焦面上安放全息光盘作为记录介质,这样物光和参考光在 FTL<sub>1</sub> 后焦点的位置发生干涉形成全息图,将此全息图记录在光盘中,便将信息存储下来。读出信息时,用原参考光照明该全息图,通过 FTL<sub>2</sub> 作傅里叶逆变换,在 FTL<sub>2</sub> 后焦面平面上形成到实像,在此位置上放置光电探测器 CCD 采集该图像,就可以实现存储信息的读出<sup>[6~10]</sup>。实际工作时,可以通过改变全息光盘的轨道或旋转不同的位置实现高密度的信息存储。若将光学系统设计成 SLM 和 CCD 的像素完全匹配对应时,就相当于建立了一个空间矩阵通道,实现数据页面并行存取的高速处理。

像素 1:1 匹配就是要求 SLM 和 CCD 的像素一一对应,在进行光学设计时忽略透明导电电极的影响,即每个像素均视为正方形,则两个傅里叶变换透镜的焦距比应该与 SLM 和 CCD 的像素尺寸比是一致的。以此来决定  $4f$  系统的放大率。除此之外,由于数据的存取是以图像形式进行的,因此对光学系统的像差有严格的要求。由于全息光存储器是使用相

干光单一波长的,所以透镜设计时可以忽略色差和波色差,其他主要需要校正球差、慧差、像散、场曲和畸变,设计时使像面的弥散斑均方根直径小于 CCD 的像素尺寸。为了保证像素的匹配,除了使这些像差满足精确成像要求外,畸变的要求特别严格,根据图像的误码率和图像处理要求,要求像面畸变量小于一个像素尺寸的  $1/10$ ,即要求这两个傅里叶变换透镜组合后的畸变量应该小于  $0.01\%$ <sup>[9]</sup>。

### 2.2 误码率的计算

误码率 (BER) 是评价全息存储二值化图像质量的最终标准,它反映了数据存储的保真度。误码率的计算需要知道信号和噪声的统计分布特性。通常光信号的统计特性是服从泊松分布的,这给误码率的计算带来了很大的困难。为了得到简单明确的解析结果,可以假设所有的统计特性都是高斯分布的。许多实验测量表明,再现图像的像素强度分布通常表示为图 2 所示的形式,即灰度图像的直方图<sup>[1]</sup>。

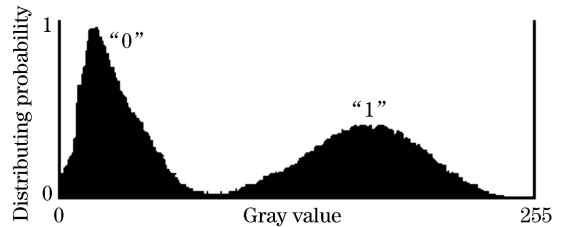


图 2 灰度图像的直方图

Fig. 2 Gray histogram of a typical binary image

误码率的计算方法可以根据再现图像的灰度直方图来讨论。因为高斯噪声叠加在“0”像素和“1”像素上,那么像素强度测量值  $I$  (取样值) 也具有高斯统计分布。高斯概率密度函数为

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

式中  $m$  为平均值,  $\sigma$  为分布的标准差。则“0”像素和“1”像素的强度概率密度函数可分别表示为

$$p_0(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\frac{(I-I_0)^2}{2\sigma_0^2}}, \quad (2)$$

$$p_1(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(I-I_1)^2}{2\sigma_1^2}}, \quad (3)$$

式中  $\sigma_1$  和  $\sigma_0$  分别为“1”像素和“0”像素概率密度函数的标准差,这里的  $I_1$  和  $I_0$  分别为它们的平均强度。若原图像中“0”和“1”像素出现的概率分别为  $P_0$  和  $P_1$ ,则总误码率  $P_{\text{BER}}$  为

$$P_{\text{BER}} = P_0 P(1/0) + P_1 P(0/1), \quad (4)$$

通常,在进行数据编码形成二值化图像的处理过程中,使原始图像中“0”和“1”像素出现的概率相等,

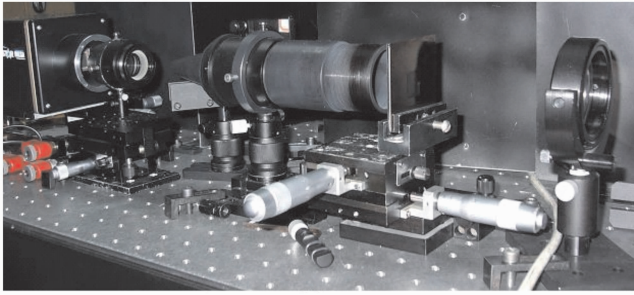
即  $P_0 = P_1 = 1/2$ ，这样可以计算误码率

$$P_{BER} = \frac{1}{2} [P(0/1) + P(1/0)] = \frac{1}{2} \left[ \int_{I_d}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-(I-I_0)^2/2\sigma_0^2} dI + \int_{-\infty}^{I_d} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-(I-I_1)^2/2\sigma_1^2} dI \right]. \quad (5)$$

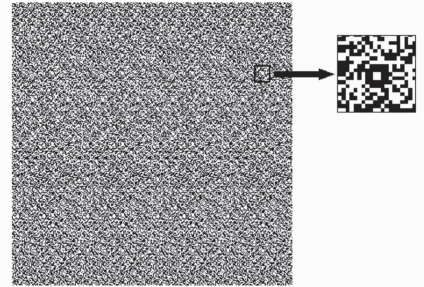
表 1 4f 系统主要像差最大值

Table 1 Maximum values of main aberrations of the 4f system with holographic disc inserted

Wave aberration	Tangential field curvature /mm	Distortion /%	Spherical aberration /mm	MTF /(40 Lp/mm)	Lattice diagram of dispersion speckle RMS / $\mu\text{m}$
0.24	-0.087	0.0078	0.006	0.536	4.063



(a)



(b)

图 3 像素匹配实验系统图。(a) 实物照片；(b) 随机数据的编码图

Fig. 3 Pixel-match test system. (a) photo of pixel-match test system; (b) pattern of data

在光学平台上进行像素匹配的验证性实验，考虑到 SLM 的面填充因子达不到 100% (每个像素通光孔径  $23 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ )，在进行实验时分别使用镀铬的玻璃掩模版和空间光调制器进行比照，图案为随机的二值化黑白像素组成，“0”和“1”像素出现的概率相等。实验系统装置如图 3(a)所示，图 3(b)为掩模版的随机数据编码图案。

### 3.2 实验结果

将 SLM 和 CCD 分别固定在精密的位移台上，其中 CCD 的调节架由一个多维精密电控调整台组成，可以实现 CCD 像面的像素级尺寸调整，SLM 的多维调节台可以实现微米级别调整。首先使用镀铬的玻璃掩模版模拟空间光调制器，以  $512 \times 512$  ( $26 \mu\text{m} \times 26 \mu\text{m}$ ) 形式做成随机数据的二值化图像掩模版。在光路中间加载存储介质后，通过初步调整，在 CCD 上采集到了清晰的图像，此时由于尚没有完全精确调整各光学和机械部件的位置和角度，初步得到的图像是 SLM 和 CCD 未完全匹配的图像，如图 4 所示，图像不够清晰，并且受放大率和空间位置等参数误差的影响，可以看到图像中有明显

## 3 像素匹配的实验研究

### 3.1 实验的条件与方法

根据上述原理和要求，设计一个实验的光学系统，根据 SLM ( $1024 \times 768, 26 \mu\text{m} \times 26 \mu\text{m}$ ) 和 CCD ( $1024 \times 1024, 12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ ) 的尺寸确定 FTL<sub>1</sub> 和 FTL<sub>2</sub> 的焦距分别为 130 mm 和 60 mm，幅面均使用中间部分  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ ，傅里叶变换镜头组成的 4f 系统在像面上的各种像差如表 1 所示。

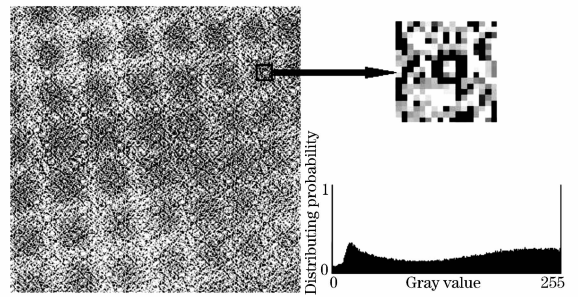


图 4 像素不匹配的图像及灰度直方图

Fig. 4 Pixels mismatched image and gray histogram

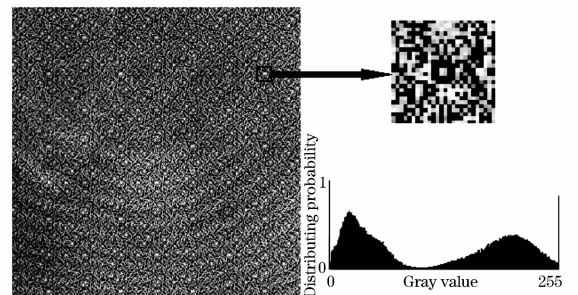


图 5 像素 1:1 匹配后的图像及灰度直方图

Fig. 5 Pixels 1:1 matched image and gray histogram

的莫尔条纹现象。

通过对莫尔条纹的角度和周期进行分析和计算,得到了精确调整数据来调整器件的位置,经过再次精细调整各器件的位置和角度,得到了非常好的像素匹配图像。然后换上 SLM,加载同样的随机数据二值化图像,经过调整,也得到了非常好的像素匹配图像,如图 5 所示,图像大小为 512 pixel  $\times$  512 pixel,并且边缘清晰,验证了光学系统的放大率以及像差都符合设计要求。

为了更好地验证像素匹配实验,作出了两种方式对应图像的灰度直方图,以此来计算误码率。利用软件编程读出 8 位灰度图的所有像素的灰度值后,进行统计,通过前述方法计算得出信噪比的数值。经过计算,采用掩膜版的光学系统,系统的原始误码率为  $2.5 \times 10^{-4}$ 。而采用 SLM 的光学系统的原始误码率为  $1.5 \times 10^{-4}$ 。在实际应用时,由于体全息存储具有非常高的冗余度,通过特殊的编码和解码程序,在  $10^{-4}$  误码率的条件下,可以将实际数据的误码率降到  $10^{-9}$  以下。

## 4 结 论

按照全息光盘存储的原理和要求,提出实现 1:1 像素匹配的要求和条件,并且设计了一个精密的光学系统,按照这些要求和条件进行加工和装校,实现了满足 SLM 和 CCD 像素 1:1 匹配的全息光盘存储系统。经过实验验证,在光路中加载存储介质条件下,可以得到非常好的匹配图像,根据灰度图像进行计算后得到了很低的原始误码率。这一研究可以对全息光盘存储器的输入输出光学系统的设计、数据

编码方式以及快速读取提供参考和帮助,有助于全息光盘存储器商业化、实用化发展。此外,为了能够进一步提高数据的存储密度,如何实现更大幅面的像素匹配等,将是下一步研究的重要内容。

## 参 考 文 献

- 1 Tao Shiquan, Wang Dayong, Jiang Zhuqing *et al.*. Optical Holographic Storage [M]. Beijing: Beijing Industrial University Press, 1998. 230  
陶世荃,王大勇,江竹青等. 光全息存储[M]. 北京:北京工业大学出版社, 1998. 230
- 2 L. Hesselink, M. C. Bashaw. Optical memories implemented with photorefractive media [J]. *Opt. and Quantum Electron.*, 1993, **25**(9):611~661
- 3 G. W. Burr, C. M. Jefferson, H. Coufal, M. Jurich *et al.*. Volume holographic data storage at an areal density of 250 gigepixels/in<sup>2</sup> [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(7):444~446
- 4 Hideyoshi Horimai, Xiaodi Tan, Jun Li. Collinear holography [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**:2575~2580
- 5 Sergei S. Orlov, William Phillips, Eric Bjornson *et al.*. High-transfer-rate high-capacity holographic disk data-storage system [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**:4902~4913
- 6 S. Orlov, W. Phillips, E. Bjornson *et al.*. High data rate (10 Gbit/sec) demonstration in holographic disk digital data storage system [C]. Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO-Technical Digest, 2002. 70~71
- 7 Lambertus Hesselink. Ultra-high-density data storage [J]. *Communication of the ACM*, 2000, **43**(11):33~36
- 8 Wang Ye, Wang Yuhong, Tao Shiquan. Fix reposition errors and compensation method of holographic disc [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(6):741~746  
王 也,万玉红,陶世荃. 全息光盘的重复定位误差及补偿方法 [J]. 光学精密工程, 2005, **13**(6):741~746
- 9 Wang Ye, Liu Changjiang, Wan Yuhong *et al.*. Lens design for digital volume holographic storage systems [C]. *SPIE*, 2004, **5638**:665~670
- 10 Tao Shiquan, Xu Min. Spatio-angularly-multiplexed three dimensional holographic disks [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(8):1015~1020  
陶世荃,徐 敏. 采用空间-角度复用的三维盘式全息存储[J]. 光学学报, 1997, **17**(8):1015~1020