

文章编号 : 0253-2239(2002)06-0645-05

体全息存储系统输入输出信号匹配关系研究*

邵 冰 何树荣 邬敏贤 何庆声 金国藩

(清华大学精密仪器系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 分析了体全息存储系统输入器件(空间光调制器)与输出器件(电荷耦合器件)空间相对位置对信号匹配效果的影响,总结了信号输入、输出器件调整机构灵敏度的验证方法。以此为基础,借助掩模板实现了 1000×1000 像素阵列输入输出的一对一匹配。研究了输入器件像素填充因子和输入图案组合对读出图像的影响,为实现低误码率大容量数据页存储提供理论和实验基础。

关键词: 全息存储;空间光调制器;电荷耦合器件;像素匹配;掩模板

中图分类号: O438.1 文献标识码: A

1 引 言

信号输入、输出设备性能是存储系统数据传输量和传输速率的决定性因素。空间光调制器(SLM)和电荷耦合器件(CCD)的发展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提供了硬件基础,使之成为新一代存储技术的代表。为了实现低误码率(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:

1) 空间光调制器与电荷耦合器件像素一一对应。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^[1]。然而,高分辨率空间光调制器上每个像素与电荷耦合器件相应像素的精确物像关系对光学系统分辨率和像质要求极高,而且由于记录设备安装误差和元件热胀等因素,难以长时间维持微米量级的空间光调制器和电荷耦合器件像素之间的精确对准,微小错位就可能导致数据文件不可修复^[2]。此外,由于是临界采样,抗信号混叠能力弱。

2) 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。它相对于第一方案降低了对成像光路的要求并能有效防止信号混叠,因此国际上被普遍采用^[1,3]。但由于成倍牺牲存储密度和数据传输速率,难以满足存储容量和速度不断

提高的要求。

上述两种方案中,第 1)种方案尽管有较大的难度,但由于充分利用了 CCD 摄像机每个像素的信息处理能力,而被看作目标方案。随之而来的空间光调制器与 CCD 像素精确地 1:1 匹配对准就成为了关键的问题。本文使用掩模板代替空间光调制器来研究体全息存储系统输入输出信号匹配关系,为实现低误码率大容量数据读出提供理论和实验基础。

2 基本原理和系统结构

图 1 所示为系统信号输入-输出部分,均匀入射空间光调制器输入面的平行光束经调制成为携带输入信号的物光,与参考光发生干涉形成全息光栅存储在傅里叶谱面前的 LiNbO_3 晶体中。用相应参考光照射记录的全息光栅,即可从电荷耦合器件读出复现图像。成像光路由空间光调制器(SLM)、傅里叶变换透镜 L_1 ($f_1 = 154.6 \text{ mm}$, $\phi_1 = 40 \text{ mm}$)、反傅里叶变换透镜 L_2 ($f_2 = 53.5 \text{ mm}$, $\phi_2 = 19 \text{ mm}$)和电荷耦合器件组成的 $4f$ 系统。精密调整 L_1 和 L_2 的焦距,保证空间光调制器上间距 $26 \mu\text{m}$ 的像素阵列缩小 $26/9$ 倍成像至电荷耦合器件上间距 $9 \mu\text{m}$ 的

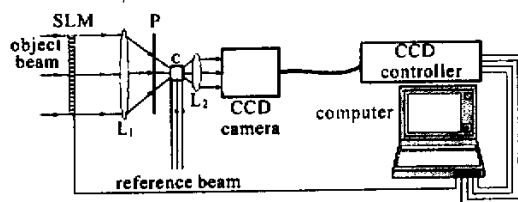


Fig. 1 Schematic of the signal input-output part of VHDSS.

P: waveplate; C: Fe:LiNbO_3 crystal

* 863-307、863-2-5 和 973(G199903301)资助课题。

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

收稿日期 2001-06-04; 收到修改稿日期 2001-08-10

像素阵列。二者分别固定在 5 维调整架上,实现输入-输出像素相对位置的微动调节。物光光束大小应完全照明空间光调制器上 1000×1000 像素(每个像素 $26 \mu\text{m}$)阵列,其功率大小依电荷耦合器件的光敏性调整至线性工作区,由电荷耦合器件实拍后在计算机显示器上所列的每个像素点的灰度值判定是否合适。

3 使用掩模板代替空间光调制器的成像实验

用镀铬玻璃掩模板模拟空间光调制器,进行直接成像以验证实际存储系统能否实现物、像方像素阵列的一一匹配,为最终使用空间光调制器作为输入器件的匹配实验提供借鉴。相对于从空间光调制器输入图像,记录在晶体内,再从晶体复现全息图的过程,模拟实验排除了空间光调制器内在结构和工作原理引入的光学、电子误差和晶体固有光学缺陷引入的背景噪声,更利于探寻像素匹配调整规律和分析不同输入参数对成像质量的影响。

图 2(a)所示第一块掩模板用于分析不同空间光调制器像素填充因子对电荷耦合器件读出信号的影响。四象限分别对应不同填充因子的 512×512 像素棋盘格。

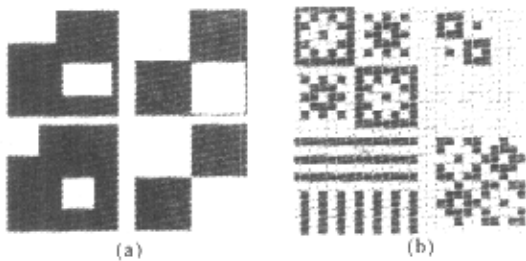


Fig. 2 Patterns of chrome-on-glass transmission masks. (a) Schematic of 1# mask ;(b) Schematic of 2# mask

图 2(b)所示第二块掩模板用于分析不同空间光调制器亮暗像素组合(填充因子 100%)导致的像素间串扰对电荷耦合器件再现图像误码率的影响。

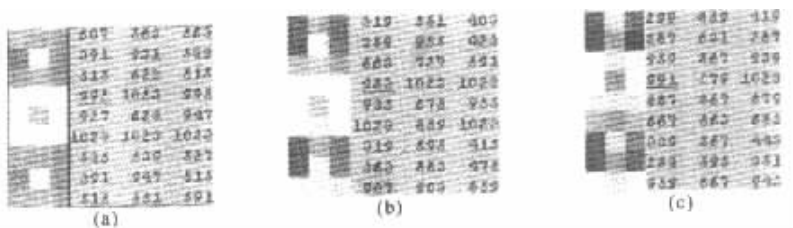


Fig. 3 Diagram of the pixel value changing processing for a special area resulting from y orientation modulation. (a) Original position ;(b) The 1st position ;(c) The 2nd position

四象限图案分别代表最恶劣情况的 9、13^[4]、17 像素组合和用来判定空间光调制器阵列与电荷耦合器件光敏元阵列之间方向一致性的单像素间隔的水平和垂直线对。

1) 机械调整装置性能校验

空间光调制器和电荷耦合器件相对位置调节灵敏度是全息存储系统输入-输出像素匹配的前提条件。根据数字图像处理中的 8 连通原则^[5],我们以第二块掩模板上 9 像素组图案为研究对象。掩模板上每个像素与电荷耦合器件每个像素精确对准时,输出像素值呈现 9 像素组合分布,即能够从输出图像中清晰辨别出各个像素组中心像素与边缘像素的灰度差,达到最佳匹配时梯度值最大,而当调节不到位而造成掩模板与电荷耦合器件相对位置从匹配状态漂离时,中心像素与边缘像素的灰度值差别缩小、均化甚至发生反转(错开整数倍像素间距)。根据这个准则,可以验证调节装置灵敏度。

显然,无论哪个方向的错位达到 0.5 个像素时,得到的结果最差,原本灰度值相差很大的两个像素会呈现相同的中间灰度,因此将容差范围设在 0.3 个像素以内。电荷耦合器件像素为 $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$,所以设定电荷耦合器件调节装置在 x 、 y 方向平移调节的最低灵敏度 $0.3 \times 9 = 2.7 \mu\text{m}$ 。根据这两个指标,继续确定 θ_x 、 θ_y 和 θ_z 三个转动自由度的最低灵敏度。经计算得: $\theta_x \leq 0.7017 \mu\text{rad}$, $\theta_y \leq 1.9770 \mu\text{rad}$, $\theta_z \leq 593 \mu\text{rad}$ 。

以 y 向调节为例描述匹配调整灵敏度的检测实验。在物像距关系符合 26:9 的缩放比、电荷耦合器件上获得掩模板清晰成像的前提下,不失一般性,任意选取一个 9×3 像素组区域(634, 441)-(636, 449)。微调 y 向螺杆,可以观察到亚像素位移导致的匹配-失配-再匹配的像素灰度值分布变化过程,如图 3 所示。

这说明我们采用的微调装置可以实现像素匹配所需的亚像素调节,即足够灵敏。

2) 掩模板匹配成像

根据前述匹配调节规律,我们在国内首次初步实现了掩模板与电荷耦合器件之间 1000×1000 像素阵列的一对一匹配(匹配精度达到 1.62766×10^{-5} ,即 1000 像素积累误差不超过 0.016 个像素),为 1 Mbit 大容量高保真数据页全息存储提供了必要的前提(如图 4)。在此基础上,我们研究了不同输入器件填充因子和原始图案对读出图像的影响。

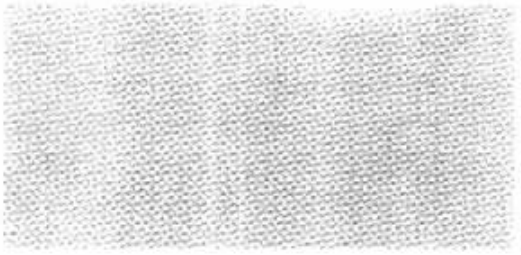


Fig. 4 A part of pixel-matched output image of the mask containing 1M pixels

首先明确两个概念：

i) 面填充因子 F_f :器件有效面积与总面积的比值^[61],常简称为填充因子。相应地,对于水平、竖直间距分别为 Δx 和 Δy ,有效透光宽度和高度分别为 δx 和 δy 的空间光调制器矩形像素,线性填充因子为^[61]

$$F_{fx} = \frac{\delta x}{\Delta x}, \quad F_{fy} = \frac{\delta y}{\Delta y}. \quad (1)$$

单个透光像素 (i, j) 在空间光调制器面上的场分布为

$$\text{rect}\left[\frac{x - i\Delta x}{\delta x}, \frac{y - j\Delta y}{\delta y}\right].$$

ii) 输出图像对比度 C :输入图像透光部分对应的输出像素灰度值期望和与输入图像不透光部分对应的输出像素灰度值期望之比^[61],

$$C = \frac{E(\sqrt{I_{on}})}{E(\sqrt{I_{off}})}. \quad (2)$$

图 5 所示为第一块掩模板上 4 种不同填充因子的棋盘格在电荷耦合器件上输出图像的一小部分及其对应的灰度值阵列和直方图。

理想情况下,空间光调制器填充因子为 100%,忽略随机噪声和确定性波动,物方所有透光像素应具有相同的探测强度,输出图像直方图为两个相距很远的脉冲尖峰(左侧对应不透光像素集合的暗峰与右侧对应透光像素集合的亮峰)。实际系统由于输入光场不均匀造成的背景亮度波动、光学元件引入的光学噪声和探测器噪声,得到的输出图像直方

图不可能呈现两个严格的脉冲尖峰,如图 5。这里,由于电荷耦合器件奇偶行在相同增益下对相同输入光强的响应(光敏度)不同,亮峰分裂成两个(在高填充因子情况下明显),通过调节电荷耦合器件奇偶行增益可使亮峰合二为一。

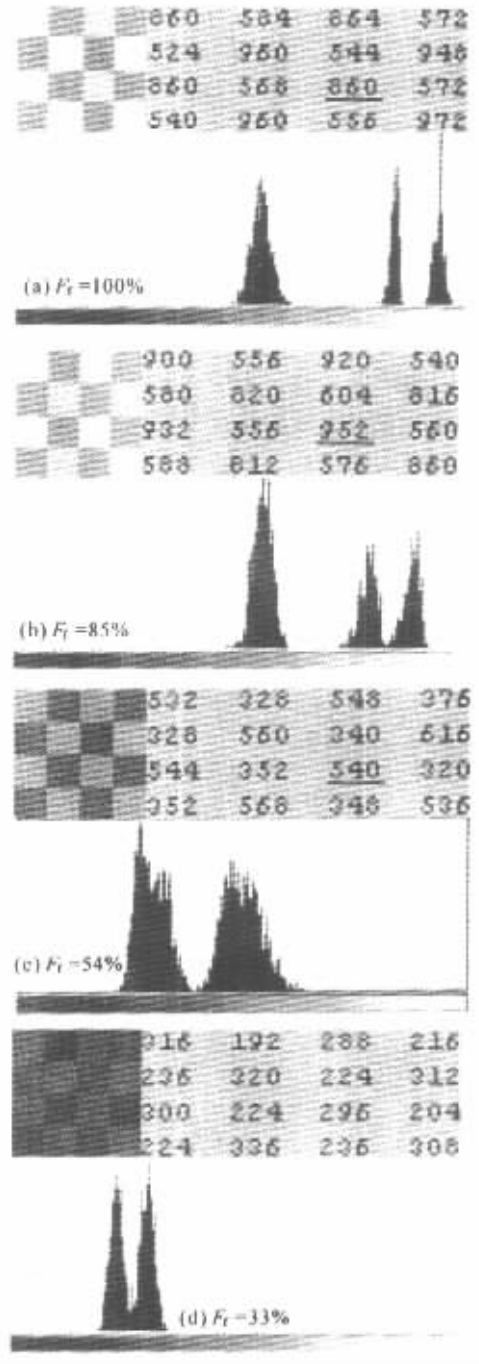


Fig. 5 Study on input fill-factor (imaging result of 1# mask). (a) $F_f = 100\%$; (b) $F_f = 85\%$; (c) $F_f = 54\%$; (d) $F_f = 33\%$

对于空间光调制器填充因子为 100% 的情况 [图 5(a)] 输出亮暗像素灰度差最大,亮、暗峰相距较远且分界明显,二值化取阈值不会引入误判。实

际的空间光调制器,由于电极本身不透明,有效透光面积必定小于总面积,因而填充因子必定小于100%。这种情况下,透光像素在物面上的场分布变窄,点扩散函数衰减加速,亮像素成像不可能达到理想的高灰度值,从而降低了输出图像的亮度和对比度。图5(b)对应填充因子为85%的情况,其成像结果近似于理想情形,但亮峰和暗峰都在图5(a)的基础上有所展宽,间距缩小。图5(c)对应系统实际采用的空间光调制器填充因子为54%,此时亮暗峰已有轻微交叠,读出图像对比度明显下降,简单的取阈二值化易造成误判。图5(d)则充分证明了低空间光调制器填充因子情况下的像质恶化,亮暗像素的差别在视觉上已经很难分辨,灰度值阵列中相邻像素(亮暗)灰度值差大约在100/1023的数量级,直方图中亮暗峰严重交叠,非常不利于信号重建。此外,输入器件不透光部分的非完全阻光性和相邻透光像

素引入的串扰导致不透光像素的输出灰度值非零,这也造成输出图像对比度下降。

图6所示为第二块掩模板上4种不同像素组合的成像结果。由图6(a)可知此时掩模板和电荷耦合器件之间在水平和竖直方向都有较好的一致性,即输入、输出图像实现了匹配。直方图中暗峰和亮峰间距较大,特别是水平线对成像,由于掩模板上透光像素行恰巧与电荷耦合器件上光敏度较高的扫描行相对应,暗像素行对应电荷耦合器件上光敏度较低的扫描行,导致输出亮峰表现接近理想情形(在直方图中形成1023灰阶附近非常窄的冲击峰),而暗像素灰度值更低,即输出对比度相对提高。比较图6(b)图6(c)图6(d)分别对应的9、13和17像素组合成像结果,从直方图可以明显看出,随着像素组的扩大,亮、暗峰之间的分界逐渐模糊,这意味着二值化处理难度的增加和误码率的升高。

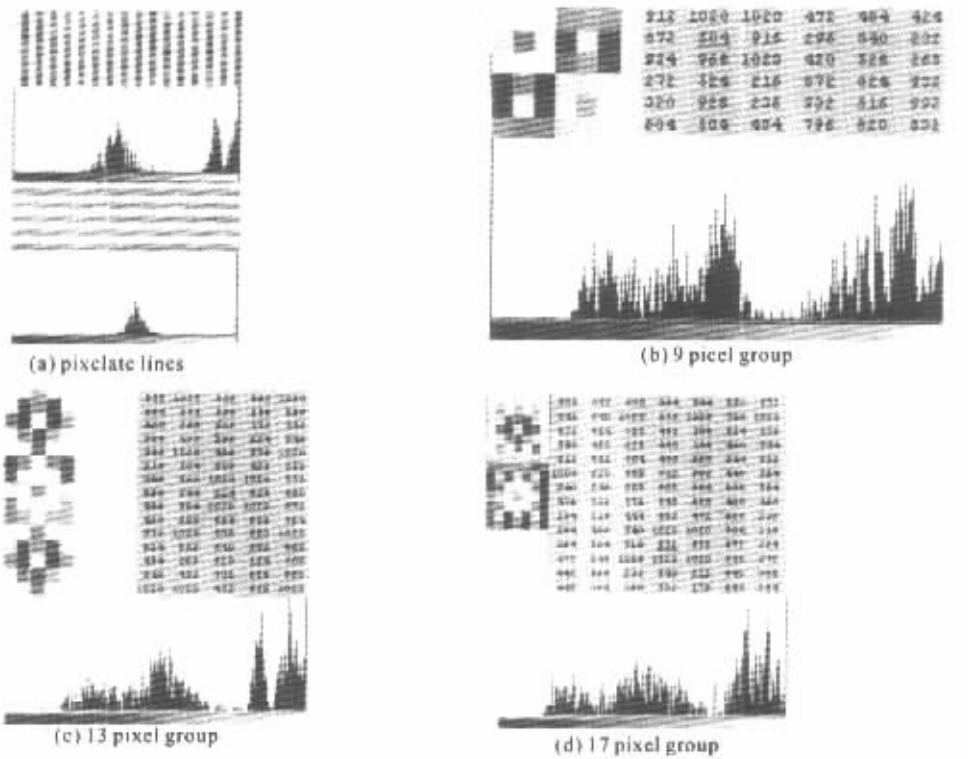


Fig. 6 Study on input pattern (imaging result of 2# mask)

结论 本文提出了一种利用掩模板模拟空间光调制器作为体全息存储系统信息输入器件来研究输入、输出信号匹配规律的方法,并基于此方法验证了输入、输出器件相对位置调整装置的灵敏度。用数字信号处理方法对实现1000×1000输入-输出像素匹配的掩模板成像结果进行了分析,研究了读出图

像对比度随输入器件像素填充因子减小而变化的规律。借助3种像素组合模拟最恶劣输入情形,并通过直方图分析了输出图像恶化过程,从而解释了输入图像像素组合与输出图像误码率的关系。为系统误码率统计工作创造了前提,为超高密度快速体全息存储中数据页容量的提升奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Burr G W , Ashley J. Modulation coding for pixel-matched holographic data storage. *Opt. Lett.* , 1997 , **22**(9) :639 ~ 641
- [2] Phua Cheng-Chiang , Liu Jingfeng. Neural network aided pixel alignment in digital holographic storage. *proc. SPIE* , 1999 , **3864** 309 ~ 311
- [3] Heanue J F , Bashaw M C , Hesselink L. Volume holographic storage and retrieval of digital data. *Science* , 1994 , **265**(5173) :749 ~ 752
- [4] Beinal M P , Burr G W , Coufal H *et al.*. Balancing interpixel cross talk and detector noise to optimize areal density in holographic storage systems. *Appl. Opt.* , 1998 , **37**(23) 5377 ~ 5385
- [5] Castleman K R. *Digital Image Processing*. Englewood Cliffs , N. J. : Prentice-Hall International , Inc. , 1996
- [6] Vadde V , Kumar B V K V. Channel modeling and estimation for intrapage equalization in pixel-matched volume holographic data storage. *Appl. Opt.* , 1999 , **38**(20) :4374 ~ 4386

Matching and Relationship Between Input and Output Signals in VHDSS

Shao Bing He Shurong Wu Minxian He Qingsheng Jin Guofan

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

(Received 4 June 2001 ; revised 10 August 2001)

Abstract : The influence of spatial relative positions between input device (spatial light modulator) and output device (charge coupled device) on the matching result of volume holographic data storage system (VHDSS) is analyzed , and the principle for testing the sensitivities of adjustors for signal input and output elements is summarized. Accordingly , the one to one pixel-matching between I/O arrays with chrome-on-glass transmission masks is realized. The effects of input device fill-factor (F_f) and input pattern combinations on readout images are investigated. All these work present theoretical and experimental bases for realizing record and retrieval of high capacity , low bit-error rate (BER) data pages in VHDSS.

Key words : holographic data storage ; spatial light modulator ; CCD ; pixel-matching ; chrome-on-glass transmission mask