

文章编号: 0253-2239(2010)07-2080-04

用二值空间光调制器实现多灰阶全息存储

顾华荣 赵 臻 曹良才 何庆声 金国藩

(清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 为了利用二值空间光调制器实现多灰阶全息存储, 将待存储数据页分解成一系列等价二值数据页, 并将记录时间分割成与二值数据页对应的一系列递减时间段, 每个时间段使用二值空间光调制器加载相应的二值数据页与参考光在存储介质内部干涉记录一系列全息图。从理论上证明了再现所得数据页的灰阶分布与待存储的数据页一致, 并从实验上验证了用二值空间光调制器实现四灰阶存储的可行性。多灰阶全息存储提高了每幅数据页的信息量, 更加充分地利用了存储介质的动态范围, 提高了存储密度与读出数据传输速率。

关键词 信息光学; 全息存储; 二值空间光调制器; 数据页分解; 记录时间分割

中图分类号 O438.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.2080

Multi-Gray-Level Holographic Storage Using a Binary Spatial Light Modulator

Gu Huarong Zhao Zhen Cao Liangcai He Qingsheng Jin Guofan

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract In order to implement multi-gray-level holographic storage using a binary spatial light modulator, a data page to store is divided into a series of equivalent binary data pages. The recording time is also split into a series of time slices corresponding to the binary data pages. During each time slice, a binary data page is uploaded by the binary spatial light modulator into the object beam which interferes with the reference beam. A series of holograms are recorded in the material. It is proved theoretically that the gray-level distributions of the reconstructed data page are equal to those of the original data page. An experiment of four-gray-level storage is carried out to verify its feasibility. The multi-gray-level storage method can enlarge the capacity of the stored data page. The dynamic range of the material is fully made use of. And the storage density and readout data rate are both improved.

Key words information optics; holographic storage; binary spatial light modulator; data page decomposition; recording time division

1 引 言

全息存储的数据页通常为二值数据页, 即数据页中的每个像素的状态只有亮(On)和暗(Off)。为了进一步提高存储密度和数据传输速率, G. W. Burr 等提出了多灰阶数据页全息存储的概念, 并在实验中采用三灰阶提高了 30% 的存储密度与读出

数据传输速率^[1]。陶世荃等定量研究了再现全息图的灰阶保真度, 并分析了参物比、曝光时序和噪声对于保真度的影响^[2,3]。随后, King 等将稀疏调制码引入多灰阶全息存储, 在三灰阶像素的情形下将存储密度提高了 11%~35%, 读出数据传输速率提高了 12%^[4]。

收稿日期: 2009-08-11; 收到修改稿日期: 2009-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(60677037, 60807005)、国家 973 计划(2009CB724007)、国家 863 计划(2009AA01Z112)和预研基金(9140A02050808JW0121)资助课题。

作者简介: 顾华荣(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事体全息信息存储与信道处理方面的研究。

E-mail: ghr00@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 金国藩(1929—), 男, 中国工程院院士, 博士生导师, 主要从事光学信息处理方面的研究。

E-mail: jgf-dpi@mail.tsinghua.edu.cn

要实现多灰阶全息存储,必须将待存储的多灰阶数据页加载至物光,再与参考光干涉将全息光栅记录于存储介质内。多灰阶数据页的加载可以采用灰度空间光调制器,但是灰度空间光调制器的调制线性度难以保证,对比度往往不高,制造工艺复杂,成本高,在实际的全息存储方案中很少采用。而二值空间光调制器的对比度较高^[5],制造和使用简单,价格较低,是目前所实现的各种全息存储系统中最广泛采用的数据页加载器件^[6~9]。由于二值空间光调制器的每个像素只存在两个状态(或两个灰阶),无法直接加载多灰阶数据页。将待存储的多灰阶数据页分解成一系列二值数据页,并将记录时间分割成一系列时间段,每个时间段使用二值空间光调制器加载相应的二值数据页与参考光在存储介质内部干涉记录一系列全息图;通过合理设计二值数据页序列和时间段序列,使得用参考光再现得到的数据页的灰阶分布与待存储的数据页一致,实现多灰阶存储的目的。

2 基本原理

在如图 1 所示的全息存储系统示意图中,CMOS 为互补金属氧化物半导体图像感应器。空间光调制器(SLM)的像素尺寸为 p ,像素数目为 $M \times N$,以光轴与 SLM 交点为原点建立直角坐标系, x 轴和 y 轴的正方向分别为向右和向上, (x_0, y_0) 为 SLM 左上角像素的几何中心坐标。当 SLM 加载强度分布为矩阵 \mathbf{A} 的数据页时,物光的复振幅分布被调制为

$$S \propto \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sqrt{a_{mn}} \operatorname{rect} \left[\frac{x - (n-1)p - x_0}{p} \right] \times \operatorname{rect} \left[\frac{y + (m-1)p - y_0}{p} \right], \quad (1)$$

式中 a_{mn} 为矩阵 \mathbf{A} 的第 m 行第 n 列的元素,对应于该位置像素的强度。

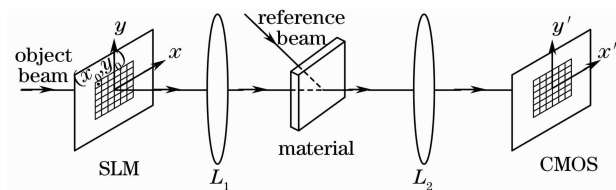


图 1 全息存储系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the holographic storage system

物光经过傅里叶变换透镜前组(L_1)后,在谱面上的分布正比于 $\mathcal{F}\{S\}$ (\mathcal{F} 表示傅里叶变换)。物光

与参考光干涉,在存储介质中形成了相应的全息光栅,其复振幅透射率为

$$\tau_A \propto c \times t_E \times \mathcal{F}\{S\} \times R^*, \quad (2)$$

式中 c 为单位曝光量对存储介质复振幅透射率的改变量(假设存储过程处于存储介质的线性响应区, c 为常数), t_E 为曝光时间, R^* 为参考光的复共轭。

再现数据页时,仅以记录时使用的参考光 R 照射全息光栅,得到衍射光场分布正比于 $\tau_A R$ 。衍射光场经过傅里叶变换透镜后组(L_2)变换后得到再现数据页的复振幅分布为

$$S' \propto \mathcal{F}\{\tau_A R\} \propto c(R^* R) t_E \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sqrt{a_{mn}} \times \operatorname{rect} \left[\frac{x' + (n-1)p + x_0}{p} \right] \operatorname{rect} \left[\frac{y' - (m-1)p + y_0}{p} \right]. \quad (3)$$

可见在理想情况下,再现数据页是所存数据页的空间位置翻转。对于二值空间光调制器, a_{mn} 的取值只有两个,为了使再现数据页的复振幅分布 S' 具有多灰阶,只能从曝光时间 t_E 上进行区别。

假设要实现 $0, 1, 2, \dots, k, \dots, K$ 这 $K+1$ 个灰阶,即 CMOS 上 $K+1$ 个线性增加的强度分布,由(3)式可知强度正比于曝光时间的平方,对于探测器上灰阶为 $1 \sim K$ 的像素,所需曝光时间之比为

$$t_{E1} : t_{E2} : \dots : t_{Ek} : \dots : t_{EK} = 1 : \sqrt{2} : \dots : \sqrt{k} : \dots : \sqrt{K}. \quad (4)$$

灰阶为 0 的像素不需要曝光,其曝光时间 $t_{E0} = 0$ 。

3 存储方案

设待存储的数据页包含上述 $K+1$ 个灰阶,对应的矩阵为 \mathbf{A} ,其一般元素为 a_{mn} ($m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N; a_{mn} \in \{k | 0 \leq k \leq K\}$)。将矩阵 \mathbf{A} 分解成 K 个子矩阵 $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_k, \dots, \mathbf{A}_K$,分解规则如下:

$$a_{kmn} = \begin{cases} 0 & (a_{mn} < k) \\ 1 & (a_{mn} \geq k) \end{cases}, \quad (5)$$

式中 a_{kmn} 为子矩阵 \mathbf{A}_k 的一般元素, $1 \leq k \leq K$ 。由(5)式不难看出

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 + \dots + \mathbf{A}_k + \dots + \mathbf{A}_K, \quad (6)$$

将记录时间分为相应的 K 个时间段 $T_{E1}, T_{E2}, \dots, T_{Ek}, \dots, T_{EK}$, 其中

$$T_{Ek} = t_{Ek} - t_{E(k-1)} = (\sqrt{k} - \sqrt{k-1}) \Delta t, \quad (7)$$

Δt 为一固定的时间间隔,其取值应保证存储介质的响应在其动态范围之内,并且保证再现过程中探测器的响应处于线性区内。

保持参考光不变,在记录时间段 T_{Ek} 内使用二值空间光调制器加载分布为矩阵 \mathbf{A}_k 的数据页,如图 2 所示。各时间段 T_{Ek} 的顺序可以任意打乱,只要保证加载对应的分布为矩阵 \mathbf{A}_k 的数据页。

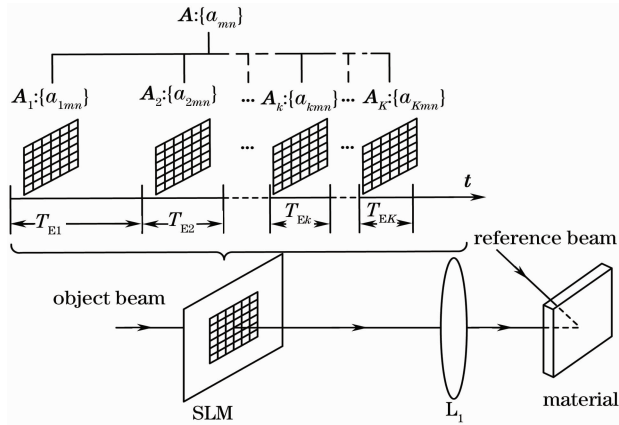


图 2 用二值空间光调制器实现多灰阶全息存储的记录方法示意图

Fig. 2 Schematic of recording method to achieve multi-gray-level holographic storage using a binary SLM

再现所存数据页时,根据(3)式,在时间段 T_{Ek} 内所记录的数据页对于再现数据页贡献的复振幅分布为

$$S_k' \propto T_{Ek} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sqrt{a_{kmn}} \times \text{rect} \left[\frac{x' + (n-1)p + x_0}{p} \right] \text{rect} \left[\frac{y' - (m-1)p + y_0}{p} \right], \quad (8)$$

式中已省略了保持不变的参考光复振幅 R 以及假定为常数的 c 。再现数据页的复振幅分布为

$$S' = \sum_{k=1}^K S_k' \propto \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\sum_{k=1}^K T_{Ek} \sqrt{a_{kmn}} \right) \times \text{rect} \left[\frac{x' + (n-1)p + x_0}{p} \right] \text{rect} \left[\frac{y' - (m-1)p + y_0}{p} \right], \quad (9)$$

式中

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K T_{Ek} \sqrt{a_{kmn}} &= \\ \sum_{k=1}^{a_{mn}} T_{Ek} \sqrt{a_{kmn}} + \sum_{k=a_{mn}+1}^K T_{Ek} \sqrt{a_{kmn}} &= \\ \sum_{k=1}^{a_{mn}} T_{Ek} \sqrt{1} + \sum_{k=a_{mn}+1}^K T_{Ek} \sqrt{0} &= \\ \sum_{k=1}^{a_{mn}} (\sqrt{k} - \sqrt{k-1}) \Delta t = \sqrt{a_{mn}} \Delta t, & \quad (10) \end{aligned}$$

所以(9)式可改写为

$$S' \propto \Delta t \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sqrt{a_{mn}} \times \text{rect} \left[\frac{x' + (n-1)p + x_0}{p} \right] \text{rect} \left[\frac{y' - (m-1)p + y_0}{p} \right]. \quad (11)$$

再现数据页的强度分布(复振幅的模的平方)正好与待存储的数据页一致。

此外,存储方案不会降低数据记录速率,因为每幅数据页中最亮的像素所需的记录时间与直接使用灰度空间光调制器相同。

4 实验验证

不失一般性地,取待存储的数据页对应的矩阵 \mathbf{A} 为 2×2 方阵,其 4 个元素的取值为别为 0, 1, 2, 3, 即存储四灰阶数据页。将矩阵 \mathbf{A} 分解为子矩阵 $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3,$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

将记录时间分为 3 个时间段序列 T_{E1}, T_{E2}, T_{E3} , 其中 $T_{E1} = \Delta t, T_{E2} = (\sqrt{2} - 1)\Delta t, T_{E3} = (\sqrt{3} - \sqrt{2})\Delta t,$

(16)

构建如图 3 所示的实验光路,激光经滤波扩束准直后被偏振分光棱镜(PBS)分为两束,其中一束作为物光再经过扩束准直后照射到 SLM 上,另一束作为参考光经过两面反射镜照射到存储介质上。傅里叶变换透镜前组(L_1)与后组(L_2)构成 $4f$ 系统,再现数据页由 CMOS 相机接收。实验中采用小型半导体抽运固体激光器(DPSSL),波长 532 nm,标称功率 100 mW。所用 SLM 为 Displaytech 公司生产的 LDP-0983-HS1 型 SLM,它是一种反射式的二值空间光调制器,分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$,像素尺寸为 $13.2 \mu\text{m} \times 13.2 \mu\text{m}$,使用其中心 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,并分为 4 个 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 区域,每个区域表示矩阵中的一个元素。CMOS 相机为 Mikrottron 公司生产的 MC1310,分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,像素尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 。傅里叶变换透镜前后组的焦距分

别为 $f_1 = 44 \text{ mm}$ 与 $f_2 = 40 \text{ mm}$ ，以实现 SLM 与 CMOS 相机像素的一一匹配。存储介质为单掺铁的铌酸锂晶体 $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$ ($\text{Fe}:0.03\%$ ，生长态)，记录和擦除时间常数约为 3300 s 。

记录过程中保持参考光强度不变，取 $\Delta t = 20 \text{ s}$ ，对应于矩阵 $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3$ 的数据页的曝光时间分别为 $20, 8.3$ 和 6.3 s 。在此记录时间内，材料的擦除效应不明显。曝光结束后，仅打开参考光，再现所得数据页如图 4(a) 所示，其中环状条纹及亮斑是光路中的噪声引起的。图 4(b) 为再现数据页 4 个区域的灰度平均值与待存储数据页的 4 个灰阶之间的关系，其线性相关系数为 0.9969 ，再现数据页的灰阶

分布与待存储的数据页灰阶分布基本一致，实现了四灰阶存储。

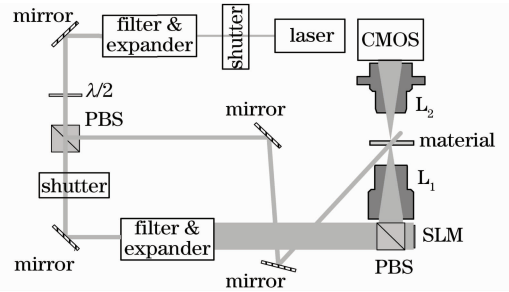


图 3 四灰阶存储实验光路

Fig. 3 The experimental optical layout of the 4-gray-level storage

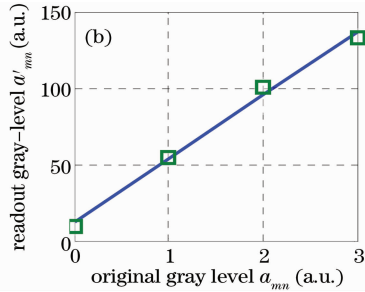
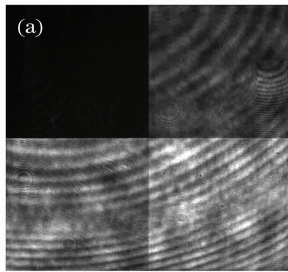


图 4 四灰阶存储再现的数据页与灰阶分布。(a)探测器接收到的再现数据页；(b)再现数据页的灰阶分布与待存储数据页的灰阶分布之间的关系

Fig. 4 Reconstructed data page and its gray-level distribution of the 4-gray-level storage. (a)Reconstructed data page received by the detector; (b)the relation between the gray-level distributions of the reconstructed data page and the original data page

5 结 论

提出了一种利用二值空间光调制器实现多灰阶全息存储的方法，将待存储数据页分解成一系列等价二值数据页，并将记录时间分割成与二值数据页对应的一系列递减时间段。从理论上证明了再现所得数据页的灰阶分布与待存储的数据页一致，并从实验上验证了用二值空间光调制器实现四灰阶存储的可行性。提高了全息存储系统每幅数据页的信息量，更加充分地利用了存储介质的动态范围，提高了存储密度与读出数据传输速率。

参 考 文 献

- Burr G. W., Barking G., Coufal H *et al.*. Gray-scale data pages for digital holographic data storage [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(15): 1218~1220
- Tao S. Q., Tang B., Zhou Y *et al.*. Quantitative study of the gray-scale fidelity of volume holographic images [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(17): 3767~3777
- Tang Bin, Tao Shiquan, Jiang Zhuqing *et al.*. The gray scale fidelity of images retrieved from holograms in photorefractive

- crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **26**(7): 649~655
- 唐 斌, 陶世荃, 江竹青 等. 光折变晶体全息存储的图像灰度保真度 [J]. *中国激光*, 1999, **26**(7): 649~655
- King B. M., Burr G. W., Neifeld M. A.. Experimental demonstration of gray-scale sparse modulation codes in volume holographic storage [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(14): 2546~2559
- Ge Aiming, Sui Zhan, Su Junhong. Research on characteristics of amplitude modulation of a reflective liquid crystal on silicon device [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 346~350
- 葛爱明, 隋 展, 苏俊宏. 反射式液晶器件振幅调制特性的研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 346~350
- Burr G. W., Jefferson C. M., Coufal H *et al.*. Volume holographic data storage at areal density of 250 gigapixels/in. (2) [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(7): 444~446
- Orlov S. S., Phillips W., Bjornson E *et al.*. High-transfer-rate high-capacity holographic disk data-storage system [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(25): 4902~4914
- Li Xiaochun, He Qingsheng, Jin Guofan *et al.*. Volume holographic storage and retrieval of 1000 digital images in lithium niobate [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(6): 722~725
- 李晓春, 何庆声, 金国藩 等. 1000 幅数字图像的晶体体全息存储与恢复 [J]. *光学学报*, 1998, **18**(6): 722~725
- Ouyang Chuan, He Qingsheng, Wang Fengtao *et al.*. Volume holographic correlation system with large capacity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1095~1098
- 欧阳川, 何庆声, 王凤涛 等. 大容量体全息相关系统 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1095~1098