

体全息存储图像的信噪比研究

唐 斌^{1,2} 陶世荃³ 杨兴昌³ 沈兰荪¹

¹ 北京工业大学电子工程系 北京 100022;

² 中国科技大学电子工程与信息科学系 合肥 230026; ³ 北京工业大学应用物理系 北京 100022

提要 根据全息存储二值图像的特性,提出了评价重构图像信噪比的方法,并对掺铁铌酸锂晶体中角度复用全息存储图像的信噪比作了详尽的定量研究,包括存储过程中图像信噪比的动态演变,以及页内和页间串扰对重构图像信噪比的影响。测量结果表明,串扰噪声引起的信噪比下降趋势与理论分析一致,图像信噪比的恶化主要是由于相干光学噪声和测量仪器的噪声;实验结果还表明即使在较小的衍射效率下也可获得较好的存储图像信噪比,从而为存储容量和图像质量之间的最佳均衡创造了条件。

关键词 体全息存储, 图像信噪比, 衍射效率, 串扰噪声

1 引 言

随着信息技术的高速发展,人们所需处理和保存的数据量急剧增加,高速、大容量的存储器件成为各国科学家争相研究的目标。将数据编排成页面(即图像)的形式,利用相干光干涉将数据页存储在记录介质中的体全息存储技术,由于具有很高的存储密度和很快的读取速度,因而最有希望成为下一代的数据存储方法^[1,2]。

体全息存储再现图像的信噪比(SNR)是评价存储器性能的重要指标。目前对存储图像信噪比的研究报道中,由于采取了不同的测量方法和仪器,存储单幅图像的信噪比测量结果从 $5250^{[3]}$ 到 $4.5^{[4]}$ 不等。能够较客观地反映存储图像质量的信噪比值究竟是多少,使用常规 CCD 作为图像探测器件能否达到满意的信噪比,这都是体全息存储技术实用化的关键。文中首先叙述了测量体全息存储二值图像信噪比的方法,并分析了影响体全息存储图像信噪比的原因,然后详细介绍了体全息图像信噪比的实验研究,给出了存储过程中的信噪比演变以及存在页内串扰和页间串扰情况下的信噪比特性。最后对体全息存储系统中使用常规 CCD 器件的可行性进行了讨论。

2 体全息存储图像的信噪比分析

2.1 信噪比定义

体全息存储二值图像的噪声会影响再现图像的重构误码率,而信噪比反映了图像中噪声量的大小,因而常被用来评价全息存储二值图像的质量。

由于二值再现图像中的白像素和黑像素的重构是由选择合适的阈值来进行的,只有白像素和黑像素的强度差 ($I_1 - I_0$) 和相对于信号的扰动强度即方差才是影响二值图像重构的因素,因而存储图像信噪比的描述形式为^[5]

$$\text{SNR} = \frac{I_1 - \zeta}{\sigma_1} = \frac{\zeta - I_0}{\sigma_0} = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (1)$$

式中, σ_1 和 σ_0 分别为亮像元和暗像元光强的方差, $\zeta = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_0 + \sigma_1}$ 为最佳阈值,它使得重构图像误码率最小,由于(1)式是在选择最佳阈值使得重构误码率最小时对图像信噪比的描述,因而它对再现图像质量的描述较客观。

2.2 页内串扰噪声

存储傅里叶全息图时,全息图的有限尺寸必然会丢失存储图像的高频分量,导致再现图像像元边缘模糊,影响同一数据页中的其他像元,产生页内串扰噪声。假设一页中有 N^2 个像元,且探测器的像素尺寸小于再现像元的主瓣宽度,则存储图像中坐标原点处(0,0)像元的信号强度 U_0 和所有其他 $N^2 - 1$ 个像元对(0,0)像元的串扰噪声 U_n 可分别表示为^[6]

$$U_0 = A_0 \cdot D^2 \int \text{sinc} \left[\frac{D}{2\mathcal{M}} x \right] \text{rect} \left[\frac{x}{\delta} \right] dx \int \text{sinc} \left[\frac{D}{2\mathcal{M}} y \right] \text{rect} \left[\frac{y}{\delta} \right] dy \quad (2)$$

$$U_n = \sum_{m=1, m \neq (0,0)}^{N^2} A_m \cdot D^2 \int \text{sinc} \left[\frac{D}{2\mathcal{M}} x \right] \text{rect} \left[\frac{x - m_x S}{\delta} \right] dx \int \text{sinc} \left[\frac{D}{2\mathcal{M}} y \right] \text{rect} \left[\frac{y - m_y S}{\delta} \right] dy \quad (3)$$

式中, D 为全息图直径, δ 为像元尺寸, S 为相邻像元的间距, m 为像元地址 m_x 和 m_y 的简写形式, A_m 为像元的状态(0或1), f 为傅里叶透镜的焦距, λ 为光波长。从(3)式可知,由于 sinc 函数以 $1/x$ 和 $1/y$ 的速率衰减,因此每个像元的页内串扰噪声主要由其邻近像元提供,与所存储图像的像元数目关系不大。

假设图像像元是亮暗相间的,并且它们的尺寸相等,即 $S = 2\delta$ 。利用(2)和(3)式进行数值计算,算得的信号与页内串扰噪声比值与像元尺寸的关系见图1所示。图1中随着像元尺寸的增大,图像的信噪比有振荡增大的趋势。我们知道,每个像元通过体全息存储系统后,再现的像均可近似看成主瓣宽度为 $2\mathcal{M}/D$ 的 sinc 函数分布的形式。因而当 $\delta = m \frac{\mathcal{M}}{D}$ (m 为正整数) 时,重构的每个像元都正好位于其他像元各级旁瓣的零点上,相互之间的串扰噪声最小,信噪比在每个振荡周期内获得了极大值;当 $\delta = \left[m + \frac{1}{2} \right] \frac{\mathcal{M}}{D}$ 时,重构的每个像元都正好位于其他像元各级旁瓣极大值所在的点上,相互之间的串扰噪声最大,对应信噪比振荡周期内的极小值。

2.3 页间串扰噪声

根据耦合波理论,体全息存储图像只有在满足布喇格条件时才能得到最大的衍射效率,偏离布喇格条件衍射效率下降很快,这种布喇格选择性成为体全息复用存储的依据。然而再现一幅图像时,虽然相邻的全息图偏离布喇格条件,但也会以较小的衍射效率同时再现,所有这些布喇格失配再现图像构成的串扰噪声即为页间串扰噪声。

按照耦合波理论推导出的反射型全息图衍射效率与布喇格失配的关系为^[7]

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1 - \left| \frac{\xi}{\nu} \right|^2}{(\text{sh} \sqrt{\nu^2 - \xi^2})^2}} \quad (4)$$

式中 ν 为光栅强度参量, ξ 为布喇格失配参量。在角度复用时, ξ 与偏离布喇格角的角度 $\Delta\Theta$ 成正

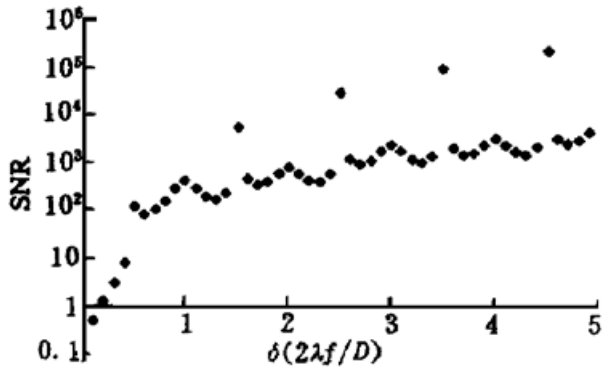


图 1 通过数值计算得出的页内串扰信噪比与图像像元尺寸的关系曲线

Fig. 1 The theoretical curve of SNR (the ratio of signal to intrapage cross-talk noise) as a function of the pixel size

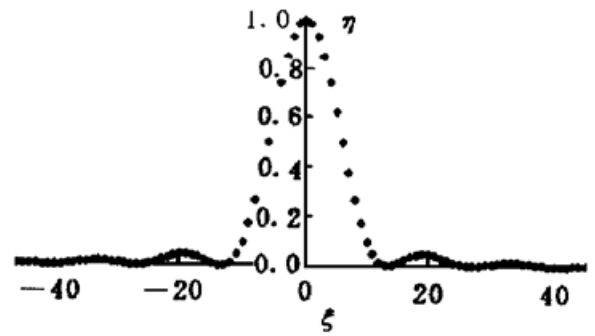


图 2 衍射效率 η 与布喇格失配量 ξ 的关系曲线

Fig. 2 The theoretical curve of the diffraction efficiency (η) as a function of Bragg mismatch (ξ)

比, (4) 式的衍射效率与布喇格失配量的关系曲线类似于 sinc 函数的形式, 见图 2。随着再现参考光角度偏离布喇格角, 衍射效率下降很快, 成减幅振荡型变化。亦即随着复用角度间隔的增大, 邻近存储图像的页间串扰减小, 可见页间串扰噪声主要是由复用存储时的邻近图像贡献的。

3 体全息存储图像信噪比的实验研究

3.1 实验装置

实验光路如图 3 所示, 从 He-Ne 激光器发出的激光束 ($\lambda = 633 \text{ nm}$) 被分束镜 BS_1 分为参考光和物光, 物光经过快门 k_1 和反射镜 M_1 后, 由 BE_1 进行空间滤波、扩束准直, 然后照明待存储物体 S (Newport 公司的 RES-1 型分辨率板, 光学密度标称值为 2.0), L_2 对原始图像进行傅里叶变换, 厚度为 3.0 mm 的存储晶体 H ($\text{Fe} \cdot \text{LiNbO}_3$) 位于 L_2 的后焦面附近; 参考光经过光快门 k_2 , 由扫描振镜 M_2 反射后再通过 L_4 和 L_5 组成的 $4f$ 系统照射到 H 上, 与原始图像的频谱干涉, 记录下图像的反射型傅里叶变换全息图。通过转动 M_2 可改变参考光在 H 上的入射角进行角度复用存储。记录时 k_1 和 k_2 均打开, 当用参考光再现时, 关闭 k_1 , 衍射光经过分束镜 BS_2 , 其中一束被 L_6 会聚到光功率计探头上, 检测衍射功率, 另一束通过成像透镜 L_3 在 CCD 上成像, 检测图像质量。实验使用 TK-S350 型面阵黑白 CCD。整个系统中, 包括 k_1, k_2, M_2 由计算机控制动作, CCD 和功率计信号也由计算机采集。

3.2 存储过程中图像信噪比随记录时间的变化

存储过程中 SNR 及衍射效率随曝光时间的动态关系见图 4。从图中可看出, 随着衍射效率的增大, 存储图像的信噪比也增大, 但增加到一定量后, 将不再随着衍射效率的增加而增加, 信噪比刚达到饱和时所对应的衍射效率约为 2×10^4 。亦即在小衍射效率下, 体全息存储图像仍能得到较好的信噪比。这说明, 在一定的衍射效率下, 体全息存储图像的信噪比与衍射效率无关。以下我们对再现图像信噪比的讨论都不考虑衍射效率的影响。

3.3 页内串扰噪声对体全息存储图像信噪比的影响

实验研究了页内串扰对体全息存储图像信噪比的影响。实验结果见表 1, 表中给出了没有

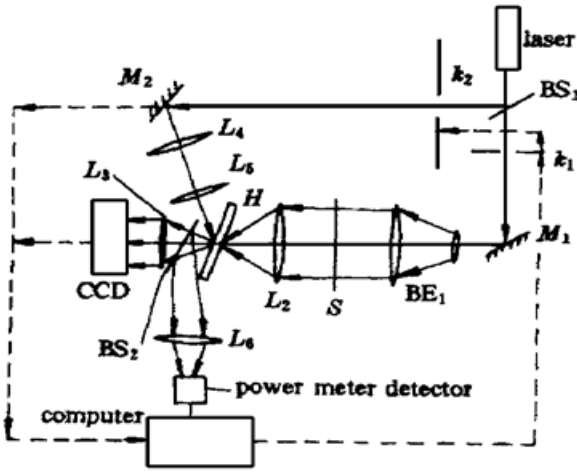


图3 研究体全息存储图像信噪比的实验光路图
Fig. 3 The schematic diagram of the experimental setup

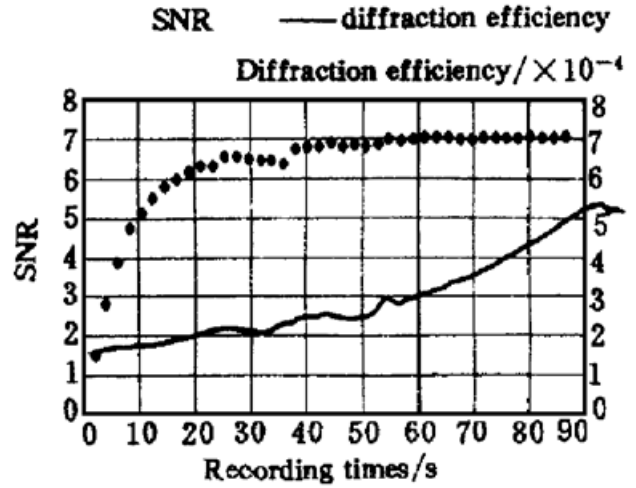


图4 图像信噪比和衍射效率与存储时间的关系
Fig. 4 SNR and diffraction efficiency η as a function of recording time

经过存储过程而直接通过光学系统所成的原始图像,以及存储后从晶体中再现图像的SNR变化。表1中的像元尺寸用相应的每毫米线对数表示,每毫米线对数越多,像元尺寸越小。并且再现图像中的每个像元用CCD中的多个像素采集。表1的SNR测量结果远低于图1的预期,但SNR随像元尺寸减小而减小的趋势仍很明显。由表中的数据可知,直接由光学系统所成的图像中,随着图像中像元尺寸的减小,其SNR下降,主要原因是成像孔径对高频的截止。对于存储后的再现图像,相应像元尺寸的SNR比光学系统直接成图像的SNR要小,因为全息图的有限尺寸进一步限制了图像的带宽,此外,噪声光栅以及记录光束的高斯分布也会影响存储图像的SNR,因而随着图像的像元尺寸的减小,再现图像的SNR下降得更快。

表1 不同像元尺寸的单幅图像在存储前后SNR的变化

Table 1 The SNR of images with various pixel sizes before and after holographic recording (LP: Line Pairs/mm)

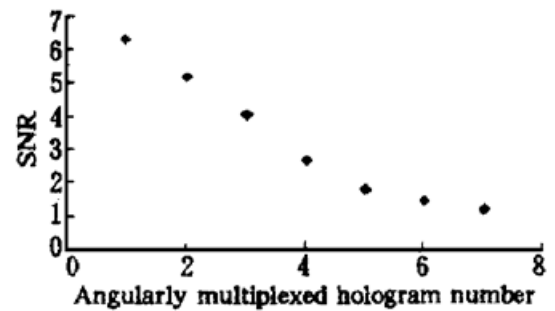
image	pixel size(LP)					
	SNR	1	2	4	8	12.7
original image		8.92	8.79	7.34	6.52	3.37
retrieved image		7.32	6.63	4.78	3.38	2.23

3.4 页间串扰噪声对体全息存储图像信噪比的影响

我们将最高衍射效率的1/10处的全角宽度定义为10 dB选择角,记为 $\Delta\Theta_{10\text{dB}}$ 。通过实验发现, $\Delta\Theta_{10\text{dB}}$ 是角度复用存储时,系统可以分辨所有存储图像衍射峰的最小角度间隔。在此角度间隔下研究了多重复用时的页间串扰噪声,方法是在每复用记录一幅图像后对第一幅图像的信噪比进行测量,实验结果见图5所示。从图中可看出:复用存储的图像数目越多,对满足布喇格角再现图像的页间串扰越大,再现图像信噪比越低,但随着复用数目的增多,角度偏离越大的存储图像所贡献的串扰噪声越小。图5中的信噪比数据是在所允许的最小复用角度间隔处得到的,随着复用角度间隔的增大,页间串扰噪声减小,存储图像的信噪比会比图5中给出的值高,但降低了存储容量,所以选择的复用角度间隔和存储容量需要折衷考虑。

图 5 角度复用存储多幅图像时, 图像的信噪比与存储图像的数目的关系曲线

Fig. 5 SNR of the first retrieved image versus the number of angularly multiplexed holograms



4 结 论

根据二值存储图像的性质和常规 CCD 的特性提出了能够较客观地描述存储图像质量的信噪比计算方法。并利用此方法定量研究了全息再现图像的信噪比特性。

对存储图像的页内串扰噪声与图像像元尺寸的关系进行了数值计算, 表明随着图像像元尺寸的增大, 存储图像的信噪比总体呈增大的趋势, 实验测量结果与理论分析一致。

针对页间串扰问题, 实验确定了角度复用可以接受的最小角度间隔为 10 dB 全角宽, 并研究了在此角度间隔下, 页间串扰噪声与角度复用数目的关系。

定量研究了存储过程中再现图像信噪比的动态演变。实验表明, 随着记录时间的增加, 信噪比与衍射效率都增大, 但在存储初期, 信噪比的增长速度比衍射效率高, 并迅速达到饱和。因此即使在较小的衍射效率下也能获得较好的存储图像信噪比, 从图像质量的角度看, 不必追求过高的衍射效率; 从而为存储容量和图像质量之间的最佳均衡创造了条件。

存储单个数据页, 像素尺寸为 $62 \mu\text{m} \times 62 \mu\text{m}$, 全息图直径为 1.5 mm 时, 使用常规 CCD 探测器件测量的信噪比可得 3.38, 与文献[4]报道的结果较接近, 这说明了使用常规 CCD 作为体全息存储的探测器件是可行的。根据信噪比测量确定的最佳衍射效率 (2×10^{-4}) 及实验中的其他参数, 可估算出系统可以达到的存储容量为 $3.8 \text{ Gbits}/\text{cm}^3$ 。对系统的进一步改进和优化将相应地提高存储器的容量和性能。

致谢 作者感谢江竹青、袁泉在实验工作中的帮助。

参 考 文 献

- 1 Claire Gu, John Hong, Ian McMichael *et al.*. Cross-talk-limited storage capacity of volume holographic memory. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1992, **9**(11): 1978~ 1983
- 2 Scott Campbell, Pochi Yeh. Sparse-wavelength angle-multiplexed volume holographic memory system: analysis and advances. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(14): 2380~ 2388
- 3 Fai Mok, Demetri Psaltis, Geoffrey Burr. Spatially- and angle-multiplexed holographic random access memory. *Proc. SPIE*, 1992, **1773**: 334~ 345
- 4 Allen Pu, Demetri Psaltis. High-density recording in photopolymer-based holographic three-dimensional disks. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(14): 2389~ 2398
- 5 Gregory P. Nordin, Praveen Asthana. Effects of cross talk on fidelity in page-oriented volume holographic optical data storage. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(18): 1553~ 1555
- 6 Xianmin Yi, Pochi Yeh, Claire Gu. Statistical analysis of cross-talk noise and storage capacity in volume holographic memory. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(19): 1580~ 1582
- 7 H. Kogelink. Coupled wave theory for thick holograms gratings. *The Bell System Technical Journal*, 1969, **48**(9): 2909~ 2947

Study on Signal-to-noise Ratio of Images Retrieved from Volume Holographic Memories

Tang Bin^{1,2} Tao Shiquan³ Yang Xingchang³ Shen Lansun¹

¹*Electrical Engineering Department, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022*

²*Electrical Engineering & Information Department, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*

³*Applied Physics Department, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022*

Abstract A method for estimating the signal-noise-ratio (SNR) of digital images retrieved from volume holographic memories stored in $\text{Fe} \cdot \text{LiNbO}_3$ crystals is proposed in this paper, which is applicable to the image detection array (CCD) of entertainment quality. Based on this method the dynamic development of the image SNR during recording is measured for the first time to our knowledge. The degradation of SNR due to both intra-page and interpage cross-talk noises is quantitatively studied in detail. The experimental results show the same descending trend on SNR as the result from a theoretical analysis. The degradation of the SNR is mainly caused by the optical noises in optical systems and the electrical noises in the measuring instrument. The experimental results also show that images can be retrieved with satisfactory SNR even the diffraction efficiency is very low. Therefore, an optimal compromise between the storage capacity and the retrieved image quality is possible.

Key words volume holographic storage, signal-to-noise ratio (SNR), diffraction efficiency, cross-talk noise