

# 全息存储中的纠错码研究综述\*

于勤<sup>1</sup>, 吴非<sup>1</sup>, 张猛<sup>2</sup>, 谢长生<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学计算机科学与技术学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 大数据时代对于高密度大容量的存储技术需求与日俱增。与传统存储技术的按位记录方式不同, 全息存储以二维数据页为读写单位, 采用三维体存储模式, 凭借存储密度高、数据转换速率快、节能安全以及超长期保存等优势, 成为海量冷数据存储的有力竞争者。重点介绍了相位调制的同轴全息存储, 分析了目前面向全息存储的纠错码研究现状, 并详细介绍了一种参考光辅助的低密度奇偶校验 LDPC 码优化方案。

**关键词:** 全息存储; 相位调制; 可靠性; 纠错码; 低密度奇偶校验码

**中图分类号:** O436

**文献标志码:** A

**doi:** 10. 3969/j. issn. 1007-130X. 2024. 04. 001

## A survey of error correction codes in holographic storage

YU Qin<sup>1</sup>, Wu Fei<sup>1</sup>, ZHANG Meng<sup>2</sup>, XIE Chang-sheng<sup>1</sup>

(1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;  
2. School of Computer Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In the era of big data, the demand for high-density and large-capacity storage technology is increasing day by day. Unlike traditional storage technologies that record data bit by bit, holographic storage uses two-dimensional data pages as the unit for reading and writing, adopting a three-dimensional volume storage mode. With advantages such as high storage density, fast data conversion rate, energy efficiency, safety, and ultra-long-term preservation, holographic storage is expected to become the strong competitor for mass cold data storage. This paper focuses on phase-modulated collinear holographic storage and analyzes the current research status of error correction codes for holographic storage. A detailed introduction is provided to an reference beam-assisted low-density parity-check (LDPC) code scheme.

**Key words:** holographic storage; phase modulation; reliability; error correction code; low-density parity-check code

## 1 引言

随着 5G、物联网和人工智能等新一代信息技术的快速发展, 全球产生的数据量呈爆炸式增长。在海量的数据中, 并非所有的数据都会被频繁访问。根据访问频率由高至低, 可以将数据分为热数据、温数据和冷数据。存储在数据中心的大部分数

据是冷数据。如何长期、安全和节能地存储海量冷数据是网络信息产业领域面临的难题。

当前主流的存储技术主要有以磁盘为主的磁存储技术, 以闪存为代表的电存储技术和以光盘为代表的光存储技术<sup>[1-3]</sup>。与其他存储方式相比, 光存储具有节能、长期保存以及成本低廉等优点, 符合当下绿色节能的主题。传统光盘采用按位存储的二维面存储方式, 利用激光在光盘表面的记录点是否发

\* 收稿日期: 2023-10-26; 修回日期: 2023-12-24

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0701800, 2022YFB2804300)

通信作者: 吴非(wufei@hust.edu.cn)

通信地址: 430074 湖北省武汉市华中科技大学武汉光电国家研究中心

Address: Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, P. R. China

生反射来实现 0 或 1 的二进制数据读取,其提高记录密度的方法是靠缩小记录点的尺寸实现的,主要有 2 种途径:(1)采用更小的记录光波长;(2)增大记录物镜的数值孔径。目前蓝光记录光波长已接近不可见光的范围,而数值孔径增大会引起记录信息失真的问题。另外,由于远场记录下光学系统的锐利衍射极限的存在,进一步提升传统光盘的存储密度面临严峻的挑战<sup>[4]</sup>。以多维光存储、超分辨光存储和全息光存储为代表的新型光存储技术,具有较高的理论存储容量和存储密度,未来可能在云计算、数据中心和大数据分析等领域得到应用<sup>[5,6]</sup>。全息存储以二维数据页作为读写单位,采用并行读写的方式,并通过借助多种复用技术,存储密度可达  $10^{12}$  bit/cm<sup>3</sup>,数据转换速率可到 10 GB/s<sup>[7-11]</sup>。全息存储有潜力成为现有存储介质的补充方案,尤其是在需要高容量和快速存取的应用场景中,全息存储将会表现出优异的性能和容量优势。

## 2 全息存储系统

与传统光盘的单光束记录方式不同,全息存储采用参考光和信号光双光束来记录数据。根据参考光与信号光是否共轴,可以将全息存储划分为离轴全息存储和同轴全息存储。离轴全息存储系统结构相对复杂,采用角度复用和静态读写模式,会带来记录介质的部分浪费。同轴全息存储系统结构紧凑,采用位移复用和动态读写模式,记录介质浪费空间少;而且同轴全息存储能和现有的伺服系统匹配,具有更强的兼容性和抗震动性,是全息存储实用化和产品化的重要研究方向<sup>[12]</sup>。

数据在送至信道传输之前,需要经过纠错编码器和调制编码器。纠错编码的作用是保证数据在记录或信道中传输的可靠性。调制编码对信号进行转换以匹配物理记录介质的特性,性能优异的调制方式不仅能够提升数据存储密度,还能抵抗信道中噪声的干扰。根据调制方式的不同,可以将全息存储系统分为振幅型全息存储与相位型全息存储。振幅型调制编码效率较低,难以突破 1 的限制,浪费了部分光学信息,无法完全发挥全息存储高密度的优势。相位型编码能够有效地提高编码率,对于  $M$  阶相位调制编码而言,每个相位符号表示  $\lg M$  比特,4 阶相位型编码的编码率为 2,进一步提高了全息存储密度和容量。

相位调制的阶数越高,每个相位符号表示的比特数目越多,存储密度越高,但是各存储单元状态

之间的间距也会越小,抵抗噪声的能力越弱。图 1 展示了相位型同轴全息存储系统的记录、读取和重建过程。针对相位型同轴全息存储系统已有多种相位调制方法被提出<sup>[13-15]</sup>。这些编码方式虽然能在一定程度上提升编码效率,但是编码率仍然较低,且解码方式相对复杂且不稳定。另外,相位型全息存储系统目前还面临数据读取过程中需进行相位重建这一严峻挑战。根据相位恢复方法中是否包含干涉操作,可以将相位重建方法分为干涉法<sup>[16-21]</sup>和非干涉法<sup>[22-24]</sup>。由于干涉强度易受到环境干扰,导致系统不稳定,因此非干涉法是相位重建的理想选择。迭代傅里叶变换 IFT(Iterative Fourier Transform)算法是一种无干涉相位恢复方法,该方法的光路系统简单,相位重建结果稳定,提高了相位重建的精度和速度<sup>[25]</sup>,IFT 算法是一种误差逼近算法,重建相位与原始记录相位存在些许偏差。由于重建算法的限制以及信道中多种复杂噪声的干扰<sup>[26]</sup>,相位型全息存储系统需要采用具有强纠错能力的纠错码 ECC(Error Correction Code)以保证数据可靠性。

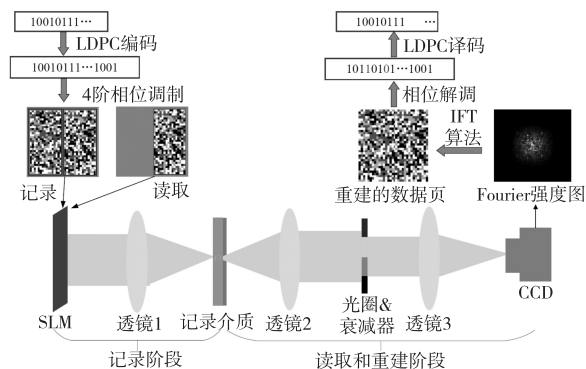


Figure 1 Recording, reading and reconstruction processes of holographic storage system

图 1 相位型同轴全息存储系统的记录、读取和重建过程

## 3 全息存储中的纠错码研究现状

ECC 通过在纠错编码时增加冗余校验数据,建立信息数据与校验数据之间的互相制约关系并用于译码纠错,使误码率 BER(Bit Error Rate)降低到可接受的水平,从而提高存储系统的可靠性<sup>[27,28]</sup>。BER 定义为一个码字经过 ECC 纠正后的比特错误数与该码字长度之比。虽然从存储系统获取的原始数据可能包含较多的错误比特,但通过有效地设计 ECC 可以确保以可容忍的较低错误级别提供给用户。目前应用于全息存储系统的纠错码有多种,其中 LDPC(Low-Density Parity-

Check)码应用最为广泛,主要原因是 LDPC 码适合于全息存储系统纠错,不仅是因为 LDPC 码接近香农极限的纠错性能和可并行的译码方式,而且信道/数据页中噪声分布的先验信息可以用来辅助设计具有强纠错能力的 LDPC 码。目前关于全息存储的纠错码研究主要包括以下几个方面。

### 3.1 二维/三维 ECC 技术

与磁记录或传统的光存储通道不同,全息数据存储通道具有三维结构,因为它在空间上是二维数组,在时间上是数据页流。与一维突发错误模式(本质上是一串连续的错误)不同,二维突发错误依赖于存储通道的特定几何形状的簇的形式出现。Imai<sup>[29]</sup>引入了二维循环码,用于纠正多次出现的单个突发错误。在不改变编码率或者最小距离的条件下,Blahut<sup>[30]</sup>提出了改进的二维 BCH (Bose、Ray-Chaudhuri 与 Hocquenghem)码。Madhusudhana 等<sup>[31]</sup>对文献[30]的二维 BCH 码译码算法进行了扩展,用于突发纠错,该方案能够纠正特定形状的突发错误,但不能处理多重不相交的突发错误。Roy 等<sup>[32]</sup>构建了原生二进制二维循环码,能够使用频域技术纠正多次出现的二维错误。该方案中的每个错误形状的起始位置都是使用一种基于公共零集的新型解码算法确定的,并且提出了一种通用的编码结构。与传统的二维 BCH 码相比,其具有更高的编码率。里德-所罗门 RS (Reed-Solomon)码是最常见的纠错码之一,可以有效地纠正信道中的突发错误,并可以应用于不同的维度。针对全息数据存储信道,Hwang 等<sup>[33]</sup>提出了迭代纠错方案 RSVC (Reed-Solomon Volumetric Code),通过 2 个连续的编码器(Product ECC 和 Page ECC)对严重退化的数据页进行纠错。相比一维 RS 和二维 RS 码,RSVC 具有更好的误差控制性能。进一步,Hwang 等<sup>[34,35]</sup>利用压缩的 ECC 奇偶校验符号进行迭代译码,可以有效地进行纠错。实验结果显示,该方案具有与传统 ECC 相当的性能,但具有更高的编码率和较低的编码开销,实现了编码率与 ECC 性能之间的良好权衡。Gu 等<sup>[36]</sup>通过充分利用全息存储信道中误差模式的先验信息,提出了一种基于匹配交织的全息数据存储三维纠错方案。该方案结合了三维纠错方案和匹配交错方案的优点,使误差分布更加均匀,实现了数据的三维迭代译码,有效降低了 BER。基于空间耦合低密度奇偶校验 SC-LDPC (Spatially Coupled Low-Density Parity-Check)码的编码器具有

通用性,Ishii 等<sup>[37]</sup>讨论了 SC-LDPC 码对差分调制码的适用性以及再现数据的可纠错特性,实验结果显示,SC-LDPC 码纠错容忍度可达到 0.08。

### 3.2 与交织/均衡/检测技术相结合的 ECC 技术

由于成像光学器件的限制和对准偏差等因素造成的二维符号间干扰,会导致全息存储系统的信噪比 SNR (Signal-to-Noise Ratio)降低,BER 增加。一些有效的数据处理方案能够使存储的数据可靠地检索。数据预处理和数据后处理是常见的数据处理方法。交织编码将一个大面积的突发错误分散成随机错误,起到数据预处理的作用。均衡/检测能够降低符号间干扰的影响,是常见的数据后处理方法。将纠错码与交织/均衡/检测技术相结合能够获得更好的纠错性能。通过分析由透镜像差和准直误差引起的相关误差模式,并将其作为先验信息,Chou 等<sup>[38]</sup>提出了一种将二维交织码与 RS 纠错码相结合的方案,以降低二维错误,并从 BER 和存储容量 2 个角度分析了交织码和 ECC 的性能。Pansatiankul 等<sup>[39]</sup>提出了基于 RS 码的三维交织 ECC 方案,以提升性能和错误容忍度。Ramamoorthy 等<sup>[40]</sup>提出了一种结合 LDPC 码的二维最小均方误差 MMSE (Minimum Mean Squared Error)均衡方法,并研究了 LDPC 译码器在不同孔径大小和 SNR 下的译码性能。根据译码能力确定每个 SNR 下的最小孔径尺寸。在这些孔径下,采用与均衡结合的 LDPC 码在 12 次迭代后实现零错误率,而未使用均衡的 LDPC 码即使在 25 次迭代后仍会存在一些错误。Park 等<sup>[41]</sup>提出了一种全息数据存储通道迭代的 3/4 音控软编码方案,并采用信道迭代模拟了 LDPC 码的性能。当 BER 为  $10^{-7}$  时,经过一次信道迭代,其性能相比未经过信道迭代的 LDPC 码提高了 0.8 dB。基于二维软输出维特比算法 SOVA (Soft Output Viterbi Algorithm)的 BER 明显低于一维 Viterbi 检测算法的 BER, Kim 等<sup>[42]</sup>将 LDPC 码与二维 SOVA 检测输出相结合,应用于全息存储系统,能够显著降低 BER。通过将向量初始对数似然比 LLR (Log Likelihood Ratio)信息转换为比特 LLR, Kim 等<sup>[43]</sup>提出了一种将全息数据存储的二维 SOVA 和纠错调制码融合的迭代译码方法。这种迭代方法虽然增加了算法的复杂度,但在抵抗噪声方面表现出良好的性能。通过将 RS 译码器的附加信息与决策反馈相结合,Sütó 等<sup>[44]</sup>提出了一种基于二维页面访问光存储器中的数据检测技术,该技术降低了 BER 并将数据记录密度提高了



11%。通过将 RLL(Run-Length Limited)调制器和解调器作为纠错过程的一部分,Nakamura 等<sup>[45]</sup>提出将游程长度受限 RLL 调制码与 turbo 码相结合的 RLL-turbo 码。实验结果显示,RLL-turbo 码相比传统的 LDPC 码具有更高的纠错能力,且可以将数据密度提高 1.78 倍。

### 3.3 基于编码设计的优化方案

针对全息存储系统的特点,设计合适的纠错编码方案是提升可靠性的重要途径之一。全息信道中的串扰噪声使得重建数据页边缘的符号错误率高于中心位置的错误率,Garrett 等<sup>[46]</sup>提出了一种将原始的等效错误保护转换为不等效错误保护的编码算法,为页面中的所有信息位提供不同程度的保护。当原始误码率为  $10^{-5}$  到  $10^{-4}$  时,该方案能够将 BER 分别降低到  $10^{-14}$  和  $10^{-12}$ 。利用基于页面的全息存储器格式以及数据库记录的表格排列特性,Goertzen 等<sup>[47]</sup>提出了一种适用于体全息存储系统中关系数据库信息编码的 ECC,具有简单的解码硬件架构、较强的纠错能力以及较低的系统响应延迟等优点。针对页面间交叉干扰和边缘处噪声强的特征,Choi 等<sup>[48]</sup>提出一种具有前向滤波自适应决策反馈的混合纠错方案,用于消除二维数据采集过程中产生的符号间干扰。为解决 RS 译码器的硬件复杂性和数据处理速率问题,Wu 等<sup>[49]</sup>展示了用于体全息存储的 16 符号纠错(255, 223)RS 译码器结构的 VLSI 实现,设计了  $GF(2^8)$  快速乘法和流水线结构,数据处理速率可达 200 Mbit/s。针对 LDPC 码硬件实现复杂、开发周期长以及硬件性能要求高的问题,Zhang 等<sup>[50]</sup>利用高层次综合技术对 LDPC 译码算法进行硬件实现,通过分析不同因素下 LDPC 码的纠错性能,确定适合的译码器参数,以降低实现复杂度。

### 3.4 初始 LLR 信息优化

提高初始 LLR 信息的精度是提高 LDPC 译码性能的重要途径之一。Hayashi 等<sup>[51]</sup>提出了一种利用重建像素之间的亮度差异来计算 LLR 信息的方法,在 LDPC 译码器的性能和复杂度之间取得了良好的平衡。在信噪比为 12.5 dB,原始 BER 为  $1.3 \times 10^{-2}$  的情形下,LDPC 译码器完全校正了全息记录再现信号中的比特错误。Yoon 等<sup>[52]</sup>开发并评估了全息数据存储系统的位似然映射技术,利用中间译码步骤的反馈信息使 LLR 快速收敛到一个较大的值。通过额外的选择性概率部分补偿以降低迭代译码过程中由相邻像素带来的负面影

响,Chung 等<sup>[53]</sup>提出了一种改进的全息数据存储 LDPC 译码方案,提高了像素不对齐时的整体纠错性能。仿真结果表明,该方案优于传统的 LLR 置信传播算法。通过分析并利用相位解调特性识别可靠比特,Zhao 等<sup>[54]</sup>提出了一种可靠比特感知的 LDPC 码优化方法,为可靠比特分配更精确的初始 LLR 的权重,优化后的初始 LLR 能更准确地反映解调数据的可靠性,进而提升了译码纠错性能。Yu 等<sup>[55]</sup>利用重建的相位分布特征,提出了一种相位分布感知的 LDPC 码优化方案,通过施加多个相位检测阈值,提升了待纠正比特的初始 LLR 信息精确度,从而提高 LDPC 软判决译码的纠错能力。

综上所述,现有的 LDPC 码优化方案主要从多维纠错、与交织/均衡/检测技术相结合、编码方法优化以及初始 LLR 信息优化等方面开展研究,为提高全息存储可靠性提供重要技术支撑。提高初始 LLR 信息的精度相对于其他优化方式会更加易于实施,复杂度也相对较低,且能获得相当的甚至更高的译码纠错性能。然而,目前全息存储中的纠错码主要是面对振幅型全息存储的研究,缺少面向相位型全息存储纠错码的深入研究。下面详细介绍文献<sup>[56]</sup>提出的一种面向相位型同轴全息存储的参考光辅助的 LDPC 码 ReLDPC (Reference-beam assisted LDPC)优化方案。

全息存储系统在进行译码之前,首先需要利用信道信息获取初始 LLR 信息,其幅值反映了比特的可靠性,幅值精度影响 LDPC 码的译码性能<sup>[55]</sup>。利用参考光的信息在记录和读取的过程中总是已知的,将参考光作为先验信息优化初始 LLR 信息精度,进而提升全息存储的可靠性。在配置每个待纠正比特的 LLR 时,需要考虑极性和幅值。在比特极性正确的情况下,LLR 的幅值越大,可信度越高。在 LDPC 译码时,由于参考光所携带的数据(以下称为参考比特)在记录和读取的过程中都是已知的,因此参考比特的可信度远高于未知的信息比特和校验比特的可信度。首先确定极性,比特 1 的极性设定为“+”,比特 0 的极性设定为“-”;然后确定幅值。如图 2 所示,对于信息比特和校验比特,若为比特 0,则初始 LLR 为 -1;若为比特 1,则初始 LLR 为 +1。设定参考比特中的比特 0 的 LLR 为  $p$ ;参考比特 1 的 LLR 为  $m$  ( $p+m=0$ ,  $m>1$ ),其中  $m>1$  保证了参考比特的 LLR 幅值大于信息比特和校验比特 LLR 的幅值<sup>[56]</sup>。传统 LDPC 硬判决译码在进行比特信息量化时没有考

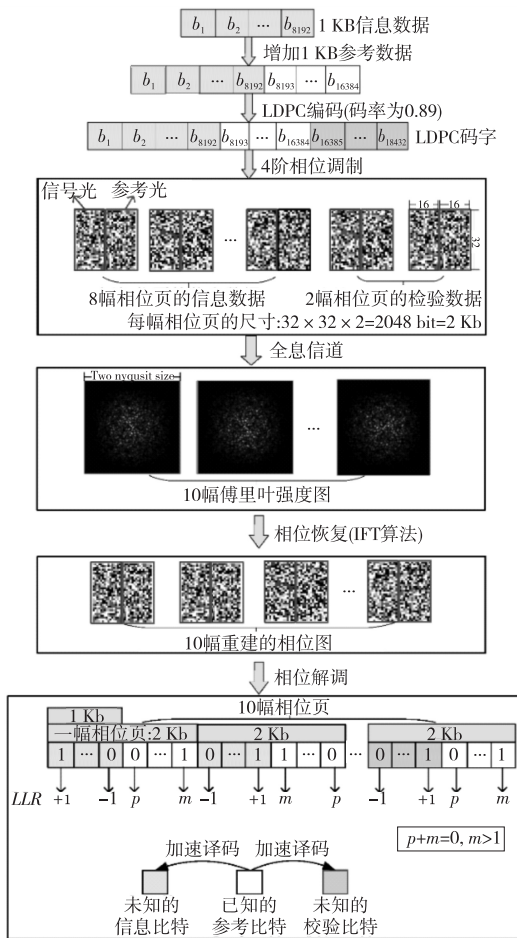


Figure 2 Reference beam-assisted LDPC coding optimization scheme

图2 参考光辅助的 LDPC 码优化方案

虑比特之间的可靠性差异,  $LLR$  精度较低, 导致译码延迟高<sup>[57]</sup>。ReLDPC 方案通过放大参考比特的  $LLR$  幅值, 提高  $LLR$  信息的精度, 进而提升 LDPC 译码纠错性能。该方法操作步骤如下:

**步骤 1** 信息比特连同相同数目的参考比特构成待编码的数据, 随后进行 LDPC 编码生成校验比特。信息比特、参考比特和校验比特一起构成 LDPC 码字。

**步骤 2** 生成的 LDPC 码字被调制成二维数据页。调制规则为  $00 \rightarrow 0, 01 \rightarrow \pi/2, 11 \rightarrow \pi, 10 \rightarrow 3\pi/2$ 。调制后的二维相位数据页左半部分为信息数据和校验数据, 右半部分为参考相位。

**步骤 3** 将调制后生成的二维相位数据页送入全息信道进行传输。在对数据进行读取时, 读取后的数据形式为互补金属氧化物半导体 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 传感器捕捉到的傅里叶强度图。利用 IFT 算法重建相位数据页, 重建后相位数据页的左半部分为未知的信息数据和校验数据, 右半部分为已知的参考数

据, 重建后的相位页包含一定数目的错误相位。

**步骤 4** 将重建后的二维相位数据页进行相位判决和解调。取相邻相位的中间值作为判决阈值, 解调规则如下:  $0 \rightarrow 00, \pi/2 \rightarrow 01, \pi \rightarrow 11, 3\pi/2 \rightarrow 10$ 。

**步骤 5** 获取待纠正比特的初始  $LLR$  信息。 $LLR$  获取规则如下: 当参考比特为 1 时, 初始  $LLR$  设为  $m$  ( $m > 1$ ); 当参考比特为 0 时, 初始  $LLR$  设为  $p$  ( $m + p = 0$ )。对于其他比特若为 1, 初始  $LLR$  设为  $+1$ , 否则设为  $-1$ 。

**步骤 6** 将获取的初始  $LLR$  信息送入 LDPC 最小和译码算法进行迭代译码<sup>[58,59]</sup>。

首先进行仿真实验以验证 ReLDPC 方案的有效性, 随机生成长度为 1 KB 的信息比特流和长度为 1 KB 的参考比特流, 组合成 2 KB 的数据进行 LDPC 编码 (码率为 0.89) 生成 0.25 KB 的冗余比特。码字长度为 18 432 个 bit, 之后被调制成 10 个二维相位数据页。每幅相位页的大小为  $32 \times 32 = 1024$ 。基于相位调制规则, 每幅相位页表示 2 048 个比特 ( $32 \times 32 \times 2 = 2048$ )。生成的 10 幅相位页中右半部分为参考相位, 前 8 幅相位页的左半部分为信息相位, 后 2 幅相位页的左半部分为冗余相位。所有的参考相位是随机生成的已知相位。将生成的 10 幅相位页送入全息信道, 每幅相位页被上载到空间光调制器 SLM (Spatial Light Modulator) 以生成信息光和参考光。为提高数据记录的准确性, 每幅相位数据用 SLM 上的  $2 \times 2$  个像素进行表示。在读取数据时, 数据以傅里叶强度图的形式被 CMOS 捕获, 并加入高斯随机噪声以模拟信道中的噪声<sup>[60,61]</sup>。当 CMOS 接收到傅里叶强度图时, 每幅傅里叶强度图的灰度值被标准化为  $0 \sim 255$ 。透镜焦距为 150 mm, 波长为 532 nm, SLM 像素尺寸为  $20 \mu\text{m}$ , CMOS 像素尺寸为  $5.86 \mu\text{m}$ , CMOS 的动态范围是 8 bit。利用接收到的强度图使用 IFT 算法对相位页进行重建。IFT 最大迭代次数设为 100, 迭代阈值设为  $5.0 \times 10^{-3}$ 。将重建后的相位进行判决并解调成一维的比特流进行 LDPC 译码, 参考比特的  $LLR$  设为  $p = -5, m = 5$ , 译码最大迭代次数设为 30 次。在每次迭代结束后, 分别统计了 BER、译码迭代次数和译码成功的概率。

统计了在不同 PER 下, 使用传统的 LDPC 码纠错方案和提出的 ReLDPC 方案分别对应的 BER、译码迭代次数和译码成功率的变化<sup>[56]</sup>, 如图 3 所示。传统 LDPC 码指的是未经优化的标准 LDPC 码。随着 PER 的增加, 使用提出的 ReLDPC 方案具有较少的译码迭代次数和较小的 BER。

与传统 LDPC 码纠错方案相比,如图 3a 所示,当  $PER$  为 0.027 5 时, $BER$  平均可降低 38.8%;如图 3b 所示,当  $PER$  为 0.019 时,ReLDPC 方案可减少约 14.8% 的译码迭代次数;如图 3c 所示,当  $PER$  为 0.019 时,ReLDPC 方案的译码成功率提高了约 38.4%。

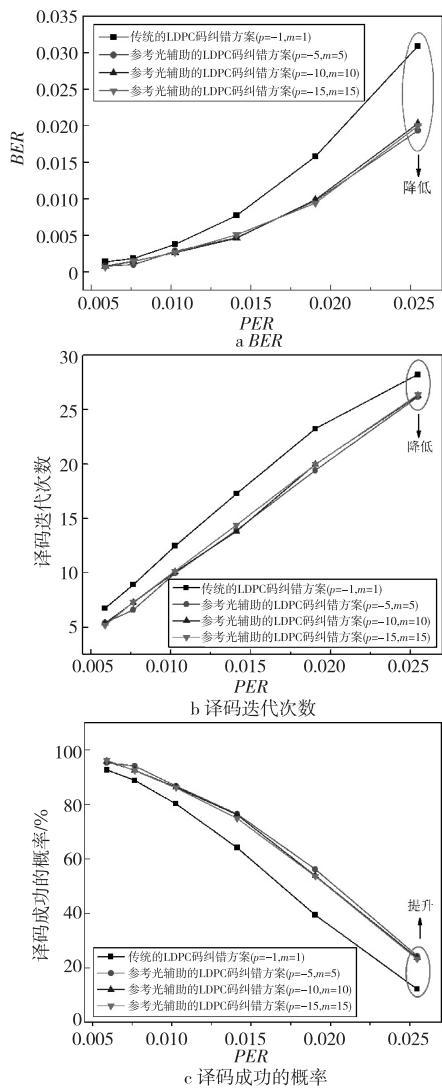


Figure 3 Variation of the number of decoding iterations and BER for different reference beam weights

图3 传统 LDPC 码纠错方案  
和 ReLDPC 方案在不同相位错误率  
 $PER$  下的  $BER$ 、译码迭代次数和译码成功的概率

图 4 展示了利用传统 LDPC 码纠错方案与 ReLDPC 方案纠错后的相位错误分布<sup>[56]</sup>。如图 4a 所示,当传统 LDPC 码的译码迭代次数达到所设定的译码迭代次数最大值 30 时, $PER$  为 0.019;如图 4b 所示,在译码迭代次数为 28 时, $PER$  为 0。与传统 LDPC 码纠错方案相比,ReLDPC 方案显著降低了  $PER$ ,减少了译码迭代次数,提高了相位型同轴全息存储系统的可靠性。

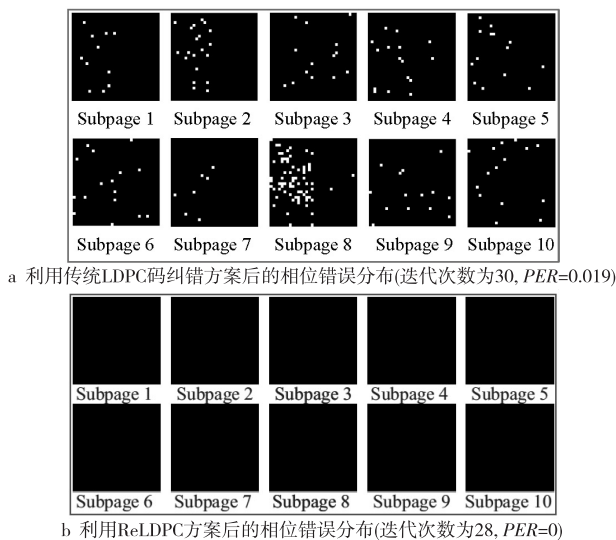


Figure 4 Phase error distribution of reconstructed phase pages

图4 重建相位数据页中的错误分布

接着,通过实验进一步验证 ReLDPC 方案的有效性。图 5 所示,展示了真实的全息存储光路<sup>[56]</sup>。从激光器发出的光经过激光扩束器 BE (Beam Expander) 进行扩束。 $P$  是产生线偏振光的线性偏振器。使用 2 个相同矩形窗口形状的方形孔径  $A$ , 左边和右边的窗口分别表示信息光和参考光。采用半波片 HWP (Half-Wave Plate) 调节光的偏振状态以满足 SLM 的要求。分束器 BS (Beam Splitter) 将一个波束分成 2 个或多个波束。相位数据页被上载到 SLM 以产生调制光束。参考光和信息光相互干扰,形成记录在介质上的干涉条纹。在记录过程中,2 个矩形窗口打开。读取数据时,遮挡信号部分的窗口仅使得参考光通过。由于重建后的信息光是一束强度较低的衍射光,因此使用衰减器来平衡读取过程中信息光与参考光部分之间的强度差。重建光的傅里叶强度由 CMOS 探测器在傅里叶透镜  $L_6$  的后焦平面上捕获。相关光学器件的参数如表 1 所示。

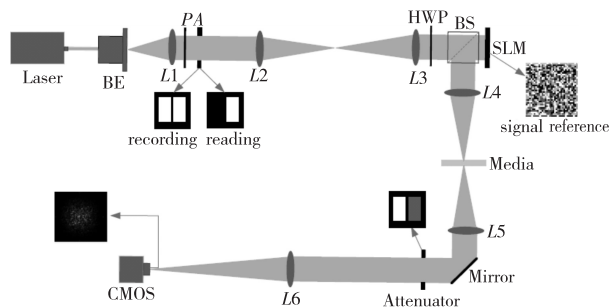


Figure 5 Schematic diagram of holographic storage experiment system

图5 全息存储实验系统示意图



Table 1 Parameters of optical devices  
表 1 光学器件的参数

器件名称	参数
激光波长	532 nm
激光功率	300 mW
矩形窗尺寸	2.56 mm×1.28 mm
SLM 厂商	HAMAMATSU
SLM 型号	X10468-04
SLM 像素间距	20 $\mu$ m
SLM 分辨率	792×600
CMOS 厂商	Thorlabs
CMOS 型号	DCC3260M
CMOS 像素间距	5.86 $\mu$ m
CMOS 分辨率	1936×1216
透镜 L1~L5 焦距	150 mm
透镜 L6 焦距	300 mm
记录介质	光敏聚合物

统计了 1 000 个数据帧的译码迭代次数和 BER<sup>[56]</sup>,分别如图 6 所示。数据帧定义为一个码字中的信息比特序列。如图 6a 所示,使用传统的 LDPC 码纠错方案后,有 935 个数据帧达到了最大译码迭代次数 30。然而,ReLDPC 方案仅有 259 个数据帧达到最大迭代次数。相比传统的 LDPC 码纠错方案,ReLDPC 方案能够将译码迭代次数平均降低 31.6%。

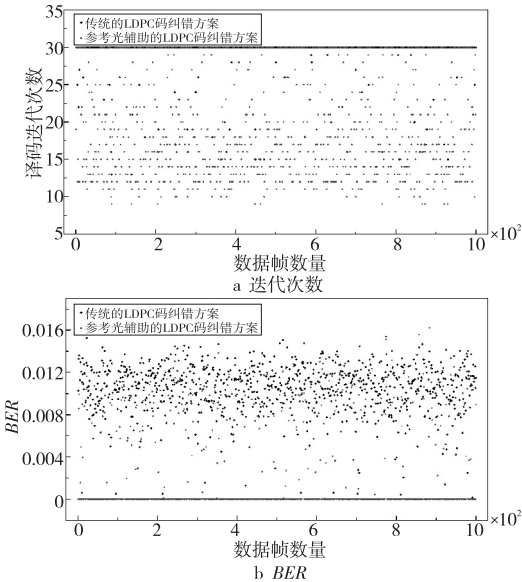


Figure 6 Number of decoding iterations and BER of 1 000 data frames

图 6 1 000 个数据帧的译码迭代次数和 BER

另外,统计了 1 000 个数据帧的 BER 变化情况。如图 6b 所示,在使用提出的 ReLDPC 方案后,有 750 个数据帧中的错误比特被完全纠正,而

传统的 LDPC 码纠错方案只能将极少数的数据帧中的错误比特完全纠正。经计算,使用提出的 ReLDPC 方案和传统的 LDPC 纠错方案后,平均 BER 分别为 0.002 2 和 0.009 7。相比传统的 LDPC 纠错方案,ReLDPC 方案使 BER 平均降低 77.3%。实验结果表明,所提出的 ReLDPC 方案能够显著减少 LDPC 码纠错方案的译码迭代次数,降低 BER,进而提升纠错性能。

4 结束语

随着全球数据量爆发式增长,全息数据存储具有高密度、大容量、长寿命和高数据转换速率的优势,有望成为现有冷数据存储的最佳方案。本文首先介绍了全息数据存储系统,并分析了当前纠错码用于全息存储的研究现状。为了提高相位型同轴全息存储数据可靠性,提出了一种参考光辅助的 LDPC 码优化方案,利用已知的参考光信息优化初始 LLR 信息,显著降低了 BER,减少了译码迭代次数。

参考文献:

[1] Sameer K, Thomas R M. Engineering economics at a hard disk drive manufacturer[J]. Technovation, 2003, 23(2): 749755.

[2] Farjallah E, Armani J M, Gherman V, et al. Improvement of the tolerated raw bit error rate in NAND flash-based SSDs with selective refresh[J]. Microelectronics Reliability, 2019, 96:37-45.

[3] Narahara T, Kobayashi S, Hattori M, et al. Optical disc system for digital video recording[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2000, 39(2S):912-919.

[4] Tan X. Optical data storage technologies for big data era [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45 (9):26-29.

[5] 姜美玲,张明恺,李向平,等. 超分辨光存储研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(3):180649.

Jiang Mei-ling, Zhang Ming-cai, Li Xiang-ping, et al. Research progress of super-resolution optical data storage [J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46 (3):180649.

[6] 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, 2004.

Tao Shi-quan, Wang Da-yong, Jiang Zhu-qing, et al. Optical holographic storage [M]. Beijing:Beijing University of Technology Press, 2004.

[7] Leith E N, Kozma A, Upatnieks J, et al. Holographic data storage in three-dimensional media [J]. Applied Optics, 1966, 5(8):1303-1311.

[8] Mok F H. Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate [J]. Optics Letters, 1993, 18 (11):915-917.

- [9] Tao S, Xu M. Spatio angularly-multiplexed three-dimensional holographic disks [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17 (8): 1015-1020.
- [10] Cao L C, He Q S, Wei H Y, et al. Miniaturized volume holographic optical data storage and correlation system with a storage density of 10 Gb/cm<sup>3</sup> [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49: 2429-2434.
- [11] Li J, Cao L, Gu H, et al. Orthogonal-reference-pattern modulated shift multiplexing for collinear holographic data storage [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(5): 936-938.
- [12] 林泉, 郝建颖, 郑明杰, 等. 光全息数据存储——新发展时机已至[J]. *光电工程*, 2019, 46(3): 180642.  
Lin Xiao, Hao Jian-ying, Zheng Ming-jie, et al. Optical holographic data storage—The time for new development [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46 (3): 180642.
- [13] Xu K, Huang Y, Lin X, et al. Unequally spaced four levels phase encoding in holographic data storage [J]. *Optical Review*, 2016, 23(6): 1004-1009.
- [14] 刘金岩. 同轴全息存储相位编码的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.  
Liu Jin-yan. Research on phase coding of coaxial holographic memory [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [15] Liu J, Horimai H, Lin X, et al. Phase modulated high density collinear holographic data storage system with phase-retrieval reference beam locking and orthogonal reference encoding [J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 3828-3838.
- [16] He M, Cao L, Tan Q, et al. Novel phase detection method for a holographic data storage system using two interferograms [J]. *Journal of Optics A: Pure & Applied Optics*, 2009, 11(6): 065705.
- [17] Jeon S H, Gil S K. 2-step phase-shifting digital holographic optical encryption and error analysis [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, 15(3): 244-251.
- [18] Lin X, Huang Y, Li Y, et al. Four-level phase pair encoding and decoding with single interferometric phase retrieval for holographic data storage [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(3): 032101.
- [19] Xu X F, Cai L Z, Wang Y R, et al. Blind phase shift extraction and wavefront retrieval by two-frame phase-shifting interferometry with an unknown phase shift [J]. *Optics Communications*, 2007, 273(1): 54-59.
- [20] Hariharan P, Oreb B F, Eiju T. Digital phase-shifting interferometry: A simple error-compensating phase calculation algorithm [J]. *Applied Optics*, 1987, 26(13): 2504-2506.
- [21] Horimai H. Multi-level data write/retrieve by phase-locked collinear holography [C]//Proc of 2016 Asia Communications and Photonics Conference, 2016: 1-2.
- [22] Hao J Y, Lin X, Li Y, et al. Fast phase retrieval with a combined method between interferometry and non-interferometry in the holographic data storage [J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(10): 102415.
- [23] Lin X, Hao J, Wang K, et al. Frequency expanded non-interferometric phase retrieval for holographic data storage [J]. *Optics Express*, 2020, 28(1): 511-518.
- [24] Lin X, Huang Y, Shimura T, et al. Fast non-interferometric iterative phase retrieval for holographic data storage [J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 30905-30915.
- [25] Hao J, Wang K, Zhang Y, et al. Collinear non-interferometric phase retrieval for holographic data storage [J]. *Optics Express*, 2020, 28(18): 25795-25805.
- [26] 吴非, 刘朝斌, 谢长生, 等. 体全息存储记录通道噪声模型的研究与设计[J]. *计算机科学*, 2006, 33(4): 13-15.  
Wu Fei, Liu Zhao-bin, Xie Chang-sheng, et al. Design and study on the noise model of recoding channel in volume holographic storage [J]. *Computer Science*, 2006, 33(4): 13-15.
- [27] Tu Z, Zhang S. Overview of LDPC codes [C]//Proc of the 7th IEEE International Conference on Computer and Information Technology, 2007: 469-474.
- [28] Pishro-Nik H, Rahnavard N, Ha J, et al. Low-density parity-check codes for volume holographic memory systems [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(5): 861-870.
- [29] Imai H. A theory of two-dimensional cyclic codes [J]. *Information and Control*, 1977, 34(1): 1-21.
- [30] Blahut R E. Transform techniques for error control codes [J]. *IBM Journal of Research and Development*, 1979, 23 (3): 299-315.
- [31] Madhusudhana H S, Siddiqui M U. On Blahut's decoding algorithms for two-dimensional BCH codes [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1998, 44(1): 358-367.
- [32] Roy S, Garani S S. Two-dimensional algebraic codes for multiple burst error correction [J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(10): 1684-1687.
- [33] Hwang E, Yoon P, Kim K, et al. Iterative volumetric ECC schemes for holographic data storage [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2004, 5380: 304-312.
- [34] Hwang E, Yoon P, Park J, et al. Three-dimensional error correction schemes for holographic data storage [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(5S): 3529.
- [35] Hwang E, Yoon P, Kim H, et al. An efficient 3D error correction schemes for holographic data storage [EB/OL]. [2004-12-15]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16734810>.
- [36] Gu H, Cao L, He Q, et al. Three-dimensional error correcting with matched interleaving for holographic data storage [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2011, 8157: 154-159.
- [37] Ishii N, Katano Y, Muroi T, et al. Spatially coupled low-density parity-check error correction for holographic data storage [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, 56 (9S): 09NA03.
- [38] Chou W, Neifeld M A. Interleaving and error correction in volume holographic memory systems [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(29): 6951-6968.
- [39] Pansatiankul D E, Sawchuk A A. Multidimensional modulation codes and error correction for page-oriented optical data storage [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2002, 4342: 393-400.
- [40] Ramamoorthy L D, vijaya Kumar B V K. Two-dimensional equalization and error correction using low density parity



- check codes for holographic data storage [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45(2B): 1305-1310.
- [41] Park D, Lee J. Soft-encoding scheme of 3/4 tone-controllable code for channel iteration of low-density parity-check code on the holographic data storage[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2012, 51(8S2): 08JD03.
- [42] Kim J, Lee J. Two-dimensional SOVA and LDPC codes for holographic data storage system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(5): 2260-2263.
- [43] Kim J, Moon Y, Lee J. Iterative decoding between two-dimensional soft output Viterbi algorithm and error correcting modulation code for holographic data storage [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2011, 50(9S1): 09MB02.
- [44] Sütő A, Lórinéz E. Iterative decoding and error code correction method in holographic data storage[M]//Optical Communication Theory and Techniques. Boston: Springer, 2005: 87-94.
- [45] Nakamura Y, Hoshizawa T. Two high-density recording methods with run-length limited turbo code for holographic data storage system[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2016, 55(9S): 09SA01.
- [46] Garrett T N, Mitkas P A. Equal and unequal error protection codes for volume holographic storage systems[J]. Proceedings of the SPIE, 1999, 3802: 30-39.
- [47] Goertzen B J, Mitkas P A. Error-correcting code for volume holographic storage of a relational database [J]. Optics Letters, 1995, 20(15): 1655-1657.
- [48] Choi A S, Baek W S. Decision feedback equalizer and hybrid error correction coding for digital holographic optical memory system[J]. Proceedings of the SPIE, 2000, 4087: 1267-1275.
- [49] Wu F, Xie C, Liu Z. Study on very high speed Reed-Solomon decoders using modified Euclidean algorithm for volume holographic storage[J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 5060: 296-299.
- [50] Zhang Y, Cao Q, Sun L, et al. HDecoder: A hardware LDPC decoder using high level synthesis for phase modulated collinear holographic storage[C]//Proc of International Conference on Optoelectronic and Microelectronic Technology and Application, 2020: 1161713.
- [51] Hayashi H, Kimura K. Low-density parity-check coding for holographic data storage [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44(5S): 3495-3498.
- [52] Yoon P, Chung B, Kim H, et al. Low-density parity-check code for holographic data storage system with balanced modulation code [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47(7S1): 5981-5988.
- [53] Chung B, Yoon P, Kim H, et al. A modified low-density parity-check decoder for holographic data storage system [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007, 46(6S): 3812-3815.
- [54] Zhao Y, Wu F, Lin X, et al. Improving the data reliability of phase modulated holographic storage using a reliable bit aware low-density parity-check code [J]. Optics Express, 2022, 30(21): 37579-37594.
- [55] Yu Q, Wu F, Zhang M, et al. Improving reliability using phase distribution aware LDPC code for holographic data storage[J]. Applied Optics, 2022, 61(21): 6119-6127.
- [56] Yu Q, Wu F, Zhang M, et al. Fast phase error correction with reference beam-assisted LDPC coding for collinear holographic data storage [J]. Optics Express, 2023, 31(12): 20345-20363.
- [57] Yu Q, Zhang M, Zhao Y, et al. Exploiting LDPC coding to improve data reliability for phase modulated holographic storage[C]//Proc of the 10th Applied Optics and Photonics China: Micro-optics and MOEMS, 2021: 306-311.
- [58] Zhao J, Zarkeshvari F, Banihashemi A H. On implementation of min-sum algorithm and its modifications for decoding low-density parity-check (LDPC) codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(4): 549-554.
- [59] Zhang M, Wu F, Du Y, et al. Pair-bit errors aware LDPC decoding in MLC NAND flash memory[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2018, 38(12): 2312-2320.
- [60] Liu J, Zhang L, Wu A, et al. High noise margin decoding of holographic data page based on compressed sensing[J]. Optics Express, 2020, 28(5): 7139-7151.
- [61] Gu C, Sornat G, Hong J. Bit-error rate and statistics of complex amplitude noise in holographic data storage[J]. Optics Letters, 1996, 21(14): 1070-1072.

## 作者简介:



于勤(1992-),女,安徽阜阳人,博士研究生,研究方向为全息存储可靠性、调制和纠错编码。E-mail: yuqin@hust.edu.cn

YU Qin, born in 1992, PhD candidate, her research interests include holographic storage reliability, modulation, and error correction code.



吴非(1975-),女,湖北武汉人,博士,教授,博士生导师,CCF高级会员(09483D),研究方向为计算机体系结构、非易失性存储器 and 智能存储。E-mail: wufei@hust.edu.cn

WU Fei, born in 1975, PhD, professor, PhD supervisor, senior member of CCF(09483D), her research interests include computer architecture, non-volatile memory, and intelligent storage.



张猛(1990-),男,安徽阜阳人,博士,副研究员,CCF会员(49487M),研究方向为非易失性存储系统、数据可靠性和纠错编码。E-mail: zgmeng@hust.edu.cn

ZHANG Meng, born in 1990, associate research fellow, member of CCF(49487M), his research interests include non-volatile storage system, data reliability, and error correction code.