



DOI: 10.12086/oe.2019.180596

## 相位调制的同轴全息存储

刘金鹏<sup>1</sup>, 许可<sup>1</sup>, 刘金岩<sup>1</sup>, 蔡坚勇<sup>2</sup>, 何友武<sup>2</sup>, 谭小地<sup>2\*</sup><sup>1</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081;<sup>2</sup>福建师范大学光电与信息工程学院, 信息光子学研究中心, 福建 福州 350117

**摘要:** 从体全息存储原理出发, 列举了体全息存储的技术和主要的几种系统结构, 并就同轴式全息存储系统原理、系统结构、编码方式进行了详细的介绍分析。在未有成熟的相位编码方式的情况下, 对基于相位调制的同轴全息存储系统的两种相位编码方式进行了分析评价, 这两种相位编码方式对全息存储中相位编码的可能实现方式进行了有效补充, 其组合式相位编码方式与传统振幅编码相比提高了编码率且降低了误码率。另外, 介绍和分析了一种可以有效减少材料消耗并提高存储密度的多阶复振幅调制的同轴全息存储系统, 并对其系统表现性能进行评价。综合评价得出, 更合理的编码方式、适当的调制手段和抑制噪声仍是现在全息存储研究中亟待解决的问题。

**关键词:** 体全息存储; 相位调制; 全息编码; 相位重建**中图分类号:** O436.3; TP333**文献标志码:** A**引用格式:** 刘金鹏, 许可, 刘金岩, 等. 相位调制的同轴全息存储[J]. 光电工程, 2019, 46(3): 180596

## Phase modulated collinear holographic storage

Liu Jinpeng<sup>1</sup>, Xu Ke<sup>1</sup>, Liu Jinyan<sup>1</sup>, Cai Jianyong<sup>2</sup>, He Youwu<sup>2</sup>, Tan Xiaodi<sup>2\*</sup><sup>1</sup>School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;<sup>2</sup>Information Photonics Research Center, College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350117, China

**Abstract:** Based on the principle of the volume holographic data storage, the technologies and its main systems of holographic data storage are reviewed. The principle, system structure and coding method of the collinear holographic data storage system are introduced and analyzed. In the absence of mature phase encoding principle, two kinds of phase encoding of phase-modulated collinear holographic data storage systems are analyzed and evaluated. These two phase encoding methods effectively complement the possible methods of phase encoding in holographic storage. The pairs-phase-encoding improves the code rate and reduces the error rate compared with traditional encoding. Moreover, a multilevel complex amplitude modulated collinear holographic storage system is introduced, which can efficiently reduce material consumption and increases storage capacity. Moreover, its system performance is evaluated. Consequently, more reasonable coding method, appropriate modulation and suppression of noise, are still urgent problems in the researching of holographic data storage technology.

**Keywords:** volume holographic storage; phase modulation; holographic encoding; phase retrieve**Citation:** Liu J P, Xu K, Liu J Y, *et al.* Phase modulated collinear holographic storage[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(3): 180596

收稿日期: 2018-11-18; 收到修改稿日期: 2019-02-25

作者简介: 刘金鹏(1993-), 男, 博士研究生, 主要从事光学全息、信息光学的研究。E-mail: l\_creston@sina.com

通信作者: 谭小地(1962-), 男, 博士, 教授, 主要研究光学全息、光子晶体、液晶及三维立体显示技术等。E-mail: xtan@fjnu.edu.cn

# 1 引言

随着计算机信息技术的快速发展,人们日常生活中的信息交流越来越频繁,产生的信息数据量也越来越多,根据美国国际数据公司(International Data Corporation, IDC)统计,未来几年全球数据将每两年翻一番,2020年将达到40 ZB(1 ZB=10<sup>21</sup> Bytes)<sup>[1]</sup>,信息量的激增对数据存储系统提出了更高的要求,大量数据的存储与维护成本将会越来越大,具有高密度、高速率、低功耗、长寿命的存储技术成为社会的重大需求。传统的磁存储系统,例如磁盘、磁带,虽然广泛应用于现实生活中,但是存在存储时间短,且容易发生数据丢失等问题。而依托半导体技术发展起来的固态存储技术,虽然有较高的传输速率和较大的存储密度,但是成本和寿命已经阻碍了前进的步伐。传统的光存储系统,例如CD、DVD等光盘存储技术,虽然存储寿命较长,但是其存储密度已经接近了理论极限。由此可见,人们需要一种全新的存储技术以应对现代社会的大量信息所带来的存储压力。全息光存储技术以其大存储容量、高传输速率和长存储寿命逐渐成为下一代存储设备的有力候选者。

体全息光存储技术使用光波作为信息载体,具有振幅、偏振和相位等多个调制参量,并且具有将传统二维表面存储发展到三维体存储以及多维度存储的潜力。20世纪60年代van Heerden提出可以将光全息技术应用于数据存储,而到目前为止已经有多种光全息存储系统样机被成功研制<sup>[2-7]</sup>,光全息存储理论也被不断完善,光全息存储技术正逐步向实用化迈进。本文就光全息存储技术,特别是基于相位调制的光全息存

储技术进行简要的梳理分析,希望能为该技术的发展提供一些参考。

# 2 体全息存储技术

## 2.1 体全息存储技术基本原理

体全息存储技术是一种区别于传统二维表面存储的三维光学存储技术,主要工作过程可以分为两步:干涉记录和衍射读取。在干涉记录中,使用空间光调制器把需要存储的数据编码调制到信息光中参考光和信息光在存储材料中相互干涉,干涉后光场与存储材料相互作用,使存储材料的光学性质(例如折射率)发生改变,从而把光波中载有的信息记录到存储材料中形成全息图。在衍射读取的过程中,使用记录时所用的参考光对已记录在存储材料中的全息图进行照射,由于体全息光栅的衍射效应,将会在记录时信息光方向上衍射重建出信号光,后续使用CCD或CMOS等传感器可以采集获取重建信息光,从而完成存储数据的读取。体全息存储的记录与读取过程如图1所示。

## 2.2 体全息存储系统结构

关于体全息存储的研究主要集中在三种系统结构中:1)同轴,以Optiware公司2005年提出同轴式全息存储系统Collinear Holography为代表<sup>[3]</sup>;2)双轴,以InPhase公司的Angle-Polytopic相位共轭结构为代表;3)InPhase公司的Monocular结构。同轴的特点是结构紧凑,稳定性好,能与现有光盘伺服系统兼容;双轴特点是使用平面波进行角度复用,具有一定补偿材料收缩的能力;Monocular结构结合了同轴和双轴结构的特点,既使用平面波进行角度复用,又让参考

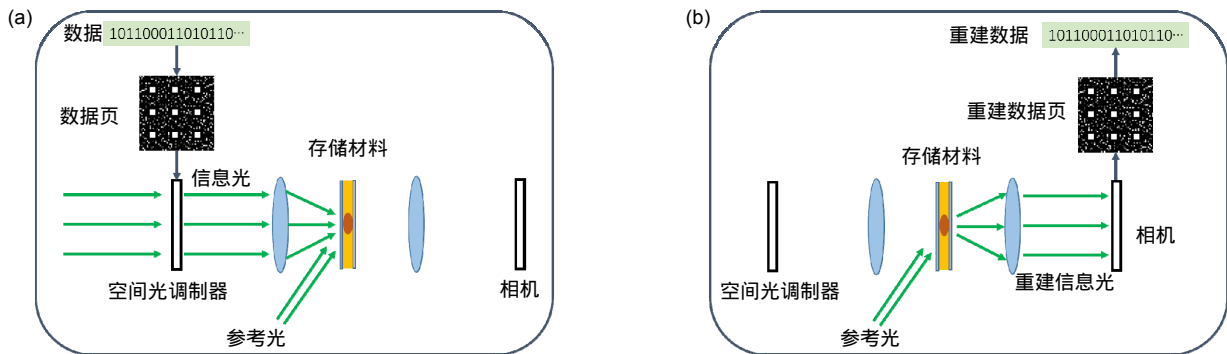


图1 体全息记录与读取原理示意图。(a)记录过程;(b)读取过程

Fig. 1 Sketch of recording and reading process in holographic storage. (a) Recording process; (b) Reading process

光和信息光同轴，结构比较紧凑。由于体全息存储使用参考光和信息光两束进行数据记录，因此比现有的光盘技术多了一路光束，系统比较复杂、体积大、不稳定等一系列问题。同轴式体全息存储采取参考光和信息光共光轴的方法，提高系统的抗干扰能力且使系统更加紧凑。由于其显著的优势，一经提出就受到广泛的关注，现已成为体全息实用化的重要发展方向，本文也将着重于同轴式全息存储系统。

### 2.3 体全息存储材料

体全息存储材料是存储系统中极为重要的一部分，其性能的好坏将直接影响系统的表现。理想的体全息存储材料应该是具备反应速度快、调制度高、动态范围大、衍射效率高、寿命长和具有非易失性等特性。早期研究常采用无机光折变材料(如  $\text{LiNbO}_3$  晶体)，近几年光致聚合物材料由于其高灵敏度、高分辨率、高衍射效率、存储稳定等优点脱颖而出，受到人们的极大重视。目前几种光致聚合物 HRF-150(Dupont)<sup>[8]</sup>、DMP-128(polaroid)还有 Martin 等人 and Weiss 等人研究的丙烯酸胺和亚甲基双丙烯酸胺光致聚合物均可达到 90%衍射效率，灵敏度值小于  $100 \text{ mJ/cm}^2$ ，分辨率超过 2000 线对/mm<sup>[9]</sup>。而掺杂的 PQ-PMMA 光致聚合物材料因其高衍射效率、高动态范围等特性得到了更多研究者的关注<sup>[10-11]</sup>。虽然光致聚物体全息材料具有诸多优点，但其制备稳定性问题、材料的收缩、散射

噪声等问题及其各方面性能的提高仍需更多的研究。

## 3 同轴全息存储系统

### 3.1 同轴全息存储系统结构

同轴全息存储系统是体全息存储历史上一个重大突破，拥有突出的实用优势和可持续研究价值。传统的体全息存储系统的研究大多是双轴式的全息存储系统，信息光和参考光在不同光轴上，两束光之间也存在一定的夹角，为了提高存储密度，利用布拉格条件使用角度复用和波长复用等技术，但也因此对所处的环境要求十分严格，易受到干扰从而影响系统的性能表现。同轴式全息存储系统能保证系统光学结构中信息光和参考光处于同一光轴上，大大降低了系统的复杂性，对环境的抗干扰能力得到加强。并且由于同轴全息存储系统采用与传统光盘类似的反射式结构，能与现有的光盘伺服系统相结合。

同轴全息存储系统结构如图 2 所示，使用绿光激光器作为存储系统的光源，保持线偏振光。在记录过程中，空间光调制器上加载图 3(a)所示的图案，中心为信息光数据页，外部为参考光图案。经过偏振分束器、中继透镜、四分之一波片后 p 线偏振光变成圆偏振光，再经显微物镜汇聚到全息材料上发生干涉，形成干涉条纹记录全息图。读取过程中，空间光调制器上加载图 3(b)所示图案，只有外部参考光图案。经过

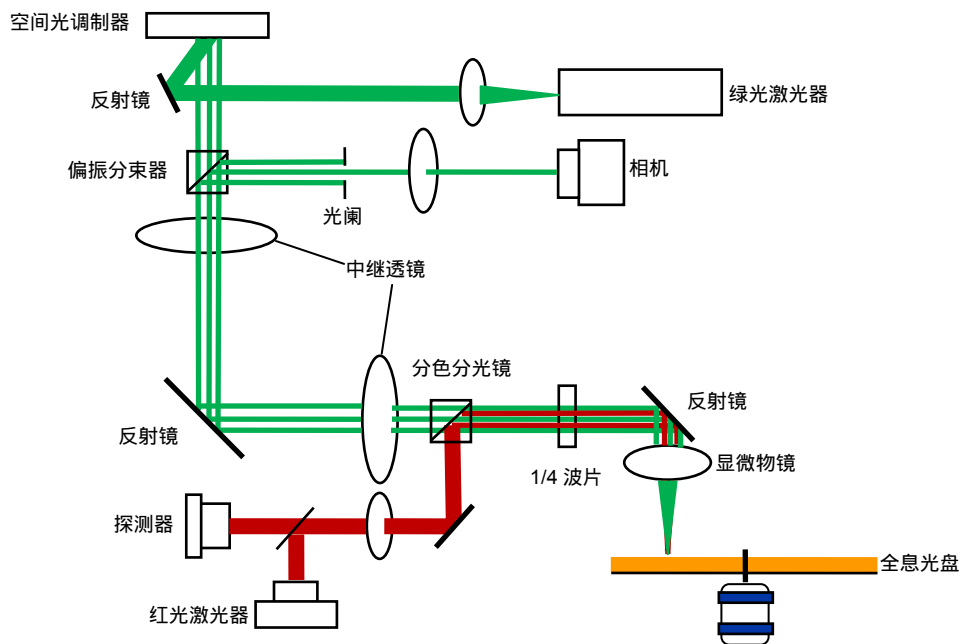


图 2 同轴全息存储系统光路图<sup>[4]</sup>

Fig. 2 Optical path of collinear holographic data storage system<sup>[4]</sup>

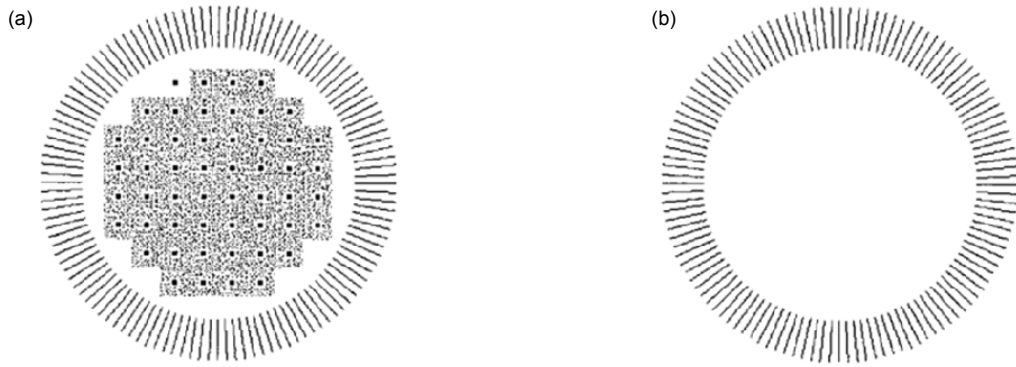


图 3 同轴全息存储系统使用的空间光调制器上的图案。(a) 记录过程中所使用; (b) 读取过程中所使用<sup>[3]</sup>  
 Fig. 3 The pattern on SLM in collinear holographic data storage system. (a) Recording process; (b) Reading process<sup>[3]</sup>

与记录时一样的光路后,参考光汇聚到记录全息图上,由于全息光盘的衍射和光盘底部反射层,重建光会被反射,再经过四分之一波片变成 s 线偏振光,被偏振分光器反射到相机,信息数据图被捕获。除此之外,使用红光激光机作为光盘伺服系统的光源,与记录和读取的绿光激光通过分色分光镜实现合束和分离。

### 3.2 振幅式同轴全息存储系统数据编码

数据编码是全息存储系统中的重要环节,将各种各样的信息转化为可以进行全息存储的编码全息图。特定的编码对于后期的解码和对噪声的抗噪都拥有帮

助。在全息存储中,用振幅信息作为调制的光学信息的编码方式被称为振幅型编码,在全息存储领域被广泛使用。

清华大学体全息数据存储课题组在研究振幅调制编码过程中<sup>[12-14]</sup>,根据信息论的香浓极限定理<sup>[15-16]</sup>,得到在数据单元的编码比重为 20%时,编码带来的信息量达到最大,并且平衡了编码率和误码率。在选择数据单元的尺寸为 4×4 像素的话,将采用 16 取 3 的编码规则,即从 16 个像素中取 3 个像素置为亮,亮点的位置作为编码信息。图 4 为同轴全息存储中振幅编码数据页。

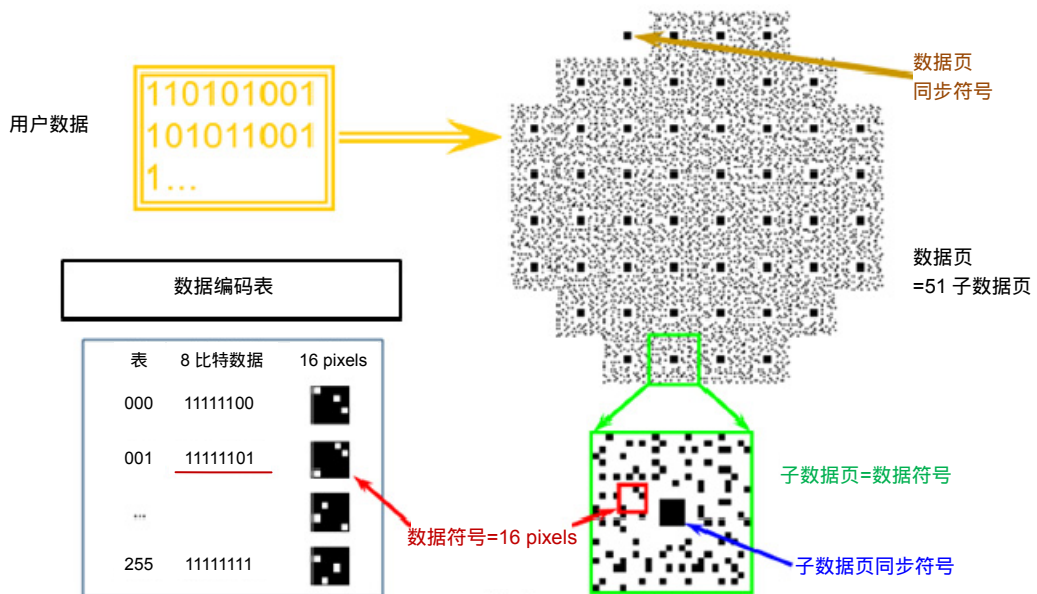


图 4 振幅调制的编码数据页<sup>[3]</sup>

Fig. 4 Data pattern encoding of amplitude modulation holographic data storage<sup>[3]</sup>

一幅完整数据页由 51 个子数据页和一个数据页标志构成, 数据页标志用于对数据页进行寻址定位。每个子数据页包含 32 个数据单元和一个标志点, 标志点位于子数据页中心, 用于子数据页的定位和寻址。每个数据单元由  $4 \times 4$  像素构成, 采取 16 取 3 的编码方式可得到 8 bit 的数据量, 因此这种振幅编码的方式所得到的编码率为 0.5。虽然这种振幅编码方式在对于误码率的控制上达到  $10^{-3}$  量级, 但是编码率还是很低, 没能发挥出全息存储的高存储密度的潜力, 因此仍需对全息存储的编码及信息调制方式进行进一步的研究。北京理工大学信息光学实验室在同轴全息存储系统的基础上, 提出了纯相位调制的不等间隔组合式相位编码<sup>[17]</sup>、等间隔式组合相位编码<sup>[18]</sup>以及复振幅调制的多阶调制<sup>[19]</sup>, 有效的提高了编码率。将在接下来的章节中进行介绍。

## 4 纯相位调制同轴全息存储系统的编码方式

在纯相位调制的全息存储系统中, 存在两个主要问题: 相位信息的读取方式和相位信息的编码方式。引进相位信息调制对于编码率具有明显的提高, 但是现在对于相位信息的准确重建仍未得到很好的解决。主流的相位重建方法分为干涉法和非干涉法: 干涉法相位重建需要一束用于干涉的平面波, 且利用相移进行相位信息重建, 因此对光束和元器件的稳定性要求很高; 非干涉法通常利用迭代算法, 需要一定的计算能力和计算时间, 并且对于捕获图像的质量要求较高。就目前来看, 干涉法还是全息存储中更加常用的一种相位信息的获取方法。此外关于相位信息的编码现在还未得到一个很好的解决方案, 本章节也将就两种纯相位编码方法作出简单的介绍和评价。

### 4.1 不等间隔组合式相位编码

纯相位编码顾名思义, 就是在全息存储编码时只采用相位信息进行编码, 在数据页的各个数据点上加载相应的相位作为信息。由于接收重建信息的 CCD 等相机只能读取强度信息不能直接获取相位信息, 因此还需要相应的相位读取手段, 例如干涉读取等。与振幅型的 0、1 二阶调制相比, 使用相位编码中每个像素相位状态的选择更多, 因此也就能带来更高的编码率。许可等人<sup>[17]</sup>在有关纯相位编码问题上提出了不等间隔的组合式相位编码, 有效的提高了编码率, 同时保持了较低的误码率, 其编码设计如下所述。

在纯相位调制中由于相位分布在  $2\pi$  范围内, 在干涉读取相位过程中会有两个不同的相位对应一个强度的情况, 所以选取更小的相位区间为  $0 \sim \pi$ 。为了避免在无法得知干涉参考光的相位下出现干涉强度相同的情况, 不等间隔的相位调制被提出, 采取  $0$ 、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$  和  $\pi$  四阶相位调制, 避免了在相位读取干涉参考光在  $\pi/2$  下的相位完全无法区分的情况。在此基础上提出了相位组合的编码对, 用来进一步降低误码率, 如图 5 所示, 用四组相位组合  $(0, \pi/4)$ 、 $(\pi/4, \pi/2)$ 、 $(\pi/2, \pi)$ 、 $(\pi, 0)$  分别表示四进制里的 0, 1, 2, 3。

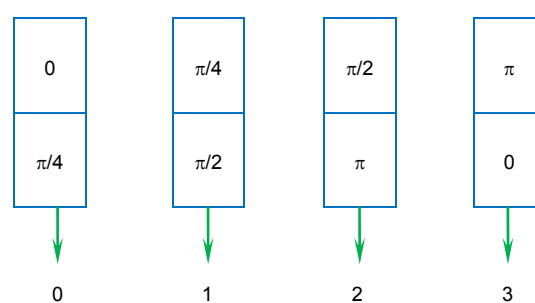


图 5 不等间隔相位组合的编码方式

Fig. 5 Encoding method of the unequal interval four-order-phase

在解码过程中通过比对像素和标准相位点的灰度来确定每个像素的相位值, 假如某上下像素对是四组编码对中的一种则判定解码正确, 反之则认为是误码, 采取下一步校验程序进行校正, 即使用相位组合的方式, 牺牲每个数据单元中的一半数据点来消除巨大的误码影响。在校验过程中寻找误码最近的  $0$ 、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 $\pi$  四个标准点, 对比四个标准点的灰度, 将灰度相近的两个灰阶作为串扰发生的灰阶, 从而将误码进行修正。

基于上述的编码设计思想, 如图 6 所示的不等间隔相位组合编码的数据页被设计出来, 每个数据单元使用  $4 \times 4$  像素, 16 个像素中的两个白色像素填充相位标准点, 用来进行解码时的相位灰度比对。剩余的 14 个像素点构成 7 对相位组合, 可以表示 14 bit 的数据量, 因此一个数据单元的编码率为 0.875, 相比振幅型的编码率提高了 1.75 倍。此编码方法经过了提出者的验证, 在模拟中校验后的平均误码率为 0.13%, 且在验证性的实验中得到了很好的结果。但这种方法受到干涉读取时所用的干涉光的相位影响很大, 最后的解

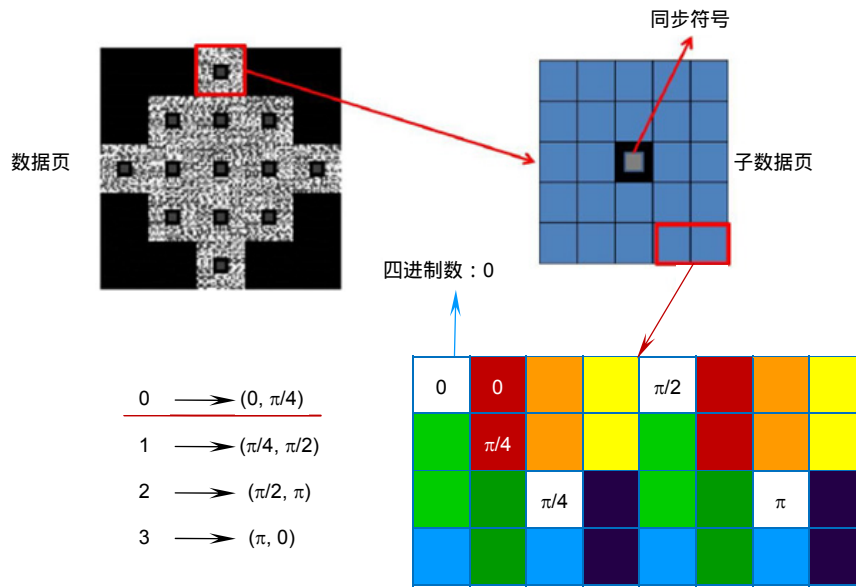


图 6 不等间隔相位组合编码的数据页<sup>[17]</sup>

Fig. 6 Data page of the unequal interval four-order-phase encoding<sup>[17]</sup>

码性能依赖于校正过程，对实际中干涉光不稳定带来的影响进行补偿是本编码方式今后进一步提高性能的有效途径。

#### 4.2 等间隔组合式相位编码

不等间隔相位组合编码提出者所在的研究课题组在其不等间隔相位组合编码基础上进一步分析研究改进得到了等间隔相位编码。采用的编码对的形式，编

码对的上下像素相位差为恒定差值，并且也选择对的形式作为标准比对。其编码对如图 7(a)中所示， $\varphi$  为相位编码用相位值， $\psi$  为一个恒定的相位值。选取  $\psi$  为  $\pi/2$  时，在任意干涉参考相位下每个编码对都会产生一个独一无二的编码对干涉灰度状态，将相移干涉通过空间分布来一次性将相位解出。

在解码过程中，此编码方式考虑到噪声变量的存在，选择使用读取相位编码对与标准编码对的灰度方

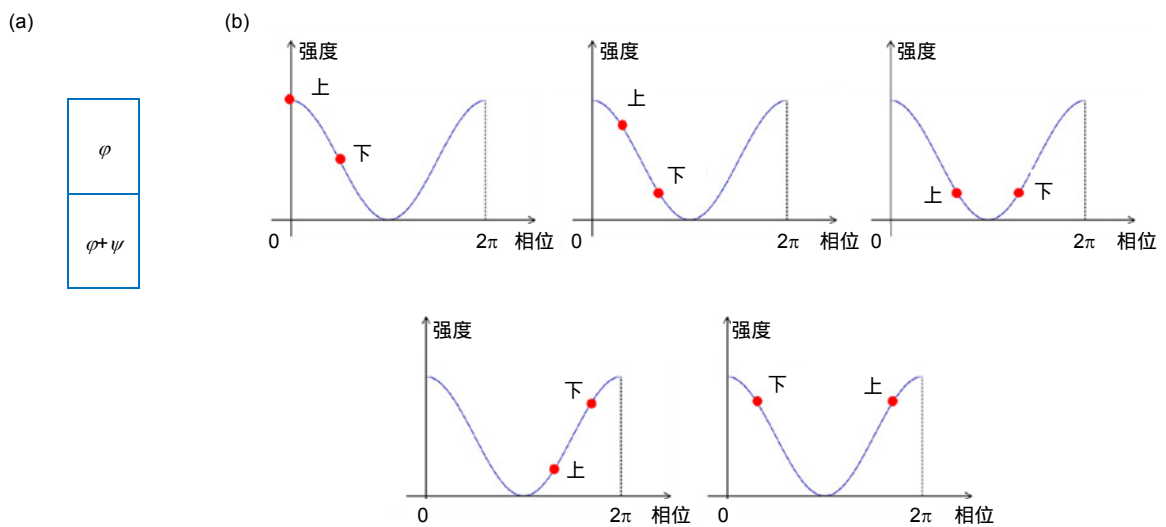


图 7 (a) 相位编码对; (b) 干涉后编码对中两像素强度关系分布示意图<sup>[18]</sup>

Fig. 7 (a) Phase encoding pair; (b) Intensity relationship of two pixels of encoding pair after interference<sup>[18]</sup>

差来计算解码。其计算方法为

$$C_{\text{decode}} = (\varphi_{\text{up}} - M_{\text{up}})^2 + (\varphi_{\text{down}} - M_{\text{down}})^2, \quad (1)$$

其中： $\varphi_{\text{up}}$  和  $\varphi_{\text{down}}$  表示读取到的相位编码位置上下两个相位的灰度值， $M_{\text{up}}$  和  $M_{\text{down}}$  表示读取到的标准对的上下两个相位的灰度值。把每个编码对与标准对的方差进行计算，得到最小值时的标准对的相位即被看作编码对的相位，从而解出。得益于这种解出方法，整个数据页中只需要放置一组标准对组即可，大大提高了数据页的利用率，且在进行  $N$  阶相位阶数的编码时需要  $N$  对标准对具有很好的推广性。当使用 4 阶相位时，每个数据单元可存储 16 bit 数据；当使用 8 阶相位时，每个数据单元可以存储 24 bit 数据，相比于振幅型其编码率提高了 2 倍和 3 倍，其 8 阶的数据页分布示意图如图 8 所示。由于无需在每个数据单元中放置标准对，相比之前提出的不等间隔相位对编码在编码率上也有所提高。此编码方式也经过了模拟验证和实际实验验证，在 8 阶的模拟中随着参考光相位变化的误码率最大值在  $10^{-4}$  量级，实际实验中，在没有进行校验的情况下得到的误码率保持在 0.12 左右。此编码方法在能够得到高的编码率和数据页的利用率，但没能提出相应的校验机制，且在 8 阶以上的高阶编码上采用方差来分辨相位将带来高误码率，因此这种编码方式还需进行进一步地优化，选择更适合的相位值判断标准。

## 5 同轴全息系统的复振幅调制

在关于对振幅型的全息系统进一步改进研究中，除去利用纯相位调制取代振幅调制外，还出现了在振幅调制的基础上加入相位信息的复振幅调制。将相位调制和振幅调制结合起来可以提高系统的编码率(图 9 所示)，并利用相位调制的作用使材料中的光斑能量不那么集中，减少材料的不必要消耗。在关于复振幅调制中，相位信息的稳定、准确获取是影响系统最终性能的重要一环。在此研究中为了解决这个问题该研究课题组根据干涉发生的相互独立性，提出了利用参考调制来进行干涉相位重建的方法，并在此基础上增加了参考光正交编码复用，从而进一步增加了数据存储密度。

将数据页和其对应干涉相位重建所用的干涉页一同记录在全系材料的方法，通过操纵参考的相位来进行干涉页的相移等操作，从而可以将数据页的相位信息准确地重建出来。这种方法的具体操作由图 10 进行说明。

在记录过程中，将在同一个位置进行两次记录，第一次使用 A、B、C、D 组成的参考光图案记录数据页，第二次用 E、F、G、H 组成的参考光图案记录用于干涉的干涉页，这两次干涉记录由于所用参考光图案不同互不干扰。在数据页读取重建过程中，使用 A、

0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	$\pi/4$	$\pi$	$\pi/2$	$5\pi/4$
$\pi/2$	$3\pi/4$	$\pi$	$5\pi/4$	$3\pi/4$	$3\pi/2$	$\pi$	$7\pi/4$
$\pi$	$5\pi/4$	$3\pi/2$	$7\pi/4$	$3\pi/4$	0	$3\pi/2$	$\pi$
$3\pi/2$	$7\pi/4$	0	$\pi/4$	$5\pi/4$	$\pi/2$	0	$3\pi/2$
$7\pi/4$	$7\pi/4$	$\pi/2$	$\pi$	$3\pi/2$	$7\pi/4$	$\pi/4$	$\pi$
$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi$	$3\pi/2$	0	$\pi/4$	$3\pi/4$	$3\pi/2$
$5\pi/4$	$3\pi/2$	$\pi/4$	$7\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	$\pi/4$	$\pi$
$7\pi/4$	0	$3\pi/4$	$\pi/4$	$\pi$	$5\pi/4$	$3\pi/4$	$3\pi/2$

图 8 等相位间隔的 8 阶数据页分布示意图。(红框内为标准对组)<sup>[18]</sup>

Fig. 8 Sketch of 8-levels equal interval encoding data page. (Standard pairs in red cycle)<sup>[18]</sup>

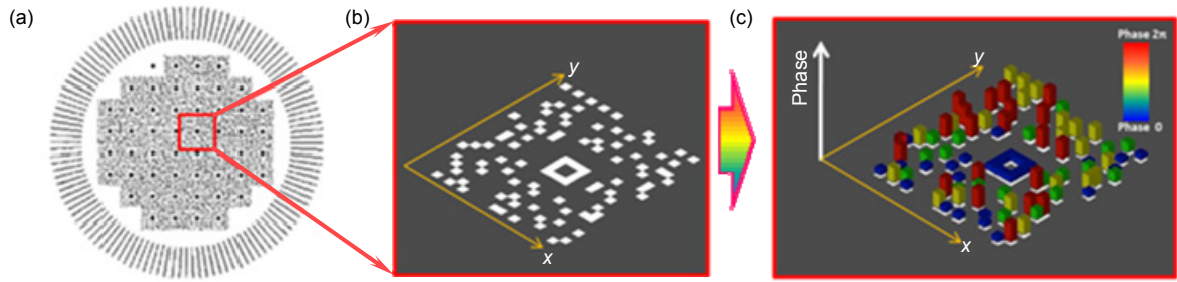


图 9 数据页信息量示意图。(a) 同轴全息存储系统使用的数据页；(b) 基于 16 取 3 编码方式的振幅型数据页(a)的局部放大；(c) 在(b)基础上引进的多阶相位调制<sup>[19]</sup>  
 Fig. 9 Information amount of data page. (a) Amplitude modulation data page based on 3/16 principle used in collinear holographic storage system; (b) Enlarge view of a; (c) Phase-multilevel based on (b)<sup>[19]</sup>

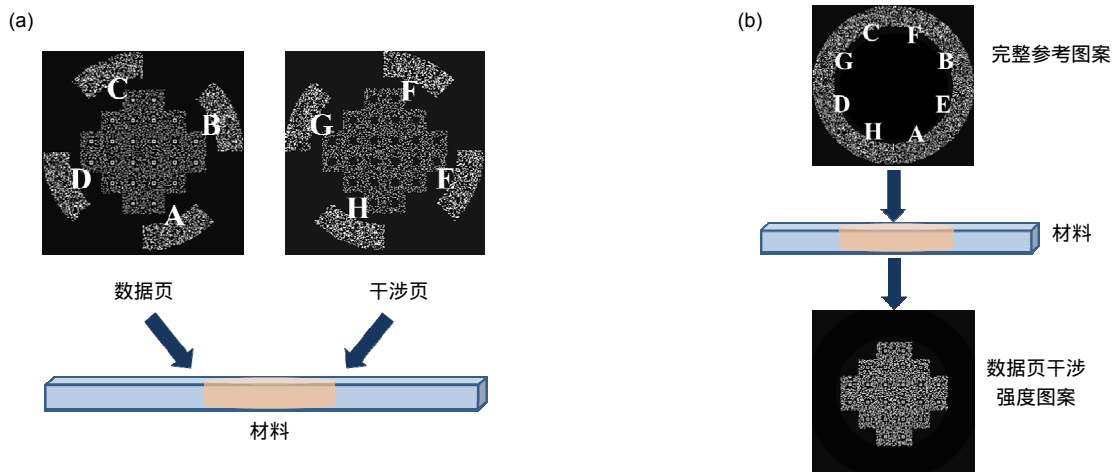


图 10 相位干涉重建示意图。(a) 记录过程；(b) 读取过程<sup>[19]</sup>  
 Fig. 10 Phase interference retrieval schematic diagram. (a) Recording process; (b) Reading process<sup>[19]</sup>

B、C、D、E、F、G、H 八个部分组成的完整参考图案照射已存好全息图的材料，将同时重建出数据页和干涉页。它们两者在被衍射重建的同时将发生干涉，直接产生干涉强度图案。辅以改变参考页所用参考部分 E、F、G、H 的相位则可直接影响重建出的干涉页的相位，从而应用相移法得到数据页准确的相位信息。由于干涉图案由记录好的两幅全息图重建时产生，因此十分稳定，不易受到外界震动等干扰，干涉图案的质量高，且不需要多余的元器件参与相位的获取过程，但与此同时牺牲了用于相移的时间。利用一个振幅调制空间光调制器和一个相位调制空间光调制器将该方法进行了实验验证，在振幅调制基础上使用 4 阶相位、8 阶相位调制时得到的重建数据页的误码率分别仅为

0.39%和 1.3%。

在此研究基础上，该课题组对用于记录和读取数据页的 A、B、C、D 参考光图案进行等振幅强度的相位正交编码，从而在同一全息材料位置继续多幅数据页的记录，且能与之前的干涉页相互干涉，最终读出数据页的信息。在实验中，四幅数据页的同一位置复用被验证，且复用后每幅误码率维持在较低的水平，证明了此种复用方式的可行性。

但此种方法性能表现依赖于两个进行相位与振幅调制的空间光调制器之间的良好匹配和全息材料的高衍射效率和调制度，如何将系统变得更加紧凑简单和研制更优良的全息存储材料将是此方法进一步提高的方向。



## 6 结 论

在信息技术高速发展,人类进入数据时代的今天,海量数据的存储需要新的存储技术。而体全息存储技术在半个多世纪的发展中不断创新,逐步走向实用化,极有可能成为下一代存储技术的主角。本文从全息存储技术出发,着重介绍了同轴式全息存储系统的相关研究进展,特别是利用相位信息进行调制的同轴全息存储技术。分析和评价了两种组合式的纯相位调制的全息数据页编码,不等间隔组合编码虽然设计了相应的校验方式,但是校验方法还有些简单,且因为相位调制范围小从而不能获得高阶数的编码;等间隔组合编码虽然增大了相位调制范围,提高了编码率和存储密度,但并没考虑加入噪声所带来的影响,且没能设计纠错码或校验机制。使用复振幅进行调制的方法虽然能提高编码率并采用正交参考相位编码的复用技术,但是系统复杂,系统的噪声来源更多。所以目前来说,体全息存储需要克服的问题还很多,无论是数据编码、调制方式还是噪声抑制等方面还有许多亟待提高之处,现有的技术水平距离理论极限即实际应用还有一定距离。

## 参考文献

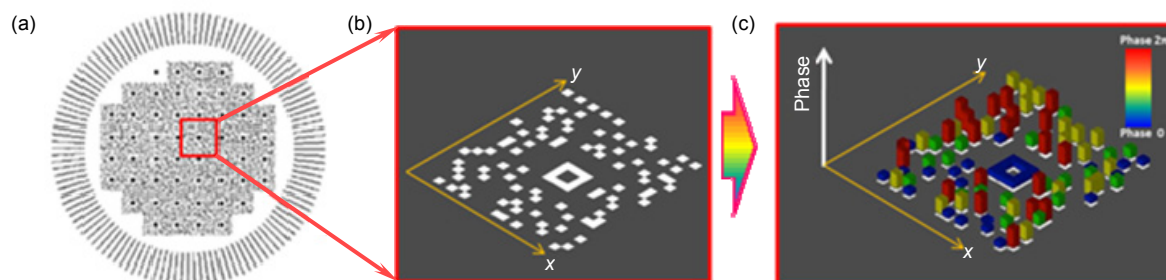
- [1] van Heerden P J. Theory of optical information storage in solids[J]. *Applied Optics*, 1963, **2**(4): 393–400.
- [2] Ashley J, Bernal M P, Burr G W, et al. Holographic data storage technology[J]. *IBM Journal of Research and Development*, 2000, **44**(3): 341–368.
- [3] Horimai H, Tan X D, Li J. Collinear holography[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(13): 2575–2579.
- [4] Tan X D, Horimai H. Collinear holographic information storage technologies and system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 827–830.  
谭小地, 堀米秀嘉. 同轴式光全息存储技术及其系统[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 827–830.
- [5] Orlov S S, Phillips W, Bjornson E, et al. Ultra-high transfer rate high capacity holographic disk digital data storage system[C]//*Proceedings 29th Applied Imagery Pattern Recognition Workshop*, 2000: 71.
- [6] Hwang E, Yoon P, Kim N, et al. Real-time video demonstration of holographic disk data storage system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, **6282**: 628205.
- [7] Hoskins A, Ihas B, Anderson K, et al. Monocular architecture[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, **47**(7): 5912–5914.
- [8] Rhee U S, Caulfield H J, Vikram C S, et al. Dynamics of hologram recording in DuPont photopolymer[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(5): 846–853.
- [9] Blaya S, Carretero L, Mallavia R, et al. Optimization of an acrylamide-based dry film used for holographic recording[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(32): 7604–7610.
- [10] Hsu K Y, Lin S H. Holographic data storage using photopolymer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **5206**: 142–148.
- [11] Liu Y, Fan F L, Hong Y F, et al. Volume holographic recording in Irgacure 784-doped PMMA photopolymer[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(17): 20654–20662.
- [12] Li J H, Cao L C, Gu H R, et al. Orthogonal-reference-pattern-modulated shift multiplexing for collinear holographic data storage[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(5): 936–938.
- [13] Gu H R, Cao L C, He Q S, et al. A two-dimensional constant-weight sparse modulation code for volume holographic data storage[J]. *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, 2011, **12**(5): 430–435.
- [14] Gu H R, Cao L C, He Q S, et al. Three-dimensional error correcting with matched interleaving for holographic data storage[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, **8157**: 81570K.
- [15] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. *Bell system Technical Journal*, 1948, **27**(3): 379–423.
- [16] Fu Z Y, Zhao J Z. *Information theory and coding*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.  
傅祖芸, 赵建中. 信息论与编码[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Liu J P, 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.

# Phase modulated collinear holographic storage

Liu Jinpeng<sup>1</sup>, Xu Ke<sup>1</sup>, Liu Jinyan<sup>1</sup>, Cai Jianyong<sup>2</sup>, He Youwu<sup>2</sup>, Tan Xiaodi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup>College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350000, China



Information amount of data page. (a) Collinear data page; (b) 3/16 coding of amplitude; (c) Phase-multilevel on pixel

**Overview:** Based on the principle of the volume holographic data storage, the technologies and its main systems of holographic data storage are reviewed in this paper. The studied holographic storage system is set to collinear holographic storage system due to its compact and anti-interference. The principle, system structure and coding method of the collinear holographic data storage system are introduced and analyzed. In the traditional holographic storage system, only pure amplitude information of light is used for carrying information, which is a kind of waste of multiple modulation properties of light. In order to improve the encoding rate and storage density of holographic storage, the utilization of phase modulation is considered. In spite of using phase modulation can efficiently improve the encoding rate and storage density, the recognized encoding method of phase modulation is still unknown. In the absence of mature phase encoding principle, research group of Beijing Institute of Technology proposed two kinds of new phase encoding of phase-modulated collinear holographic data storage systems. Unlike traditional encoding principle of considering single pixel as a data point, the unequal interval four-order-phase encoding and equal interval four-order-phase encoding use pairs of pixels as one data point and use pure phase modulation to the data page. These two methods take advantage of the relationship between the two pixels of one pair to represent the information rather than the value of each pixel. Compared with the traditional amplitude modulation data encoding, the method using unequally spaced quaternary phase encoding can effectively improves the encoding rate of a data page and controls the error rate in a relatively low level. In addition, combing the unequal interval four-order-phase encoding method, the group improved this phase encoding method and introduced the equal interval four-order-phase encoding method. The coding range is extended from the original  $0\sim\pi$  to  $0\sim2\pi$ . Besides the pure phase modulation, the group also studied the feasibility of complex amplitude modulation. A multilevel complex amplitude modulated collinear holographic storage system is proposed, which can efficiently reduce material consumption and increase storage capacity. It locks the data page and the corresponding phase-retrieval interference beam together at the same location with sequential recording process, and makes the system more compact and phase retrieval easier. In addition, the method was experimentally evaluated with two SLMs. For further improving data storage density, an orthogonal reference encoding multiplexing method at same position of medium is proposed. Although the encoding rate is improved by using unequal and equal interval four-order-phase ending method and the then storage density is improved by complex amplitude holographic storage system, more reasonable coding method, appropriate modulation and suppression of noise, which are still urgent problems in the researching of holographic data storage technology.

**Citation:** Liu J P, Xu K, Liu J Y, *et al.* Phase modulated collinear holographic storage[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(3): 180596

\* E-mail: xtan@fjnu.edu.cn