

正交相位编码的同轴全息加密存储系统的研究

宋海洋^{1,2}, 李枷楠^{1,2}, 范琳琳^{1,2}, 林达奎^{1,2*}, 王琨^{1,2}, 林泉^{1,2}, 谭小地^{1,2**}¹福建师范大学光电与信息工程学院医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350117;²福建师范大学光电与信息工程学院福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350117

摘要 通过调制具有不同编码单元的参考光,对信息光进行分页式加密存储。提出两种参考光编码加密模式,即扇形参考光编码模式和随机位置参考光编码模式,并对这两种方法进行验证。实验结果表明,这两种方式都通过正交相位编码完成加密解密的过程。对两种方法的加密性进行评估,不同密钥对应的加密信息之间的相似度均值分别为 0.57 和 0.02,均方误差的平均值分别为 537 和 1872。随机位置参考光编码模式下的同轴系统安全性更高。正交相位加密技术可以有效地防止存储数据被非法访问和窃取,保证了数据的安全性。

关键词 全息; 全息数据存储; 同轴系统; 正交相位; 加密

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230696

1 引言

全息数据存储(HDS)具有存储容量大、数据传输速率快等特点,是大数据时代可持续发展的技术^[1-2]。只有信息安全得到保障,公众才能有信心地接受和使用这项技术。参数复用常用于增加数据的安全性,包括波长、角度、相位、振幅、偏振等^[3-5]。相位编码全息数据存储系统因其光能效率高、结构稳定、易于被相位空间光调制器(SLM)调制等优点而备受关注^[5-6]。基于双随机相位编码(DRPE)的全息光学加密技术已被用于加密信息。该技术对 $4f$ 系统输入平面上图像所在的空域与频域分别进行相位调制,在输出平面上得到统计特性呈平稳白噪声的加密图像^[7]。加密区域可以移动到系统的菲涅耳域^[8],光的波长和距离作为系统密钥,扩大了密钥空间,增加了安全性^[9-10]。现代相位编码的加密技术大多基于随机相位编码技术,例如基于分数傅里叶变换的双随机相位编码技术^[11]、基于数字全息的双随机相位编码技术^[12]、基于迭代相位恢复算法的双随机相位编码技术^[13]等。此外,参考光编码的正交相位加密技术以其低串扰性能和最小码存储需求^[1]的优势而成为一种有效的加密方法,它可以在物平面上直接对参考光进行加密,利用空间光调制器对参考光进行相位调制,精简实验装置,简化实验流程^[14-15],实现全相位的调制^[1]。哈达玛矩阵可以产生任意阶数的正交相位编码矩阵^[16],在实际系统中,正交相位编码的存储容量将由材料和参考光等因素共

同决定的^[17]。研究者在正交相位编码方面进行了大量研究,实验验证了正交相位编码对图像的记录^[18]及利用二阶正交相位交织掩模可以实现全息存储功能^[19],提出用正交相位编码的参考光进行全息光存储的复用^[20-21]。此外,通过结合角度、位移等参数复用技术,加密存储的途径大大增加^[22-23]。目前,正交相位加密技术常被用在离轴全息中,离轴全息存储系统抵抗环境干扰的能力较差,系统的抖动导致加密与解密的相位密钥的像素位置无法正常匹配,而正交相位加密技术对参考光相位位置的匹配有着极高的要求,错配的正交相位会导致信息无法抵消,造成信息的泄露。因此,本文将正交相位加密技术应用到同轴全息存储系统^[24-25]中,探究正交相位加密技术在同轴全息存储系统中的应用可能性,并对加密效果作出简单的讨论。

2 基本原理

2.1 正交相位加密原理

正交相位加密技术是一种标准的通信加密技术,具有良好的抗噪性能,能有效提高保密性^[14, 26]。利用Kogelnik^[27]耦合波理论解释其相位作用过程。Kogelnik耦合波理论是20世纪60年代末期出现的一种描述全息图形成和再现的理论模型。该理论模型基于麦克斯韦方程组,通过分析光的传播过程,精确地描述全息图形成和再现的过程。这个理论模型可描述光波在非均匀介质中的传播,而非均匀介质中的

收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-06-05; 录用日期: 2023-07-12; 网络首发日期: 2023-07-22

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0701800)、国家自然科学基金(62105065, U22A2080)、福建省科技重大专项(2020HZ01012)

通信作者: *lindk@fjnu.edu.cn; **xtan@fjnu.edu.cn

折射率分布决定光波的相位。因此, Kogelnik 耦合波理论可以描述相位信息在非均匀介质中的传播。

$$k_s = k_0 \left[-\frac{x_s}{f}, -\frac{y_s}{f}, \sqrt{n_1^2 - \left(\frac{x_s}{f}\right)^2 - \left(\frac{y_s}{f}\right)^2}, \varphi_s \right], \quad (1)$$

$$k_r = k_0 \left[-\frac{x_r}{f}, -\frac{y_r}{f}, \sqrt{n_1^2 - \left(\frac{x_r}{f}\right)^2 - \left(\frac{y_r}{f}\right)^2}, \varphi_r \right], \quad (2)$$

$$k_G = k_s - k_r, \quad (3)$$

式中: k_G 、 k_r 、 k_s 分别为记录光栅、参考光、信号光的矢量; k_0 为真空中的波数; x 、 y 为像素点在二维平面上的

相对位置; f 为物镜的焦距; n_1 为介质的折射率; φ 为相位。假设使用数量为 $2n$ 且初始相位相同 (这里假设为 0) 的参考光相位进行记录。当使用与上述相同的参考光相位进行读取时, 读取参考光相位 (φ_r) 与记录参考光相位 (φ_s) 的相位差 (φ_G) 均为 0, 叠加每一个参考光像素点的再现强度, 再现信号光的总强度为 $2n \cdot \cos(\omega t)$ (ω 为角频率, t 为时间)。然而使用正交相位进行读取时, 读取参考光相位与记录参考光相位的相位差 φ_G 有 n 个是 0, 另外 n 个是 π 。 $2n$ 个参考光像素点的叠加再现强度会因为 n 对正交相位而抵消为 0, 从而实现正交相位加密, 如图 1 所示。

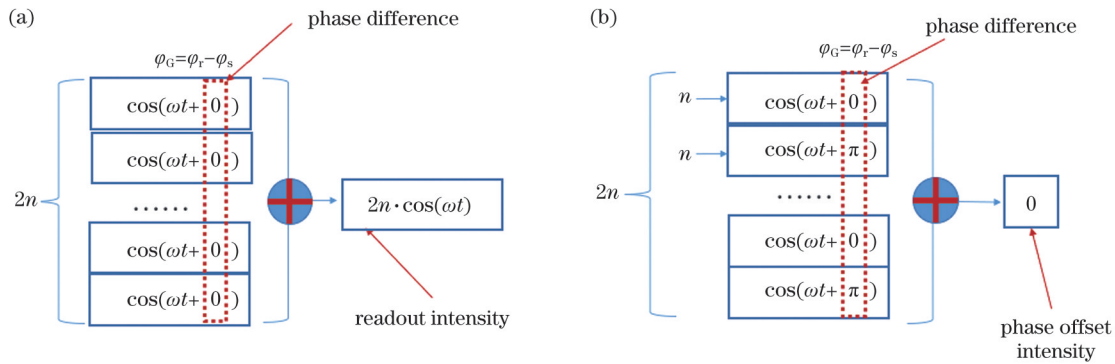


图 1 正交相位加密原理。(a) 正确密钥; (b) 正交密钥

Fig. 1 Principle of orthogonal phase encryption. (a) Correct key; (b) orthogonal key

2.2 正交相位加密的同轴全息存储系统

同轴全息存储系统的原理图如图 2 所示。单纵模绿色激光通过扩束器后变为截面面积为 78.5 mm^2 的平行光。在记录过程中, 利用调制振幅型空间光调制器 (A-SLM) 同步产生强度均匀的信号光和参考光。信号光和参考光经过 L1 后在相位型空间光调制器 (P-SLM) 上成像。根据 2.1 节中介绍的正交相位矩阵的规则, 利用 P-SLM 上传相位编码的参考光相位。为了使整个系统的像素匹配, 将 A-SLM 上 2×2 个点看作一个像素, 将 P-SLM 上 3×3 个点看作一个

像素。相位编码参考光和信号光经过 L2 后到达物镜 (OBJ) 的前焦面。在信息记录过程中, P 偏振态信号光和参考光经过四分之一波片 (QWP) 后成为圆偏振光, 再利用物镜将信号记录在反射式全息存储材料 (RHSM) 上形成全息图。在读取过程中, 利用 A-SLM 和 P-SLM 分别调制读取参考光的形状和相位。参考光和从全息图中读取的信号光再次经过物镜和四分之一波片, 成为 S 偏振光, 接着经过偏振分束器 (PBS), 反射后经过 L3, 最终被电荷耦合器件 (CCD) 相机捕获。

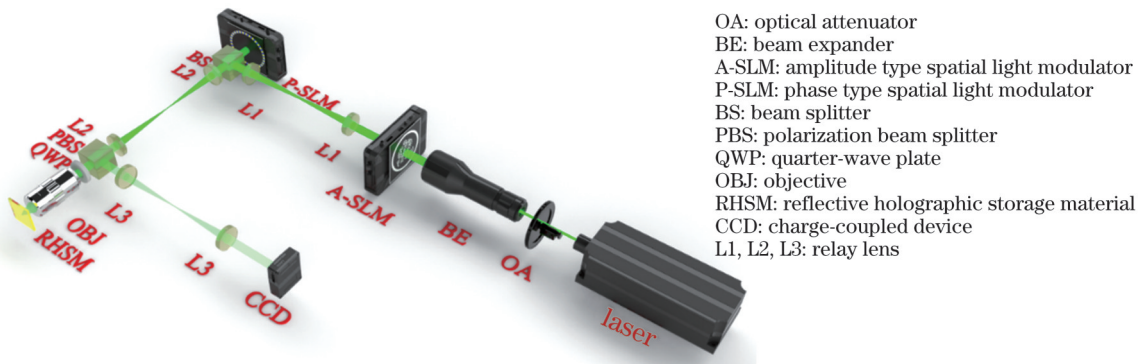


图 2 正交相位加密同轴全息数据存储系统

Fig. 2 Orthogonal phase encrypted-coaxial holographic data storage system

图 3 为反射式全息存储材料的示意图。这种材料具有复合式三层结构: 第一层是玻璃层; 第二层是由聚四氟乙烯 (PTFE) 包围的记录材料, 该记录材料是一

种掺杂菲醌 (PQ) 的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 光敏聚合物^[28-29], 具有灵敏度高、信噪比高、制造成本低的优点; 第三层是反射层。

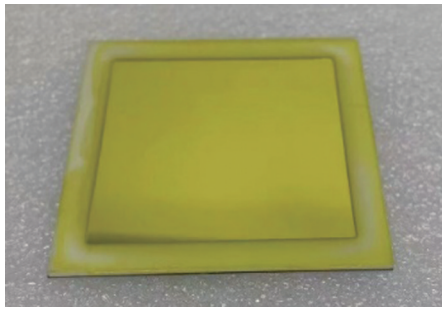


图 3 未曝光的反射式全息存储材料

Fig. 3 Unexposed reflective holographic storage material

2.3 正交相位密钥的生成

在正交编码中,常用哈达玛矩阵生成正交码^[30-31]。通过对哈达玛矩阵的行或列进行选择 and 排列,得到不同的正交码。哈达玛矩阵是一种特殊的矩阵,具有正交性和等距性,利用哈达玛矩阵生成正交相位编码,可以有效地降低码间干扰。哈达玛矩阵元素由 1 和 -1 组成,并且所有列(行)正交,每一列或者行都可以形成正交密钥^[32]。哈达玛矩阵的阶数决定密钥的总量。参考编码单元将根据哈达玛矩阵值 1 或 -1 施加 π 或 0 的相位。参考光的正交相位编码矩阵如表 1 所示,其中 Key 1~Key 8 为相位密钥。当确定相位密钥为 Key 2 时,将表 1 第二列相位上传到与之对应的参考光单元之中。

在本文实验设计的正交相位密钥中,记录密钥与读取密钥呈正交状态,也就是相位差为 0 的单元与相位差为 π 的单元相位正交。利用该正交相位密钥得到再现信号光,相位正交的再现信号光的强度得到抵消。因此,本文实验对参考光与信息光的初始相位不作要求,假设参考光与信息光的初始相位均为 0,这样可避免初始相位参与正交相位密钥的计算,方便实验中调制参考光相位图。

表 1 参考光单元的相位密钥生成

Table 1 Phase key generation of reference optical unit

Reference unit	Key 1	Key 2	Key 3	Key 4	Key 5	Key 6	Key 7	Key 8
Unit 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Unit 2	0	π	π	0	π	0	π	0
Unit 3	0	0	π	π	0	0	π	π
Unit 4	0	π	0	π	π	0	0	π
Unit 5	0	0	0	0	π	π	π	π
Unit 6	0	π	π	0	0	π	0	π
Unit 7	0	0	π	π	π	π	0	0
Unit 8	0	π	0	π	0	π	π	0

2.4 正交相位编码方式

编码是将密钥信息转换成特定形式的过程。在同轴全息存储系统中,正交相位编码方式扮演着至关重要的角色。编码方式的设计直接影响到信息的加密效

率和加密质量,为更好地观察正交相位加密在同轴全息存储系统中的效果,这里采用两种方式进行实验验证。第一种是扇形正交相位编码模式(SOPCR)。相位型空间光调制器的相位编码单元如图 4 所示(本文以 8 位/阶密钥为例)。

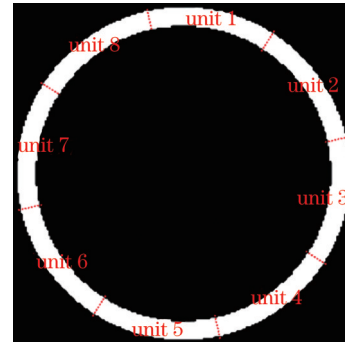


图 4 扇形正交相位编码模式

Fig. 4 Sector orthogonal phase coding mode

图 4 中的亮区是由 A-SLM 产生的具有均匀振幅的参考光区域。P-SLM 负责调制这部分区域的相位,而相位调控区域被顺时针分成 8 个编码单元,每个单元对中间参考光的强度影响都是相同的,同时这种编码方式对空间光调制器的相位处理也是相当简便的。每个编码单元的像素数量相等,这样可保证在正交相位下再现光强度得到完全抵消。每个编码单元的调制相位值由正交相位密钥决定,2.3 节已经介绍了如何生成这些正交相位密钥。

第二种是随机位置正交相位编码模式(ROPCR)。图 5 中的圆环表示振幅型空间光调制器产生的具有均匀振幅的参考光区域。而相位调控区域根据像素的位置被随机分成 8 个编码单元,每个编码单元的像素数量近似相等,这样可保证在正交相位下再现光强度得到完全抵消。相较于第一种扇形编码模式,在该模式中,每个编码单元中可进行相位编码的像素点数量没有变化,然而可进行相位编码的单元的像素点位置被打乱,任意两个相位编码单元的位置相关性被大大削弱,每个编码单元的像素点位置都是由一个随机数生成器产生的,这种随机性可以提高编码的安全性。每

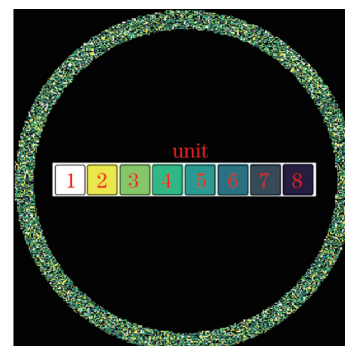


图 5 随机位置正交相位编码模式

Fig. 5 Random orthogonal phase coding mode

个编码单元的调制相位仍然由正交相位密钥决定。

2.5 正交相位编码验证实验

本节将通过设计实验验证正交相位加密的可行性和安全性。正交相位加密是一种常见的对称加密方式,利用同一个正交密钥完成加密和解密动作,每一个正交密钥存储一个信息页,读取过程中利用这个正交密钥得到与所存储的信息光对应的再现光。

首先,为验证正交相位加密的可行性,使用扇形编码方式在同一个点上记录两幅图案[图 6(a)、(b)],记录这两幅图案的正交相位密钥分别是 Key 2 和 Key 3,如图 6(d)、(e)所示,读取时只保留图 6(c)所示的参考光,使用 Key 3 相位密钥进行读取。同样地,随机位置的

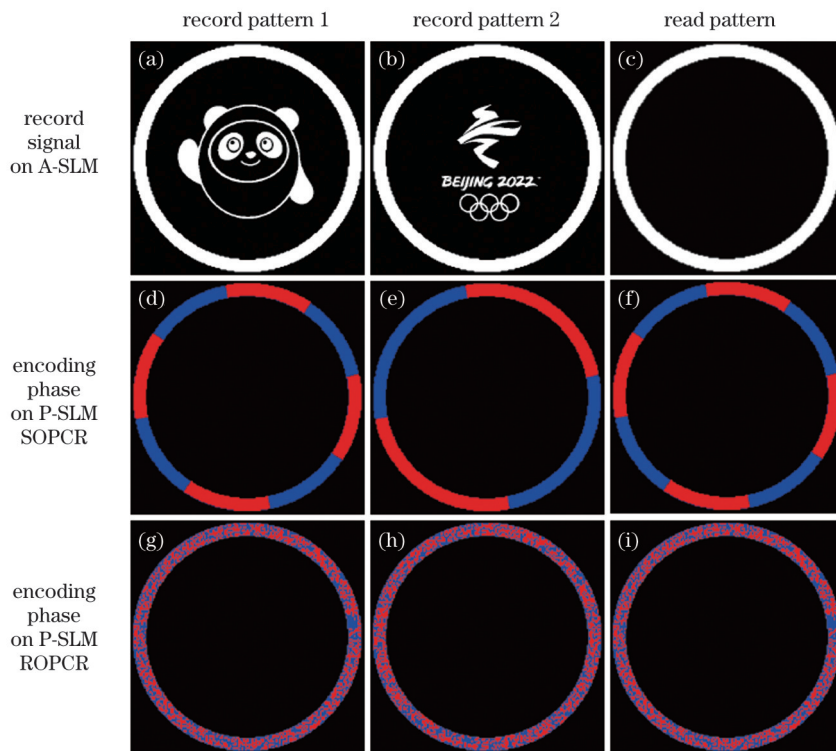


图 6 空间光调制器上载图案

Fig. 6 Upload patterns of SLM

信息的加密存储不仅要完成加密与解密的过程,还要具有安全性。因此需要综合考虑各种因素,采取多种安全措施,以保证信息的安全性。为验证正交相

位编码的安全性,这里将信息光设计成数据页的形式,如图 7 所示,分别使用正交密钥 Key 1~Key 8 将 8 张信号图 $S_1 \sim S_8$ 存入到全息存储材料的同一个点上。

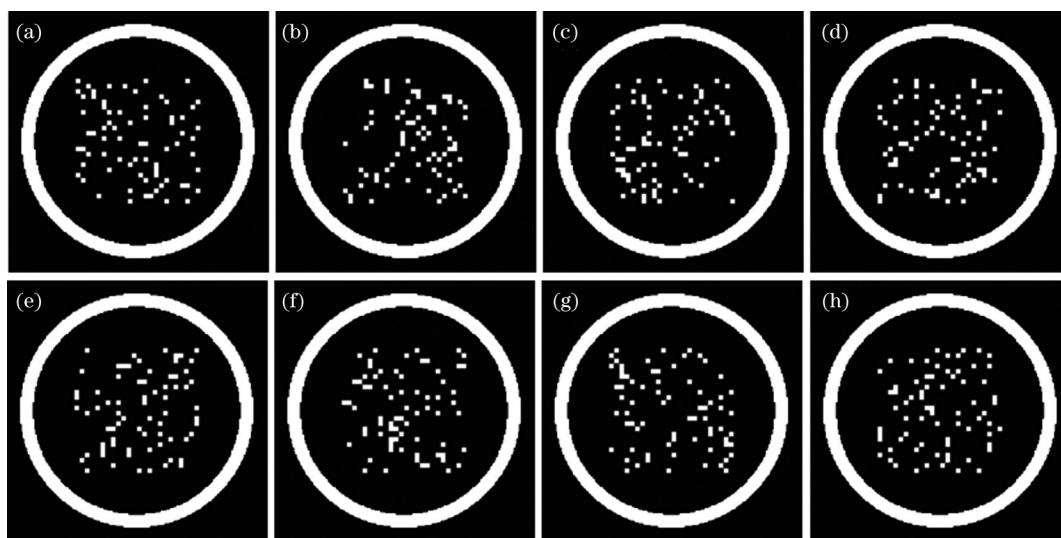


图 7 用于测试安全性的振幅型空间光调制器上载图

Fig. 7 Upload patterns of A-SLM used to test safety

在读取时,使用 8 个密钥依次读取,得到 8 张解密后的再现信息图。本文选择相关系数^[33]和均方误差^[34]来判断安全性。相关系数是一种衡量两个变量之间关系强度的统计指标,可以判断两个变量是否呈正相关、负相关或无关的关系。这里将任意两个密钥读取的再现光信息作比较,以判断信息是否发生泄漏。

$$E_{\text{corr}}(x, y) = \frac{E_{\text{cov}}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (4)$$

式中: E_{corr} 表示相关系数; E_{cov} 表示协方差; σ_x 和 σ_y 表示 x 和 y 方向上的方差。均方误差用于衡量各数据偏离真实值的程度,可以衡量再现图像偏离正确图案的程度。在本文中,对错误密钥读取出的信息与原始信息进行均方误差计算,其均方误差数值越大安全性越高。这里将任意两个密钥读取的再现光信息作比较,用来衡量信息的安全程度。

$$E_{\text{MSE}} = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (5)$$

式中: E_{MSE} 为均方误差; Y_i 为原始再现图案; \hat{Y}_i 为非正确密钥读取图案; i 为像素点的序列值; n_2 为像素点数量。

3 实验结果及分析讨论

如图 8 所示,设计好的信号光[图 6(a)]已经被存储进材料中,并且能够通过正交相位密钥进行读取,得到完整的再现图,完成对称密钥的加密与解密。对于随机位置处正交相位编码方式再现的实验结果[图 8(b)],图像的信息没能达到 100% 的再现,这可能是由信息光分布不均引起的。对于同一区域内的光敏剂,位置相近的信息光存在竞争关系,导致部分再现信息光丢失(或强度太弱)。可以将信息光更换为网格状,或者增加材料中光敏剂的含量。再现信息光的对比度较差,这是因为材料本身的衍射效率无法达到 100%,而且对激光有一定的吸收,所以再现光无法达到理想的对比度。

在图 8(a)中,不该出现的信息[图 6(b)]也出现在读取的信息页中。然而图 8(b)却不存在这种现象,正

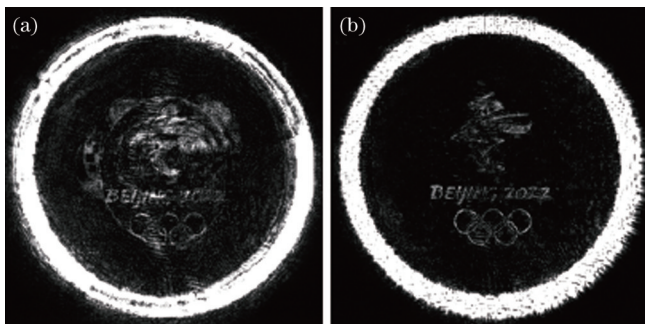


图 8 SOPCR 和 ROPCR 在 Key 3 下的读取结果。(a)SOPCR; (b)ROPCR

Fig. 8 Read results of SOPCR and ROPCR under Key 3. (a)SOPCR; (b)ROPCR

交相位编码单元的分布较分散,而扇形正交相位编码单元的分布则较为集中。这可能是由编码单元的不一致衍射强度引起的,不同区域的像素点受到布拉格兼并效应的影响,存在不同衍射强度,这些额外的兼并强度无法通过正交相位而得到抵消。

在加密性能测试实验中,得到密钥读取的原始再现图案后,以这张原始图像作为相关系数的统计基准,计算与其他密钥读取再现图案的相关系数,结果如表 2、3 所示。这些数据都包含同轴全息存储系统的基础噪声,因此对系统的基础噪声不作单独讨论。SOPCR 的相关系数的均值为 0.57,每个密钥读取的信息光夹杂着其他密钥存储的信息。ROPCR 的相关系数的均值为 0.02,这表明单个密钥几乎不包含其他密钥存储的信息。

表 2 SOPCR 下再现光全息图的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of reconstructed optical holograms under SOPCR

Hologram	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
S_1	1	0.63	0.63	0.56	0.81	0.54	0.55	0.44
S_2		1	0.57	0.59	0.59	0.71	0.32	0.58
S_3			1	0.66	0.58	0.41	0.69	0.63
S_4				1	0.40	0.61	0.59	0.82
S_5					1	0.46	0.48	0.42
S_6						1	0.46	0.58
S_7							1	0.64
S_8								1

表 3 ROPCR 下再现光全息图的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of reconstructed optical holograms under ROPCR

Hologram	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
S_1	1	-0.01	0	0.02	-0.03	-0.04	-0.03	-0.02
S_2		1	0.04	-0.01	-0.04	0.04	-0.05	0.05
S_3			1	-0.03	-0.03	-0.04	-0.03	-0.03
S_4				1	-0.04	0.02	-0.03	0.03
S_5					1	-0.07	-0.06	-0.07
S_6						1	-0.07	-0.07
S_7							1	-0.04
S_8								1

类似地,在加密性能测试实验中,得到密钥读取的原始再现图案后,以这张原始图像作为均方误差的统计基准,计算与其他密钥读取再现图案的均方误差,结果如表 4、5 所示。CCD 相机获得的图像为 8 位灰度图,最大灰度值为 255,系统噪声在计算过程中通过相

减而得到抵消,因此对系统的基础噪声不作单独讨论。SOPCR 的均方误差均值为 537,ROP-PCR 的均方误差均值为 1872,ROP-PCR 的均方误差明显大于 SOP-PCR,这表明在错误密钥读取情况下,ROP-PCR 得到的结果偏离原始再现图案的程度比 SOP-PCR 高。

表 4 SOP-PCR 下再现光全息图的均方误差

Table 4 Mean square errors of reconstructed optical holograms under SOP-PCR

Hologram	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
S_1	0	390	449	502	178	479	680	719
S_2		0	543	498	429	325	894	578
S_3			0	452	495	742	440	533
S_4				0	664	475	572	256
S_5					0	559	645	731
S_6						0	710	570
S_7							0	532
S_8								0

表 5 ROP-PCR 下再现光全息图的均方误差

Table 5 Mean square errors of reconstructed optical holograms under ROP-PCR

Hologram	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
S_1	0	962	916	1501	975	1834	1245	1155
S_2		0	1033	1588	1079	1959	1332	1061
S_3			0	1870	1351	2159	1593	1301
S_4				0	1931	2723	2125	1871
S_5					0	2224	1657	1360
S_6						0	2385	2150
S_7							0	1585
S_8								0

4 结 论

利用正交相位编码能够在同轴全息存储中实现加密与解密。相关系数和均方误差计算结果表明,正交相位编码技术具有一定的安全性,能够实现信息的加密。证明了正交相位加密可以应用在同轴全息存储系统中。同时,在扇形正交相位编码模式下存在串扰问题,在随机位置正交相位编码模式下存在对比度低的问题。未来将研究引起这些问题的原因,进一步提高正交相位加密同轴全息存储系统的安全性与稳定性。

参 考 文 献

- [1] Heanuet J F, Bashaw M C, Hesselink L. Encrypted holographic data storage based on orthogonal-phase-code multiplexing [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(26): 6012-6015.
- [2] van Heerden P J. Theory of optical information storage in solids[J]. *Applied Optics*, 1963, 2(4): 393-400.
- [3] Bashaw M C, Heanue J F, Aharoni A, et al. Cross-talk considerations for angular and phase-encoded multiplexing in volume holography[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1994, 11(9): 1820-1836.
- [4] Koppa P. Phase-to-amplitude data page conversion for holographic storage and optical encryption[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(17): 3561-3571.
- [5] Kim Y, Sim M, Moon I. Secure storage and retrieval schemes for multiple encrypted digital holograms with orthogonal phase encoding multiplexing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 22147-22160.
- [6] Heanue J F, Bashaw M C, Hesselink L. Recall of linear combinations of stored data pages based on phase-code multiplexing in volume holography[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(14): 1079-1081.
- [7] Refregier P, Javidi B. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(7): 767-769.
- [8] Matoba O, Javidi B. Encrypted optical memory system using three-dimensional keys in the Fresnel domain[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(11): 762-764.
- [9] Situ G H, Zhang J J. Double random-phase encoding in the Fresnel domain[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(14): 1584-1586.
- [10] Situ G H, Zhang J J. Multiple-image encryption by wavelength multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(11): 1306-1308.
- [11] Wu Y, Wang J, Chen C, et al. Generation of phase-only Fourier hologram based on double phase method and quantization error analysis[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(5): 7000913.
- [12] Xi S X, Wang X L, Song L P, et al. Experimental study on optical image encryption with asymmetric double random phase and computer-generated hologram[J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 8212-8222.
- [13] Sun P, Chang S Q, Liu S Q, et al. Holographic near-eye display system based on double-convergence light Gerchberg-Saxton algorithm[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10140-10151.
- [14] Denz C, Pauliat G, Roosen G, et al. Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encoding method[J]. *Optics Communications*, 1991, 85(2/3): 171-176.
- [15] Denz C, Pauliat G, Roosen G, et al. Potentialities and limitations of hologram multiplexing by using the phase-encoding technique[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(26): 5700-5705.
- [16] Lembcke J, Denz C, Tschudi T. General formalism for angular and phase-encoding multiplexing in holographic image storage[J]. *Optical Materials*, 1995, 4(2/3): 428-432.
- [17] Denz C, Mueller K O, Visinka F, et al. Beyond volume holographic storage: applications of phase-coded multiplexing to image processing and encryption[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4110: 254-261.
- [18] 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.
- [19] Li J H, He M Z, Zheng T X, et al. Two-dimensional shift-orthogonal random-interleaving phase-code multiplexing for holographic data storage[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(24): 5562-5567.
- [20] 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.
- [21] Cao L C, Liu J Q, Li J H, et al. Orthogonal reference pattern multiplexing for collinear holographic data storage[J]. *Applied Optics*, 2013, 53(1): 1-8.
- [22] Miller B E, Takashima Y. Cavity-enhanced eigenmode and angular hybrid multiplexing in holographic data storage systems[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29465-29476.
- [23] Lin W K, Chen L P, Zhou S K, et al. Electrically tunable diffuser for holographic multiplexing storage[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(7): 075105.
- [24] Tan X D, Lin X, Wu A A, et al. High density collinear holographic data storage system[J]. *Frontiers of Optoelectronics*,

- 2014, 7(4): 443-449.
- [25] Lin X A, Liu J P, Hao J Y, et al. Collinear holographic data storage technologies[J]. Opto-Electronic Advances, 2020, 3(3): 190004.
- [26] Taketomi Y, Ford J E, Sasaki H, et al. Incremental recording for photorefractive hologram multiplexing[J]. Optics Letters, 1991, 16(22): 1774-1776.
- [27] Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. The Bell System Technical Journal, 1969, 48(9): 2909-2947.
- [28] Yu D, Liu H P, Jiang Y Y, et al. Holographic storage stability in PQ-PMMA bulk photopolymer[J]. Optics Communications, 2010, 283(21): 4219-4223.
- [29] Liu Y, Fan F L, Tan X D. SiO₂ NPs-PQ/PMMA photopolymer material doped with a high-concentration photosensitizer for holographic storage[J]. Polymers, 2020, 12(4): 816.
- [30] Chung F R K, Salehi J A, Wei V K. Optical orthogonal codes: design, analysis and applications[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1989, 35(3): 595-604.
- [31] Seberry J. Existence of hadamard matrices and asymptotic existence results for orthogonal designs[M]//Seberry J. Orthogonal designs: hadamard matrices, quadratic forms and algebras. Cham: Springer, 2017: 305-333.
- [32] Horadam K J. Chapter three. Applications in signal processing, coding and cryptography[M]//Hadamard matrices and their applications. Princeton: Princeton University Press, 2007: 27-61.
- [33] Bartko J J. The intraclass correlation coefficient as a measure of reliability[J]. Psychological Reports, 1966, 19(1): 3-11.
- [34] Levinson N. The Wiener (root mean square) error criterion in filter design and prediction[J]. Journal of Mathematics and Physics, 1946, 25(1/2/3/4): 261-278.

Study on Collinear Holographic Storage System with Orthogonal Phase Encryption

Song Haiyang^{1,2}, Li Jianan^{1,2}, Fan Linlin^{1,2}, Lin Dakui^{1,2*}, Wang Kun^{1,2},
Lin Xiao^{1,2}, Tan Xiaodi^{1,2**}

¹Key Laboratory of OptoElectronic Science and Technology for Medicine of Ministry of Education, College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, Fujian, China;

²Fujian Provincial Key Laboratory of Photonics Technology, College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, Fujian, China

Abstract

Objective Holographic data storage (HDS) has the characteristics of large storage capacity and fast data transmission rate, which makes it a sustainable development technology in the era of big data. Phase-coded holographic data storage systems have attracted great attention because of such advantages as the high efficiency of light energy, stable structure, and easy modulation by a phase spatial light modulator (SLM). An orthogonal-phase cryptographic collinear holographic storage system is a new optical encryption technique that uses the optical interference principle of laser beams to write and read data and orthogonal phase encryption to ensure data security. Currently, orthogonal phase encryption techniques are often used in off-axis holography. Off-axis holographic storage systems are less resistant to environmental interference, whereby the jitter of the system causes the positions of the phase-key pixels used for encryption and decryption to fail to match properly, leading to information leakage. Therefore, in this study, we attempt to apply and explore the possibility of using orthogonal phase encryption with collinear holographic storage systems. Orthogonal phase encryption can protect the stored data from illegal access and theft to ensure data security. This is critical for maintaining the confidentiality of sensitive information involving personal privacy, trade secrets, and similar information.

Methods Based on Kogelnik's coupled wave theory, the propagation of phase during the formation and reproduction of holograms is accurately described by analyzing the propagation process of light. The recording key and the reading key are in an orthogonal state, that is, the number of units with phase difference of 0 is equal to the number of units with phase difference of π , so that the reconstruction intensity of the two parts of the signal light is cancelled through the phase orthogonality. In the system investigated in this study, the collinear system stores the signal light in the pagination encryption by modulating the reference wave with different encoding units. In this study, we propose two encryption modes for reference wave coding. The sector orthogonal phase-coding reference wave mode (SOPCR) divides the reference wave into eight units per sector, while the random orthogonal phase-coding reference wave mode (ROPCR) divides the reference wave into eight units randomly. The orthogonal phase code is generated from the Hadamard matrix and uploaded to the reference wave unit via the SLM in the form of phase keys. The feasibility of orthogonal phase encryption in a collinear holographic storage system is verified by recording and reading the encrypted images. The safety of SOPCR and ROPCR is evaluated by correlation coefficient (Corr) and mean square error (MSE) analyses.

Results and Discussions Experimental results show that both methods can complete the encryption and decryption process using orthogonal phase coding. As shown in Fig. 8, the designed signal light [Fig. 6(a)] is stored in the material and can be read out by the orthogonal phase key to complete the encryption and decryption function of the phase key. Due to the presence of crosstalk noise between pages, the reconstructed hologram [Fig. 8(a)] cannot achieve the ideal reconstruction effect, and there is a crosstalk hologram. Because the diffraction efficiency of the material itself cannot reach 100%, the reconstructed hologram [Fig. 8(b)] cannot

achieve the ideal contrast and reconstruction effect. The correlation coefficient and mean-square error are used to evaluate the encryption performance of the two methods. The original reconstructed holograms of SOPCR and ROPCR are used as references for correlation coefficient and MSE since neither hologram achieves 100% diffraction efficiency. The correlation coefficients (Table 2) of SOPCR and ROPCR are 0.57 and 0.02, and the mean square errors (Table 3) of SOPCR and ROPCR are 537 and 1872, respectively. The correlation coefficients obtained by SOPCR are all higher than those obtained by ROPCR, while the mean square errors are all lower than those obtained by ROPCR. The crosstalk of the reconstructed holograms obtained by SOPCR is larger and the security of ROPCR is higher.

Conclusions Orthogonal phase coding can perform the basic functions of encryption and decryption in collinear holographic storage. Systems with random orthogonal reference wave modes are more secure, as shown by correlation coefficient and mean square error tables. Orthogonal phase coding techniques have certain security properties and can enable information encryption. It has been shown that orthogonal phase encryption can be applied in collinear holographic storage systems. Moreover, there is a crosstalk problem in the sector orthogonal phase-coding mode and a low contrast problem in the random orthogonal phase-coding mode. Future work will also focus on the causes of these problems to improve the security and stability of orthogonal phase encrypted holographic storage systems.

Key words holography; holographic data storage; coaxial system; orthogonal phase; encryption