

封面文章

三维空间轨道角动量全息*

贾谊成 张福荣 张景风 孔令军† 张向东

(北京理工大学物理学院, 先进光电量子结构设计与测量教育部重点实验室,
纳米光子学与超精密光电系统北京市重点实验室, 北京 100081)

(2023 年 11 月 19 日收到; 2024 年 3 月 6 日收到修改稿)

光的轨道角动量自由度已被作为一种新的信息载体用于光全息信息处理技术之中. 然而, 目前关于轨道角动量全息技术的研究主要集中在二维轨道角动量全息, 即重构的二维全息图像位于三维空间中的某一个平面内. 如何进一步实现三维空间轨道角动量全息技术并将其用于增加全息通信的信息容量仍然是一个空白. 本文基于轨道角动量自由度和重构的二维图像在三维空间中的位置自由度, 实现了三维空间轨道角动量全息技术. 换言之, 在我们实现的三维空间轨道角动量全息中, 目标物体图像的获得不仅要求使用正确的解码轨道角动量态, 还要求在正确的空间位置来探测物体的图像. 此外, 还进一步研究了三维空间轨道角动量全息复用技术, 并指出该复用技术可用于信息加密. 与传统的二维轨道角动量全息技术相比, 三维空间轨道角动量全息技术使用了额外的自由度, 即成像的空间位置. 因此, 基于三维空间轨道角动量全息技术的加密方案可以进一步提高信息的安全等级. 我们的理论模拟结果和实验结果验证了三维空间轨道角动量全息技术以及三维空间轨道角动量全息加密技术的可行性.

关键词: 轨道角动量, 光全息, 光加密**PACS:** 42.40.-i, 42.40.Jv, 42.30.-d, 42.79.Sz**DOI:** 10.7498/aps.73.20231822

1 引言

全息最初由 Gabor^[1] 提出, 如今已成为现代光学中的一项重要工具, 广泛应用于三维显示^[2-8]、光学显微^[9-11]、光学加密^[12-15]、信息存储^[16]、拓扑结构的生成^[17-20] 等领域. 光的不同自由度, 如波长^[21-24]、时间^[25,26] 和偏振^[27-29] 等, 已被作为信息不同载体, 用于增加全息系统的信道容量.

近年来, 光的轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 自由度引起了广泛兴趣. 由于 OAM 理论上具有无穷多的状态且不同的 OAM 态之间相互正交, 因此可以用于高维希尔伯特空间中编码信息. 这带来了一系列应用, 从光通信^[30-34] 到高维量子纠缠^[35-40]. 令人兴奋的是, 2019 年, OAM 被

用作全息中的新自由度, 用于信息处理, 以进一步提高基于超表面的光通信的带宽^[41]. 此后, 对 OAM 全息的研究引起了广泛关注. 2020 年, Fang 等^[42] 实现了高维 OAM 全息, 并将其应用于全息加密, 提高了加密的安全等级. 同年, Ren 等^[43] 基于超表面在动量空间中实现了复幅度 OAM 全息, 从而实现了无需空间扫描的光学全息视频显示. 另一方面, Zhou 等^[44] 基于超表面实现了偏振加密的 OAM 多路复用全息. 2021 年, Fang 等^[45] 在基波和二次谐波中同时实现了 OAM 全息成像, 并实验验证了该非线性全息技术的可行性. 此外, Zhu 等^[46] 提出了超密集完美 OAM 全息, 其中 OAM 模式在径向位置自由度和角向自由度均可参与信息的携带. 2022 年, Wang 等^[47] 提出了部分 OAM 全息, 将 OAM 模式划分为多个部分, 并用不同的部分模式作为信息

* 国家自然科学基金 (批准号: 12374324, 12004038) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: konglj@bit.edu.cn

的载体对目标图像进行全息编码. 2023 年, Shi 等^[48]提出了伪非相干方法, 通过时间复用演示了类似于相干方法的解决方案, 消除了串扰, 大大放宽了对 OAM 全息采样条件的约束, 从而显著提高了分辨率. Zhang 等^[49]理论提出并实验证明了 Laguerre-Gaussian (LG) 全息, 并实现了 (radial index, OAM) 跨度范围从 (1, -15) 到 (7, 15) 的可用于高安全性光学加密的 26 位 LG 多路复用全息. 基于 LG 全息, 他们构建了一个高容量的全息信息系统. 此外, 基于高维 OAM 纠缠, 高维量子全息也得以实现. 高维 OAM 量子全息对经典噪声具有很好的鲁棒性, 此外, 量子叠加态的引入可进一步提高全息成像加密的安全等级^[38]. 然而, 这些研究仅集中在二维 OAM 全息领域, 重构的全息图像仅仅位于三维空间中的某个特定的二维平面内. 虽然有些结果中展示了两个平面^[43]的 OAM 全息, 但对于三维空间 OAM 全息的研究仍然相对有限. 如何进一步应用三维空间 OAM 全息以增加全息通信的信息容量、提高全息加密的安全性仍然是一个空白.

本文在理论和实验上实现了三维空间 OAM 全息技术. 在三维空间 OAM 全息中, 目标物体图像的获得不仅要求使用正确的解码 OAM 态, 还要求在正确的空间位置来探测物体的图像. 此外, 我们还将三维空间 OAM 全息技术应用于信息加密. 与二维 OAM 全息相比, 三维空间 OAM 全息技术具有额外的自由度, 因此在提高信息容量的同时, 还可以进一步提高信息安全的等级.

2 三维空间 OAM 全息设计与重构结果

实现二维 OAM 全息的关键在于能够使得不同的 OAM 态展现出不同的全息信息. 因此, 在传统的二维 OAM 全息中, 首先将目标图像与二维 Dirac 梳状采样阵列相乘以获得保留 OAM 模式特征的全息图. 这样, 在全息图像的重构过程中, 结果即为目标物体的点阵图像. 由离散点构成的点阵图像中的每个点都可以很好地保留入射光束所携带的 OAM 态, 使其不会因为彼此重叠而被破坏. 此外, 研究表明拓扑荷数为 l 的 OAM 光场 $|+l\rangle$ 只能将拓扑荷数为 $-l$ 的 OAM 光场 $|-l\rangle$ 转换为具有实心斑点强度分布的基模高斯光束 $|0\rangle$ ^[42]. 如果在探测过程中, 只探测点阵图像中每个点的中心位

置的强度分布, 即可实现全息中的 OAM 模式的选择, 进而使得 OAM 自由度可以在全息中作为信息的载体.

为了实现三维空间 OAM 全息, 不仅需要 OAM 自由度用作全息中的信息载体, 还需要控制重构图像在三维空间中的位置, 即重构图像与 OAM 全息图之间的距离 (z), 这一点可基于 Fresnel 波带板 (Fresnel zone plate, FZP) 来实现. 事实上, FZP 起到了透镜的作用, 可以将物体的重建图像聚焦在特定平面上. 该特定平面和 FZP 之间的距离被定义为 FZP 的“焦距” (f_{FZP}). 本文巧妙地将 OAM 模式的选择技术和 Fresnel 波带板技术结合使用, 设计了一种可以实现三维空间 OAM 全息的方法.

如图 1 所示, 首先将目标图像 (如第 1 列中显示的字母“O”, ..., “A”, ..., “M”) 与二维 Dirac 梳状采样阵列 (第 2 列) 相乘, 以获取可以保留 OAM 模式特征的全息图 (第 3 列). 然后, 通过将 OAM 态的螺旋相位 (第 4 列) 与保留 OAM 模式特征全息图相结合, 生成 OAM 选择性全息图 (第 5 列). 最后, 将 FZP 的相位分布图 (第 6 列) 与 OAM 选择性全息图相结合, 以获得用于三维空间 OAM 全息的全息图 (第 7 列). 不同的 FZP 具有不同的“焦距” (f_{FZP}), 并将重建的物体全息图像聚焦在不同的平面上 (第 8 列).

为了证明本方案的可行性, 展示了一个示例. 图 2(a) 为示例中所选用的 6 个物体, “3DOAMH”. 首先, 基于图 1 中描述的方法, 获得 6 个目标图像的三维空间 OAM 全息图, 如图 2(b) 所示. 这里, 用于编码的 OAM 态分别为 $|1\rangle$, $|2\rangle$, $|3\rangle$, $|4\rangle$, $|5\rangle$ 和 $|6\rangle$, 用于编码的 FZP 的“焦距”分别为 $f_{\text{FZP}} = 100 \text{ mm}$, $f_{\text{FZP}} = 200 \text{ mm}$, $f_{\text{FZP}} = 300 \text{ mm}$, $f_{\text{FZP}} = 400 \text{ mm}$, $f_{\text{FZP}} = 500 \text{ mm}$ 和 $f_{\text{FZP}} = 600 \text{ mm}$. 在图像的重构过程中, 通过使用正确的解码 OAM 态 $|-1\rangle$, $|-2\rangle$, $|-3\rangle$, $|-4\rangle$, $|-5\rangle$ 和 $|-6\rangle$, 即可在确定的空间位置处 $z = 100 \text{ mm}$, $z = 200 \text{ mm}$, $z = 300 \text{ mm}$, $z = 400 \text{ mm}$, $z = 500 \text{ mm}$ 和 $z = 600 \text{ mm}$ 分别获取 6 个物体的清晰的像. 理论模拟结果如图 2(c) 所示.

实验装置如图 3(a) 所示. SLM-1 和 SLM-2 代表两个相位型空间光调制器. 一束线偏振 (linear polarization, LP) 入射光场照射到加载有螺旋相位

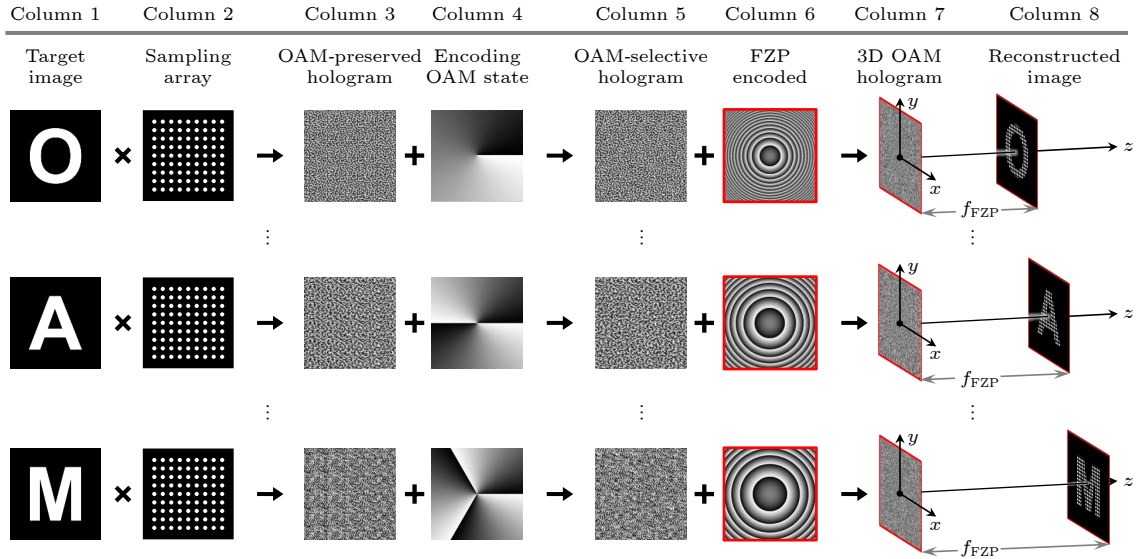


图 1 用于实现三维空间 OAM 全息的全息图设计方案. 通过将目标图像与二维 Dirac 梳状采样阵列相乘即可获得能够保留 OAM 特征的全息图; 然后在保留 OAM 全息图上添加 OAM 态的螺旋相位分布, 生成具有 OAM 特征选择性的全息图; 最后, 使用 FZP 对 OAM 选择性全息图进行编码, 即可获得用于三维空间 OAM 全息的全息图. 这里, FZP 的“焦距” (f_{FZP}) 控制着重构出的全息图像在三维空间中的位置.

Fig. 1. Design of the holograms of three-dimensional (3D) spatial OAM holography. The OAM-preserved holograms are obtained by multiplying the target images with the two-dimensional Dirac comb sampling array. Then, the OAM-selective holograms are generated by adding a phase function of OAM modes onto the OAM-preserved hologram. 3D spatial OAM-selective holograms are obtained by encoding the OAM-selective holograms with the Fresnel zone plates (FZP). The positions of the reconstructed holographic images are controlled by the focal lengths of FZP (f_{FZP}).

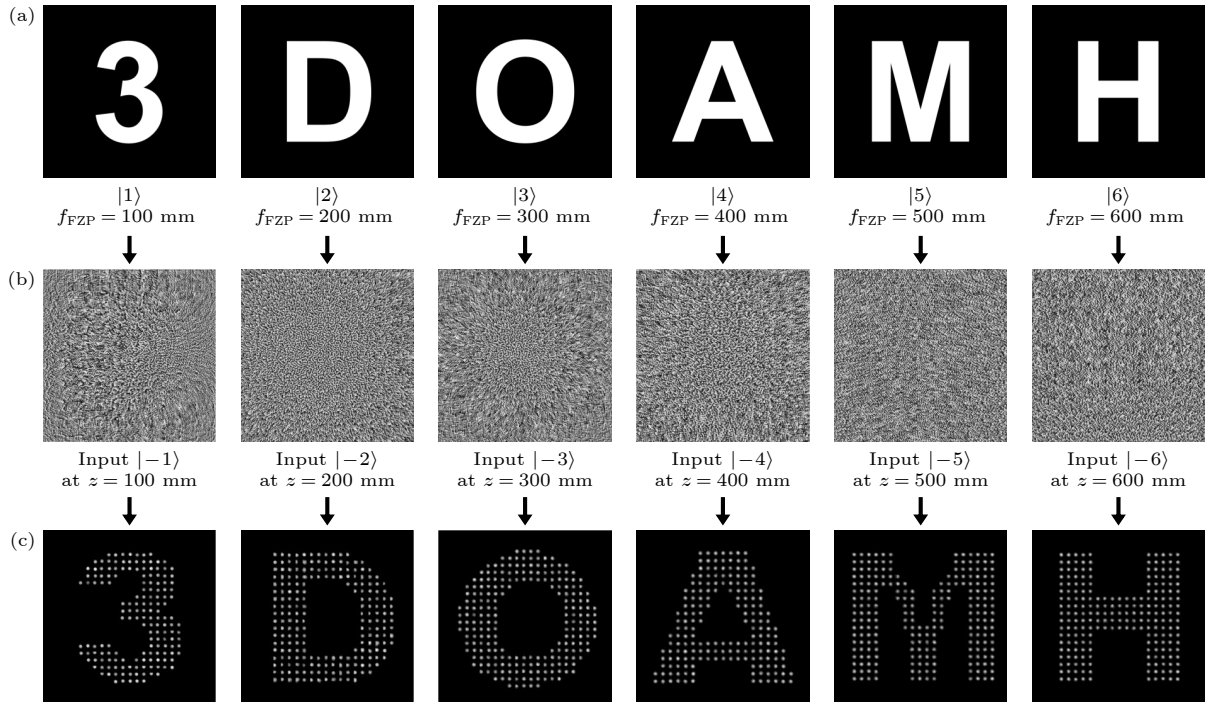


图 2 三维空间 OAM 全息的理论模拟结果 (a) 理论模拟中选用的 6 个目标图像; (b) 6 个目标图像的三维空间 OAM 全息图; (c) 三维空间 OAM 全息中, 6 个图像重构的理论模拟结果.

Fig. 2. Simulation results of the reconstructed images of 3D spatial OAM holography: (a) The six target images; (b) holograms of 3D spatial OAM holography of six target images; (c) simulation results of reconstructed images in 3D spatial OAM holography.

全息图的 SLM-1 上, 用于制备想要的 OAM 态光场. SLM-2 位于 $z = 0$ 处, 用于加载三维空间 OAM 全息的全息图. 由透镜 L1 和 L2 组成的 $4f$ 系统将 SLM-1 成像到 SLM-2 上. 当入射在 SLM-2 的光场携带正确的解码 OAM 态时, 即可在正确的空间位置探测到物体的像. 实验结果如图 3(b) 所示, 与理论模拟的结果相一致. 理论和实验验证了我们提出的三维空间 OAM 全息方案的可行性.

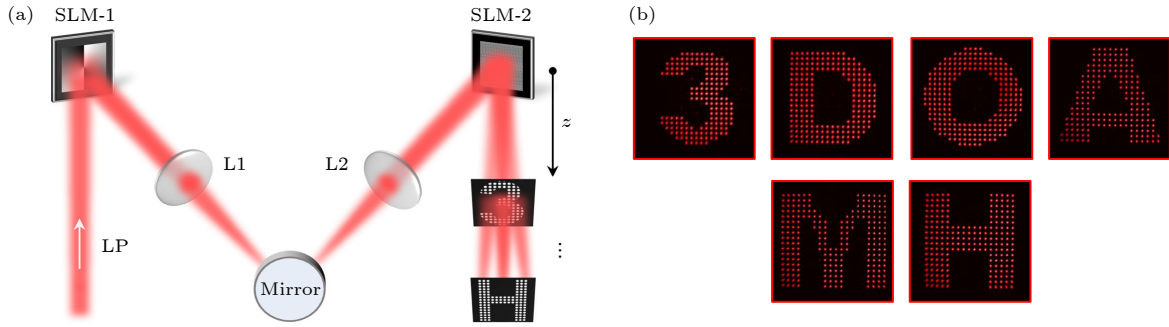


图 3 三维空间 OAM 全息的实验装置及其重构结果 (a) 实验装置. 波长 633 nm、输出功率 10 mW 线偏振连续激光经过 SLM-1 调制后携带 OAM 态; 由透镜 L1 和 L2 组成的 $4f$ 系统将 SLM-1 成像到 SLM-2 上; 三维空间 OAM 全息的全息图加载于 SLM-2 上. 携带 OAM 态的光场经 SLM-2 衍射后, 在三维空间中重构出的目标物体的全息图像; (b) 与图 2(c) 中一一对应的三维空间 OAM 全息图像重构的实验结果

Fig. 3. Experiments and results of 3D spatial OAM hologram reconstruction. (a) Experimental setup. The light source is a continuous-wave laser operating at 633 nm with an output power of ~ 10 mW. The incident light, after modulated by SLM-1, carries the desired OAM state. A $4f$ system consisted of lenses L1 and L2 images SLM-1 onto the SLM-2. The holographic images of objects will be reconstructed in 3D space after the light field carrying OAM state is diffracted by SLM-2. (b) The experimental results of 3D spatial OAM holographic image reconstruction, which corresponds to the simulation results in Fig. 2 (c).

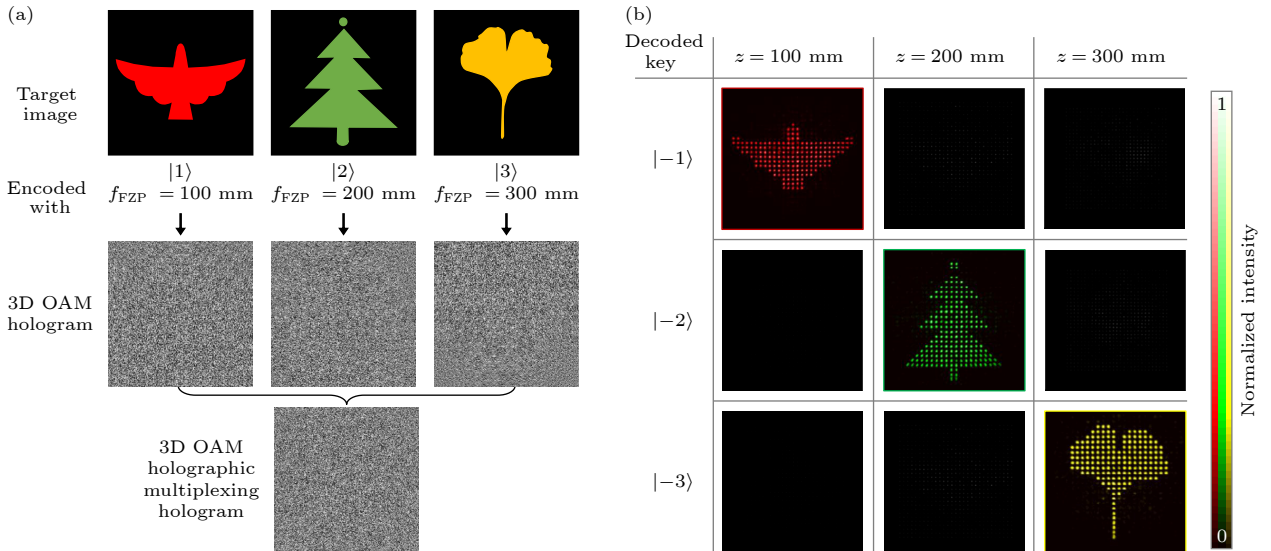


图 4 三维空间 OAM 多路复用全息 (a) 三维空间 OAM 多路复用全息的全息图设计; (b) 三维空间 OAM 多路复用全息的重构的实验结果. 只有当入射光束具备正确的 OAM 态, 且在正确的全息图像重构平面内时, 才会出现清晰的图像. 这里, 每一行的三个实验数据已做了归一化处理

Fig. 4. 3D spatial OAM holographic multiplexing technology. (a) Design of the holograms for 3D spatial OAM holographic multiplexing technology. (b) The experimental results for the 3D spatial OAM holographic multiplexing technology. Only when the incident beam has the correct OAM state and is in the correct holographic image reconstruction plane, will a clear image appear. Here, the three experimental data in each row have been normalized.

用于编码的 FZP 分别为 $f_{\text{FZP}} = 100 \text{ mm}$, $f_{\text{FZP}} = 200 \text{ mm}$ 和 $f_{\text{FZP}} = 300 \text{ mm}$. 将这三个 OAM 选择性全息图叠加在一起, 即可设计出一个三维空间 OAM 全息多路复用全息图.

在解码过程中, 每个像素中都很好地保持了 OAM 态的复振幅分布特性和 OAM 态的正交性. 因此, 对于给定的 OAM 态 $|+l\rangle$, 只能将 OAM 态 $| - l\rangle$ 转换为在给定图像平面上具有实心斑点强度分布的基模高斯光束. 重构图像的实验结果如图 4(b) 所示. 很明显, 只有当入射在复用全息图上的光场为 $| - 1\rangle$ OAM 态, 且探测平面位于 $z = 100 \text{ mm}$ 时, 鸽子的图像才能被重构出来. 类似地, 只有当入射在复用全息图上的光场具有 $| - 2\rangle$ OAM 态, 且探测平面位于 $z = 200 \text{ mm}$ 时, 松树的图像才能被重构出来; 而当入射光场具有 $| - 3\rangle$ OAM 态, 且探测平面位于 $z = 300 \text{ mm}$ 时, 叶子的图像可以被重构出来. 这些结果表明, 只有使用正确的解码 OAM 态, 目标物体的图像才能在正确的位置平面上重构出来. 由于图像平面的位置, 是由三维空间 OAM 全息的全息图和重构全息图像之间的距离 (z) 所决定, 因此该距离可被作为在全息中加密信息的一个独立的自由度.

与二维 OAM 全息相比, 我们提出的三维空间 OAM 全息技术具有一个额外的自由度 (z), 因

此该技术可在二维 OAM 全息的基础上 [42], 进一步提高 OAM 全息的信息容量和全息加密的安全性. 信息容量提高的多少取决于自由度 (z) 的维度的高低. 研究表明, 决定自由度 (z) 的维度高低的因素主要有两方面. 一方面在于对不同维度之间的串扰的要求的高低, 另一方面在于 OAM 全息图的尺寸和分辨率. 在后者相同的条件下, 所选用的自由度 (z) 的维度越高, 即相邻的两幅全息图像的间距越小, 不同维度所携带的重构图像之间的串扰越高. 以 OAM 全息图的尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 分辨率为 $10000/\text{mm}^2$ 作为例子, 在图 5 进一步展示了不同重构图像间距下, 重构图像之间的串扰情况. 这里, 三个目标图像依然是鸽子、松树和叶子, 用于编码的 OAM 态分别为 $|1\rangle$, $|2\rangle$ 和 $|3\rangle$, 而用于编码的 FZP 分别为 $f_{\text{FZP}} = z_1$, $f_{\text{FZP}} = z_2$ 和 $f_{\text{FZP}} = z_3$. 其中 $(z_1, z_2, z_3) = (100 \text{ mm}, 200 \text{ mm}, 300 \text{ mm})$, $(100 \text{ mm}, 190 \text{ mm}, 280 \text{ mm})$, $(100 \text{ mm}, 180 \text{ mm}, 260 \text{ mm})$, $(100 \text{ mm}, 170 \text{ mm}, 240 \text{ mm})$, $(100 \text{ mm}, 160 \text{ mm}, 220 \text{ mm})$, $(100 \text{ mm}, 150 \text{ mm}, 200 \text{ mm})$ 或 $(100 \text{ mm}, 140 \text{ mm}, 180 \text{ mm})$. 在解码过程中, 入射在复用全息图上的光场为 $| - 1\rangle$ OAM 态, 探测平面位于 $z = z_1$, $z = z_2$ 和 $z = z_3$ 三种情况. 为了定量地表征串扰的大小, 这里引入一个参数 $R = \bar{I}_{\text{pigeon}} / \bar{I}_{\text{non-pigeon}}$, 其中, \bar{I}_{pigeon} 代表鸽子区

Encoded key	$z_1 = 100 \text{ mm}$ $z_2 = 200 \text{ mm}$ $z_3 = 300 \text{ mm}$	$z_1 = 100 \text{ mm}$ $z_2 = 190 \text{ mm}$ $z_3 = 280 \text{ mm}$	$z_1 = 100 \text{ mm}$ $z_2 = 180 \text{ mm}$ $z_3 = 260 \text{ mm}$	$z_1 = 100 \text{ mm}$ $z_2 = 170 \text{ mm}$ $z_3 = 240 \text{ mm}$	$z_1 = 100 \text{ mm}$ $z_2 = 160 \text{ mm}$ $z_3 = 220 \text{ mm}$	$z_1 = 100 \text{ mm}$ $z_2 = 150 \text{ mm}$ $z_3 = 200 \text{ mm}$	$z_1 = 100 \text{ mm}$ $z_2 = 140 \text{ mm}$ $z_3 = 180 \text{ mm}$	
Decoded key	$z = z_1$	7.82	7.82	7.93	7.94	8.21	7.95	8.05
	$z = z_2$	2.05	2.06	2.39	2.39	2.51	3.73	5.54
	$z = z_3$	2.08	2.13	2.24	2.48	2.61	3.77	5.33

图 5 在三维空间 OAM 全息中, 全息重构图像的间距对串扰的影响. 第一行表示用于编码的三个 FZP 的“焦距” $f_{\text{FZP}} = z_1$, $f_{\text{FZP}} = z_2$ 和 $f_{\text{FZP}} = z_3$ 的大小. 在重构的结果中, 每一个重构图像的左上角的数字为该图像对应的参数 $R = \bar{I}_{\text{pigeon}} / \bar{I}_{\text{non-pigeon}}$ 的值. \bar{I}_{pigeon} 和 $\bar{I}_{\text{non-pigeon}}$ 分别代表鸽子区域和非鸽子区域的强度分布的平均值

Fig. 5. Influence of the distances among the holographic reconstructed images on crosstalk in 3D spatial OAM holography. The first line represents the values of the “focal length” of the three FZPs used for encoding, $f_{\text{FZP}} = z_1$, $f_{\text{FZP}} = z_2$, and $f_{\text{FZP}} = z_3$. In the reconstructed results, the number in the upper left corner of each image represents its value of the parameter $R = \bar{I}_{\text{pigeon}} / \bar{I}_{\text{non-pigeon}}$, where among them, \bar{I}_{pigeon} represents the average intensity value in the pigeon areas and $\bar{I}_{\text{non-pigeon}}$ represents the average intensity distribution in non-pigeon areas.

域的强度分布的平均值, $\bar{I}_{\text{non-pigeon}}$ 代表非鸽子区域的强度分布的平均值. 由于目标图像鸽子是加载在重构平面 z_1 处的, 所以在 z_1 处重构出的全息图像的 R 越大越好; 而在 z_2, z_3 处重构出的全息图像的 R 越大则说明串扰越大. 图 5 结果表明, 随着编码间距的不断减小, 重构图像的串扰越大, 被加密的目标物体的图像越清晰, 安全性越低. 当 $\Delta z = 50$ mm 时, 在 z_2 和 z_3 处重构出的全息图像的 R 分别为 3.73 和 3.77, 目标物体鸽子的图像已清晰可见. 在实际应用中, 串扰需要控制在一定的范围内; 因此, 连续变化的自由度 (z) 只能选取离散的值. 在要求 $R < 3$ 的情况下, 在 1000 mm 的图像重构空间范围内, 三维空间 OAM 全息中, 自由度 z 的最大维度约 $1000/60 \sim 16$. 此外, 本文研究表明, OAM 全息图的尺寸越大、分辨率越高, 允许的全息重构图像之间的间距越小, 自由度 z 的最大维度越高, OAM 全息的信息容量越大、全息加密的安全性越高.

4 结 论

本文通过同时利用光的 OAM 自由度和重构图像所在的空间位置自由度 (z) 作为信息载体, 实现了三维空间 OAM 全息. 首先, 设计了使用采样阵列、OAM 态和 Fresnel 波带板三者编码的三维空间 OAM 全息的全息图, 并从原理上证明了三维空间 OAM 全息的可行性. 然后, 实现了三维空间 OAM 多路复用全息技术. 由于三维空间 OAM 全息比传统的二维 OAM 全息利用了额外的自由度, 三维空间 OAM 全息加密具有更高的信息容量和安全性. 我们的工作拓展了 OAM 全息的研究领域, 为全息加密提供了新的途径.

参考文献

[1] Gabor D 1948 *Nature* **161** 777
 [2] Blanche P A, Bablumian A, Voorakaranam R, et al. 2010 *Nature* **468** 80
 [3] Huang L, Chen X, Mühlenbernd H, et al. 2013 *Nat. Commun.* **4** 2808
 [4] Li X, Ren H, Chen X, et al. 2015 *Nat. Commun.* **6** 6984
 [5] Wakunami K, Hsieh P Y, Oi R, et al. 2016 *Nat. Commun.* **7** 12954
 [6] Pégard N C, Mardinly A R, Oldenburg I A, Sridharan S, Waller L, Adesnik H 2017 *Nat. Commun.* **8** 1228
 [7] Yu H, Lee K, Park J, Park Y 2017 *Nat. Photon.* **11** 186
 [8] Makey G, Yavuz Ö, Kesim D K, Turnali A, Elahi P, Ilday S, Tokel O, Ilday F Ö 2019 *Nat. Photonics* **13** 251

[9] Marquet P, Rappaz B, Magistretti P J, Cuche E, Emery Y, Colomb T, Depeursinge C 2005 *Opt. Lett.* **30** 468
 [10] Rosen J, Brooker G 2008 *Nat. Photonics* **2** 190
 [11] Zhao Y C, Zhang X Y, Yuan C J, Nie S P, Zhu Z Q, Wang L, Li Y, Gong L P, Feng S T 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 224202 (in Chinese) [赵应春, 张秀英, 袁操今, 聂守平, 朱竹青, 王林, 李杨, 贡丽萍, 冯少彤 2014 *物理学报* **63** 224202]
 [12] Refregier P, Javidi B 1995 *Opt. Lett.* **20** 767
 [13] Chen W, Javidi B, Chen X 2014 *Adv. Opt. Photonics* **6** 120
 [14] Wang R D, Zhang Y P, Zhu X F, Wang F, Li C G, Zhang Y A, Xu W 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 114202 (in Chinese) [王仁德, 张亚萍, 朱旭峰, 王帆, 李重光, 张永安, 许蔚 2019 *物理学报* **68** 114202]
 [15] Xi S X, Yu N N, Wang X L, Zhu Q F, Dong Z, Wang W, Liu X H, Wang H Y 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 110502 (in Chinese) [席思星, 于娜娜, 王晓雷, 朱巧芬, 董昭, 王徽, 刘秀红, 王华英 2019 *物理学报* **68** 110502]
 [16] Heanue J F, Basha M C, Hesselink L 1994 *Science* **265** 749
 [17] Larocque H, Sugic D, Mortimer D, Taylor A J, Fickler R, Boyd R W, Dennis M R, Karimi E 2018 *Nat. Phys.* **14** 1079
 [18] Wang S, Wang L, Zhang F, Kong L J 2022 *Chin. Phys. Lett.* **39** 104101
 [19] Guo X, Li P, Zhong J, Liu S, Wei B, Zhu W, Qi S, Cheng H, Zhao J 2020 *Laser Photonics Rev.* **14** 1900366
 [20] Kong L J, Zhang W, Li P, Guo X, Zhang J, Zhang F, Zhao J, Zhang X 2022 *Nat. Commun.* **13** 2705
 [21] Ozaki M, Kato J, Kawata S 2011 *Science* **332** 218
 [22] Li X, Chen L, Li Y, Zhang X, Pu M, Zhao Z, Ma X, Wang Y, Hong M, Luo X 2016 *Sci. Adv.* **2** e1601102
 [23] Bao Y, Yu Y, Xu H, Guo C, Li J, Sun S, Zhou Z K, Qiu C W, Wang X H 2019 *Light-Sci. Appl.* **8** 95
 [24] Lim K T P, Liu H, Liu Y, Yang J K W 2019 *Nat. Commun.* **10** 25
 [25] Shen X A, Nguyen A D, Perry J W, Huestis D L, Kachru R 1997 *Science* **278** 96
 [26] Tikan A, Bielawski S, Szwaj C, Randoux S, Suret P 2018 *Nat. Photonics* **12** 228
 [27] Balthasar Mueller J P, Rubin N A, Devlin R C, Groever B, Capasso F 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 113901
 [28] Zhao R, Sain B, Wei Q, Tang C, Li X, Weiss T, Huang L, Wang Y, Zentgraf T 2018 *Light Sci. Appl.* **7** 95
 [29] Defienne H, Ndagano B, Lyons A, Faccio D 2021 *Nat. Phys.* **17** 591
 [30] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. 2012 *Nat. Photonics* **6** 488
 [31] Huang H, Xie G, Yan Y, et al. 2014 *Opt. Lett.* **39** 197
 [32] Krenn M, Handsteiner J, Fink M, Fickler R, Ursin R, Malik M, Zeilinger A 2016 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **113** 13648
 [33] Lavery M P J, Peuntinger C, Günthner K, et al. 2017 *Sci. Adv.* **3** e1700552
 [34] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, Tur M, Kristensen P, Huang H, Willner A E, Ramachandran S 2013 *Science* **340** 1545
 [35] Mair A, Vaziri A, Weihs G, Zeilinger A 2001 *Nature* **412** 313
 [36] Kong L J, Li Y, Liu R, et al. 2019 *Phys. Rev. A* **100** 023822
 [37] Kong L J, Liu R, Qi W R, Wang Z X, Huang S Y, Wang Q, Tu C, Li Y, Wang H T 2019 *Sci. Adv.* **5** eaat9206
 [38] Kong L J, Sun Y, Zhang F, Zhang J, Zhang X 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 053602
 [39] Zhang Y, Agnew M, Roger T, Roux F S, Konrad T, Faccio D, Leach J, Forbes A 2017 *Nat. Commun.* **8** 632
 [40] Dada A C, Leach J, Buller G S, Padgett M J, Andersson E 2011 *Nat. Phys.* **7** 677
 [41] Ren H, Briere G, Fang X, Ni P, Sawant R, Héron S, Chenot S, Vézian S, Damilano B, Brändli V, Maier S A, Genevet P 2019 *Nat. Commun.* **10** 2986
 [42] Fang X, Ren H, Gu M 2020 *Nat. Photonics* **14** 102

- [43] Ren H, Fang X, Jang J, Bürger J, Rho J, Maier S A 2020 *Nat. Nanotechnol.* **15** 948
- [44] Zhou H, Sain B, Wang Y, Schlickriede C, Zhao R, Zhang X, Wei Q, Li X, Huang L, Zentgraf T 2020 *ACS Nano* **14** 5553
- [45] Fang X, Yang H, Yao W, Wang T, Zhang Y, Gu M, Xiao M 2021 *Adv. Photonics* **3** 015001
- [46] Zhu G, Bai Z, Chen J, Huang C, Wu L, Fu C, Wang Y 2021 *Opt. Express* **29** 28452
- [47] Wang F, Zhang X, Xiong R, Ma X, Jiang X 2022 *Opt. Express* **30** 11110
- [48] Shi Z, Wan Z, Zhan Z, Liu K, Liu Q, Fu X 2023 *Nat. Commun.* **14** 1869
- [49] Zhang F, Kong L J, Zhang Z, Zhang J, Zhang X 2023 *Opt. Express* **31** 12922

COVER ARTICLE

Three-dimensional spatial orbital angular momentum holography^{*}

Jia Yi-Cheng Zhang Fu-Rong Zhang Jing-Feng
Kong Ling-Jun[†] Zhang Xiang-Dong

(Beijing Key Laboratory of Nanophotonics & Ultrafine Optoelectronic Systems, Key Laboratory of Advanced Optoelectronic Quantum Architecture and Measurements of Ministry of Education, School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 19 November 2023; revised manuscript received 6 March 2024)

Abstract

The degree of freedom of orbital angular momentum of light has been used as a new information carrier in optical holographic information processing technology. However, current research on orbital angular momentum holography mainly focuses on two-dimensional orbital angular momentum holography, where the reconstructed two-dimensional holographic image is located in a certain plane in three-dimensional space. How to further implement three-dimensional spatial orbital angular momentum holographic technology and use it to increase the information capacity of holographic communication is still a blank. Here, we implement three-dimensional spatial orbital angular momentum holographic technology based on the degrees of freedom of orbital angular momentum and the positional degrees of freedom of reconstructed two-dimensional images in three-dimensional space. In other words, in the three-dimensional spatial orbital angular momentum holography, the acquisition of the target object image requires not only the correct orbital angular momentum state used for decoding, but also the correct spatial position where the object's image is detected. In addition, we further investigate the three-dimensional spatial orbit angular momentum holographic multiplexing technology and point out that this multiplexing technology can be used for information encryption. Compared with traditional two-dimensional orbital angular momentum holography, three-dimensional spatial orbital angular momentum holography uses an additional degree of freedom. Therefore, the encryption scheme based on three-dimensional spatial orbital angular momentum holographic technology can further improve the security level of information. Our simulation results and experimental results have verified the feasibility of three-dimensional spatial orbit angular momentum holographic technology and three-dimensional spatial orbit angular momentum holographic encryption technology.

Keywords: orbital angular momentum, optical holography, optical encryption

PACS: 42.40.-i, 42.40.Jv, 42.30.-d, 42.79.Sz

DOI: 10.7498/aps.73.20231822

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12374324, 12004038).

† Corresponding author. E-mail: konglj@bit.edu.cn

三维空间轨道角动量全息

贾谊成 张福荣 张景凤 孔令军 张向东

Three-dimensional spatial orbital angular momentum holography

Jia Yi-Cheng Zhang Fu-Rong Zhang Jing-Feng Kong Ling-Jun Zhang Xiang-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 094202 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231822

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231822>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用衍射光栅探测涡旋光束轨道角动量态的研究进展

Progress of detecting orbital angular momentum states of optical vortices through diffraction gratings

物理学报. 2018, 67(3): 034201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171899>

长周期多芯手征光纤轨道角动量的调制

Modulation of orbital angular momentum in long period chirally-coupled-cores fiber

物理学报. 2019, 68(6): 064211 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182036>

海洋湍流对光子轨道角动量量子通信的影响

Effects of ocean turbulence on photon orbital angular momentum quantum communication

物理学报. 2022, 71(1): 010304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211146>

基于双层超表面的宽带、高效透射型轨道角动量发生器

Wideband and high efficiency orbital angular momentum generator based on bi-layer metasurface

物理学报. 2021, 70(3): 038101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200975>

基于平面相控阵的轨道角动量涡旋电磁波扫描特性

Beam steering of orbital angular momentum vortex wave based on planar phased array

物理学报. 2021, 70(23): 238401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211119>

一种可用于轨道角动量的受激布里渊放大的光子晶体光纤放大器

Design of photonic crystal fiber amplifier based on stimulated Brillouin amplification for orbital angular momentum

物理学报. 2022, 71(7): 074206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211909>