

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0079-03

体全息存储页内串扰抑制的研究

黄雄斌, 何庆声, 商未雄, 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 体全息存储通常采用的 $4f$ 结构是一个有限带宽系统, 它引起像素间串扰, 带来误码率的增大。采用一种不损失存储容量的方法——均衡化的方法, 对串扰进行了补偿, 并通过实验验证了其效果。

关键词 体全息存储; 页内串扰; 均衡化; 误码率

中图分类号 TN26

文献标识码 A

Study of Intra-page Crosstalk Suppression in Volume Holographic Storage

HUANG Xiong-bin, HE Qing-sheng, SHANG Wei-xiong, JIN Guo-fan

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

Abstract The general 4-focal-length architecture of volume holographic storage is a bandwidth-limited system, which will cause inter-symbol interference and lead to the increase of the bit error rate. A method that doesn't reduce storage capacity—intra-page equalization to compensate the effect of the ISI is presented. Bit error rate results used by this equalization are also given.

Key words information optics; volume holographic storage; inter-page crosstalk; equalization, bit error rate

1 引言

体全息存储与其他存储技术相比, 具有容量大, 数据传输速率高和寻址时间短等方面的优势, 因而受到各国研究人员的重视, 并得到了飞速的发展。随着体全息存储密度的日益增大, 在保证一定的存储容量的同时, 如何提高信噪比, 降低误码率逐渐成为现阶段关注的焦点。而页内串扰是造成体全息信噪比恶化、误码率上升的主要原因之一, 同时也是限制存储容量的主要因素之一。页间串扰一般被称为 ISI(Inter-symbol interference), 它导致像素对相邻像素产生影响, 造成误码率上升。

以 $4f$ 存储系统为例(图 1), 由于系统是一个衍射受限体系, 在谱平面上的光阑使得部分高频分量丢失, 整个系统的点扩散函数(PSF)不再为 δ 函数, 像素之间就会产生串扰。CCD 接收到的图像对比度比输入原图大大降低, 造成读出数据大量错码。

在 SLM 与 CCD 完全匹配对准的情况下, ISI 与其他一些噪声(散粒噪声、电子噪声等)就成为单页

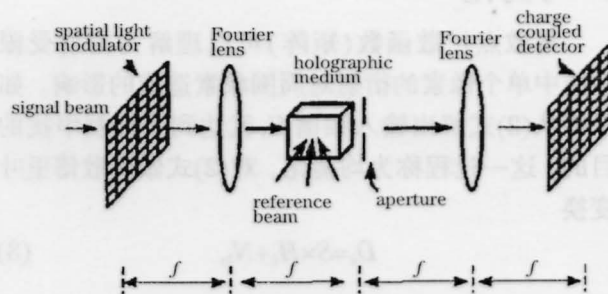


图 1 体全息存储 $4f$ 系统

Fig.1 $4f$ system of volume holographic storage

存储误码率恶化的主要原因, 因此对页内像素间的串扰的抑制是十分必要的。

2 信道模型

与一般信道不同, 体全息存储信道为非线性信道。SLM 调制输入光的幅度, 而 CCD 的输出与接收到的光强成正比。

因此, CCD 上第 (m, n) 像素上的光强可以表示为

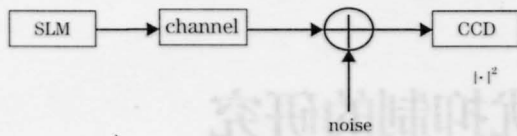


图2 信道模型

Fig.2 Channel model

$$I_{m,n} = \iint_{m,n} |S_{k,l} \otimes \text{PSF}(x,y) + n_{m,n}|^2 dx dy \quad (1)$$

$S_{k,l}$ 为 SLM 上 (k,l) 像素的振幅分布, \otimes 为卷积符号, $\text{PSF}(x,y)$ 为光学系统点扩散函数, 由光阑形状决定, $n_{m,n}$ 为噪声。整个积分在 (m,n) 像素区域上进行。

由于 SLM 调制后的输入只有亮、暗 (分别对应 1,0), CCD 输出为灰度值, 但经判别后也为 1,0, 且由于在 SLM, CCD 中单个像素内可以近似认为光场为均匀的, 可以对整个信道做离散化处理, 则(1)式变为

$$\sqrt{I_{m,n}} \approx s \otimes h_{m,n} + n_{m,n} \quad (2)$$

(2)式中所有变量均为离散化后的值, $\sqrt{I_{m,n}}$ 为 CCD (m,n) 象素上接收到的光强的开方。这样, 就得到一个线性的信道模型。按照线性系统的理论, $h_{m,n}$ 即为信道的离散点扩散函数(矩阵)。在 SLM, CCD, 透镜及光阑参数已知的情况下, 可以通过(1)式求得^[4]。

3 均衡化

离散点扩散函数(矩阵)可以理解衍射受限系统中单个像素的衍射对周围象素造成的影响。如果能从(2)式解出输入频谱 S , 就达到了抑制串扰的目的。这一过程称为均衡化。对(2)式做离散傅里叶变换

$$D_k = S \times H_k + N_k \quad (3)$$

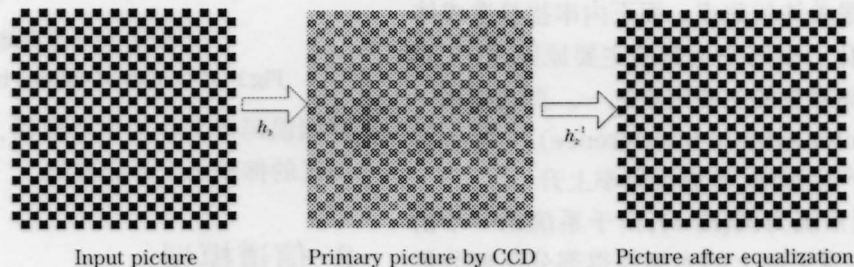


图3 均衡化过程示意图

Fig.3 Equalization process.

实验中输入图像是 200×200 的棋盘格图像, 计算得到误比特率结果如下

图像	原始图	均衡化后的图
误比特率	0.00935	0.000225

其中 D_k 是输出强度开平方的频谱, H_k 是点扩散函数的频谱。继续求解得到

$$D_k = S \times (H_k + N_k \times S^{-1}) = S \times H_k^{-1} \quad (4)$$

$$S = D_k \times H_k^{-1} \quad (5)$$

再由(5)式反傅里叶变换得到

$$s = \sqrt{I_k} \otimes h_k^{-1} \quad (6)$$

其中 h_k^{-1} 是 H_k^{-1} 的反傅里叶变换, 是已将噪声部分包含在内的点扩散函数矩阵。由(6)式可以看出, 均衡化过程实际上就是求反卷积核 h_k^{-1} 的过程。

4 实验结果

实验中 SLM(CRL 公司 XGA2 型电寻址薄膜晶体管驱动液晶显示器, 分辨率 1024×768), 光阑, CCD(PULNIX 公司 TM-1040 型渐进扫描行间传送黑白摄像机, 分辨率 1008×1018) 均放置在透镜的焦距处, 组成一个 $4f$ 系统。光阑孔径取 1.1 尼奎斯特宽度(Nyquist aperture width)^[4]。

实验中先测量系统点扩散函数: 输入单亮像素图像, 在 CCD 上接收, 这样得到的是以该亮像素为中心的衍射图样。取以亮像素为中心的 3×3 范围, 将得到的图像各点灰度开平方, 得到离散化的二维点扩散函数矩阵如下

0.072	0.115	0.072
0.115	0.253	0.115
0.072	0.115	0.072

采用上述均衡化方法对输入的棋盘格图像的输出进行处理, 得到结果如图 3。

同时, 由于实验测得的点扩散函数包括了噪声、视场非等晕等非线性因素, 因此不同区域内的点扩散函数矩阵应该不同, 因此在实际中应采用分块均衡化的方法。将输入分为 16 个区域, 分别采用

16个区域中中心点的点扩散函数矩阵作为卷积核。

比度效果。

5 结论

实验结果表明,均衡化方法有效弥补了页内象素间串扰带来的误码率恶化,误码率降低一个数量级。从计算机图像处理角度来看,上述均衡化方法实际上是一种锐化方法。但与简单的锐化方法不同的是:这种方法能根据具体系统的参数,准确地找出最适合该系统的锐化算子,以达到最好的增强对

参 考 文 献

- 1 Venkatesh Vadde, B. V. K. Vijaya Kumar. Channel modeling and estimation for intrapage equalization in pixel-matched volume holographic data storage[J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38:(20):4374-4386
- 2 M-P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal *et al.*. Balancing interpixel cross talk and detector noise to optimize areal density in holographic storage systems [J]. *Appl. Opt.*,1998, 37(23): 5377-5385

Numeric Simulation and Analysis of MTF in TDI-CCD Push-sweeping Imaging

YAN Chang-xiang, WANG Jia-qi

(Space Optics Department, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract: TDI-CCD is a special photo sensor that is widely applied in aerospace remote sensing. Analyzing the MTF of TDI-CCD will be helpful to study and apply it. This paper aimed at the conclusion about the MTF of TDI-CCD push-sweeping imaging, doing the numeric simulation. The analysis covered the conclusion in the literature. Two examples, that MTF and Mean-MTF, respectively, were compared with that the calculation of MTF in TDI-CCD push-sweeping imaging will be more clearly.

Key words: information optics; TDI-CCD; simulation; MTF

的部介组要函数参数等。本文在推导出 TDI-CCD 成像模型的基础上,推导出 TDI-CCD 的 MTF 表达式,并进一步推导出 TDI-CCD 的 Mean-MTF 表达式。最后,本文对 TDI-CCD 的 MTF 和 Mean-MTF 进行了数值模拟,并与文献中的结论进行了对比,验证了本文结论的正确性。

2 模型的建立及计算方法

图 1 所示为 TDI-CCD 的成像模型。假设 TDI-CCD 的像素大小为 a , 扫描速度为 v , 则 TDI-CCD 的 MTF 表达式为:

$$H(f) = \frac{1}{2} [1 + \cos(2\pi f a v)] \quad (1)$$

其中, f 为空间频率, a 为像素大小, v 为扫描速度。

由于 TDI-CCD 器件采用推扫式扫描方式,其在时间轴上的扫描速度为 v , 因此在空间轴上的扫描速度为 v 。本文主要研究 TDI-CCD 器件的 MTF 特性,因此假设扫描速度 v 为常数。由式 (1) 可知, TDI-CCD 的 MTF 表达式为一个余弦函数,其周期为 $1/(2av)$ 。在推扫式扫描条件下, TDI-CCD 的 MTF 表达式与 CCD 的 MTF 表达式有所不同。CCD 的 MTF 表达式为一个 sinc 函数,其周期为 $1/a$ 。因此, TDI-CCD 的 MTF 表达式比 CCD 的 MTF 表达式具有更宽的带宽。本文通过数值模拟,验证了 TDI-CCD 的 MTF 表达式比 CCD 的 MTF 表达式具有更宽的带宽。图 2 所示为 TDI-CCD 和 CCD 的 MTF 特性对比图。从图中可以看出, TDI-CCD 的 MTF 特性比 CCD 的 MTF 特性具有更宽的带宽。