文章编号：1005-5630(2025)05-0047-07 **DOI**: 10.3969/j.issn.1005-5630.202404270074

多维时空波包生成方案的研究

林泽立，曹 前，詹其文
（上海理工大学 光电信息与计算机工程学院，上海 200093）

摘要：过去几年中，时空光学在许多应用研究领域都展示出了巨大潜力。目前已有的研究工作集中于使用二维空间光调制器或定制的振幅掩膜板来操纵空间频率域光场，从而在时空（X–T）平面上生成具有特定分布的时空光场。这些时空光场研究不涉及另一空间维度（Y 方向）上的调控。提升时空光场调控的维度，在多个时空维度上同时操纵光场分布，可以进一步扩展时空光学研究。多维时空光场可以具有传统时空光场无法具有的新光子学特性。本研究工作介绍了通过多路复用时空光场调制系统，设计可实现多维时空波包生成的装置，并演示一些多维时空光场的模拟仿真。工作中展示了多维时空光学涡旋波包和三维晶格波包的时空域三维模拟仿真。多维时空波包可成为时空光学研究中的重要研究工具，为更多应用带来了可能。

关键词：多维时空；多维时空光涡旋；多维时空操纵；多维时空波包
中图分类号：O 43 **文献标志码**：A

Research on the generation of multi-dimensional spatiotemporal wavepackets

LIN Zeli，CAO Qian，ZHAN Qiwen
（School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China）

Abstract: In the past few years, spatiotemporal optical research has shown its potential in many applications. However, current research mainly focuses on using 2D spatial light modulator or customized amplitude mask to manipulate the optical field in the spatial-spectral domain so that the generated optical field can be modulated in the spatiotemporal (*X*-*T*) plane. In those studies, the other spatial direction (*Y*-direction) remains un-changed. Having a capability of manipulating the light in multiple spatiotemporal dimensions can greatly expand the scope of spatiotemporal optical research to a higher dimension. Multi-dimensional spatiotemporal light field has new property that is inaccessible in conversional researches. This research work introduces the design of device that enable multidimensional spatiotemporal wavepackets generation by multiplexing spatiotemporal optical field modulation system and demonstrates some simulations of multi-dimensional spatiotemporal optical field. In this work, we demonstrate simulations of multi-dimensional

收稿日期：2024-04-27
第一作者：林泽立 (1999—)，男，硕士研究生，研究方向为光场调控。E-mail：212180361@st.usst.edu.cn
通信作者：詹其文 (1974—)，男，教授，研究方向为光场调控理论与方法、微纳制造。
E-mail：qwzhan@usst.edu.cn

spatiotemporal optical vortex wavepacket (MD-STOV) and three-dimensional lattice wavepacket. These multi-dimensional wavepackets can become new and interesting tools in spatiotemporal optical researches and pave new directions for many applications.

Keywords: multi-dimensional spatiotemporal; multi-dimensional spatiotemporal optical vortices; multi-dimensional spatiotemporal manipulation; multi-dimensional spatiotemporal wavepackets

光场调控作为光子学研究重要研究工具，过去 30 年已在诸多科学研究中得到广泛应用。具有特定分布的结构光场具有独特的光子学特性，这些光场结合其特性推动了大量基础科学研究和应用研究的发展。长期以来，结构光场研究可分为两大类：空间域光束研究[1-5]和时域光脉冲研究[6-8]。最近，科学家发展了第三类结构光场研究——时空光场研究[9]。时空波包（spatiotemporal wavepackets, STWP）的电场分布具有在时空域内耦合的特点[10]，具有反常折射[11]、反常时空色散[12]，具有自由空间传播条件下的群速度色散[13]、产生时间域内衍射[14]等诸多奇异特性。在早期的时空光场研究工作中，多个课题组针对时空光涡旋（spatiotemporal optical vortices, STOV）波包这一典型时空光场开展了大量研究工作[15-17]。STOV 波包在时空域内具有涡旋相位，因此可以携带方向垂直于光场传播方向的横向轨道角动量（orbital angular momentum, OAM）。研究工作报导了 STOV 波包在非线性光学过程中的横向 OAM 守恒[18-20]、针对横向 OAM 的快速探测手段[21]、横向 OAM 在少模光纤中的传输过程[22]、在传播过程中的演化过程[23-24]，以及 STOV 波包的相关应用[25-26]。

除了 STOV 波包，其他具有特定分布的时空光场还可以实现违反斯涅尔定律的传播[27]，携带可控的群速度[28]，产生自转矩脉冲[29]，产生孤立的阿秒电子薄片[30]等独特性质。时空光场为开发新型光量子器件、新型光量子通信和基础物理学研究提供了新的机遇。

已有时空光学研究主要集中在使用放置在脉冲整形器中的二维空间光调制器（spatial light modulator, SLM）来调控输入光场的空间频率域相位，以生成在时空域（X–T）内具有特定分布的时空光场，这一过程不涉及另一空间维度（Y 方向）的调控。如果同时对光场的不同维度进行调控，将会产生具有更为复杂的时空结构的多维时空波包（multi-dimensional spatiotemporal wavepackets, MD-STWP）。拥有多个时空维度的结构光场可以为光学研究创造更多机会。例如，具有多个时空涡旋相位结构的波包可以实现对光子轨道角动量的矢量控制[31]。虽然目前对于多维时空波包的研究较少，但是多维时空波包的研究潜力巨大，在时空光学领域存在很多潜在应用，未来它能为时空光学研究创造更多机会，有望成为未来时空光学研究中的重要研究工具并提供全新的视角。

这项工作展示了一种可实现多维时空波包生成的装置设计。通过复用传统时空光场调控系统，装置可以在多个时空维度改变光场的分布，从而生成多维时空波包。在这项研究中，通过仿真产生两种不同的波包来演示这种方法。一种是多维时空光学涡旋（MD-STOV）波包，另一种是三维晶格波包。

1　方　法

参考使用 SLM 调控时空光场的单一空间维度的装置方案[32]，设计了如图 1 所示的多维时空波包的生成装置。激光从光纤激光器中出射，经过调整半波片和望远系统改变激光偏振状态和光束尺寸后，激光进入时空调控系统，该系统由衍射光栅、柱透镜和液晶空间光调制器（liquid crystal spatial light modulator, LC-SLM）组成。之后，在 X_1–Ω_1 平面上进行第一次调控（图 1 中的光路 1、2）。受到调控的波包离开调控系统后，经过一个光学道威棱镜，X–Y–T 空间的调控被转换为 X'–Y'–T 空间的调控。空间变换的旋转角度 $\theta_{X-X'}$ 是道威棱镜角度 θ_{DP} 的两倍，$\theta_{X-X'}=2\theta_{DP}$。坐标变换可表示为

$$\begin{pmatrix}X'\\Y'\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\cos\theta_{X-X'} & \sin\theta_{X-X'}\\-\sin\theta_{X-X'} & \cos\theta_{X-X'}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}X\\Y\end{pmatrix} \tag{1}$$

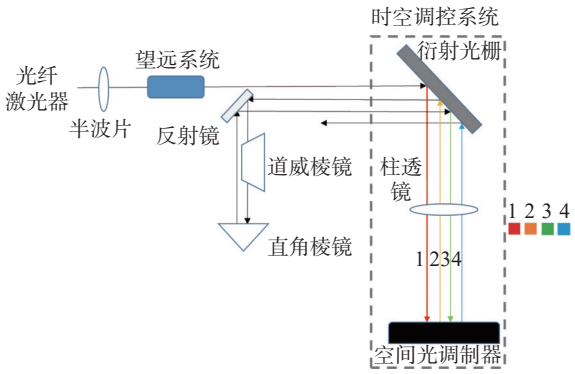

图 1　生成多维时空波包的装置设计

Fig. 1　Setup design for generating multi-dimensional spatiotemporal wavepacket.

经过空间坐标变换后，波包以相同的方式在 X_2–Ω_2 平面（图 1 中的光路 3、4）上受到时空调控系统的第二次调控。定义空间坐标变换算符

$$\widehat{\boldsymbol{R}}u(X,Y)=u(X',Y');\ \widehat{\boldsymbol{R}}=\begin{pmatrix}\cos\theta_{X-X'} & \sin\theta_{X-X'}\\ -\sin\theta_{X-X'} & \cos\theta_{X-X'}\end{pmatrix} \quad (2)$$

因此，产生的多维时空波包在不同的时空域中共受到了两次调控。一次调控发生在在 X–Ω 平面（来自第一次调控），从 X–Ω 平面到光学道威棱镜的传播演化可表示为

$$u(X',Y',T,L)=$$
$$\iiint u_{X-T}(X,Y,\Omega)\exp[\mathrm{i}\phi_1(X,\Omega)]\exp\left(\mathrm{i}k_0\frac{X^2+Y^2}{2L}\right)\cdot$$
$$\exp\left(-\mathrm{i}k_0\frac{XX'+YY'}{L}\right)\exp\left(\mathrm{i}\beta_2\frac{\Omega^2}{2}L+\mathrm{i}\Omega T\right)\mathrm{d}X\mathrm{d}Y\mathrm{d}\Omega \quad (3)$$

式中：$\phi_1(X,\Omega)$ 表示第一次调制相位；L 表示从时空调控系统到道威棱镜的距离；k_0 表示波矢；β_2 表示群速度色散。

经过道威棱镜的空间变换作用，可表示为

$$\widehat{\boldsymbol{R}}u(X',Y',T)=u(X'',Y'',T) \quad (4)$$

另一次调控发生在 X''–Ω 平面（来自第二次调控）。经过调控后的归一化时空包络演化场分布可表示为

$$u(X''',Y''',T,Z)=$$
$$\iiint u(X'',Y'',\Omega)\exp[\mathrm{i}\phi_2(X'',\Omega)]\exp\left(\mathrm{i}k_0\frac{X''^2+Y''^2}{2Z}\right)$$
$$\exp\left(-\mathrm{i}k_0\frac{X''X'''+Y''Y'''}{Z}\right)\exp\left(\mathrm{i}\beta_2\frac{\Omega^2}{2}Z+\mathrm{i}\Omega T\right)\mathrm{d}X''\mathrm{d}Y''\mathrm{d}\Omega \quad (5)$$

式中：$\phi_2(X'',\Omega)$ 表示第二次调制相位；Z 表示传播距离。令 $k_{X''}=k_0\dfrac{X''}{Z}$，$k_{Y''}=k_0\dfrac{Y''}{Z}$，则式（5）可以写为

$$u(X''',Y''',T,Z)=\iiint u(X'',Y'',\Omega)\exp[\mathrm{i}\phi_2(X'',\Omega)]$$
$$\exp\left[\mathrm{i}\frac{Z}{2k_0}(k_{X''}^2+k_{Y''}^2)+\mathrm{i}\beta_2\frac{\Omega^2}{2}Z\right]\cdot$$
$$\exp(-\mathrm{i}k_{X''}X'''-\mathrm{i}k_{Y''}Y''')\exp(\mathrm{i}\Omega T)\mathrm{d}k_{X''}\mathrm{d}k_{Y''}\mathrm{d}\Omega \quad (6)$$

2　结　果

首先利用该系统仿真生成多维时空光学涡旋（MD-STOV）波包，为了在 X–T 平面和 Y–T 平面上各加上一个时空涡旋，将道威棱镜的角度调整为 45°。仿真中加载的多维空间光谱调控相位如图 2（a）所示，SLM 屏幕的下半部分加载的相位为 $\phi_1(Y,\Omega)$，是在 Y–Ω 平面上进行的第一次调控；SLM 的上半部分加载的相位为 $\phi_2(X,\Omega)$，是在 X–Ω 平面上进行的第二次调控。

为了产生 MD-STOV 波包，将加载在 SLM 上的涡旋相位 $\phi_1(Y,\Omega)$ 和 $\phi_2(X,\Omega)$ 的拓扑电荷分别设置为−1 和+1。值得注意的是，道威棱镜将第一次在 X–T 平面进行的调控转换到了 Y–T 平面上，所以最终生成的光场在 Y–T 平面的涡旋相位的拓扑电荷为 l=+1。为了保持波包在自由空间传播过程中的完整性，在 $\phi_2(X,\Omega)$ 中增加了一个额外的群延迟色散（GDD）。图 2（b）显示了 MD-STOV 波包的仿真结果，等值面图对应波包峰值强度的 8%，从图中可以看出，在 X–T 和 Y–T 平面上产生了两个时空涡旋相位结构，它们在 T=0 附近的波包中心相互连接。图 2（c）中所示的彩色箭头表示另一时空域中涡旋结构的方向。图 2（d）和（e）显示了波包在 Y–T 和 X–T 平面上的强度和相位分布。图 2（f）、（g）、（h）展示了分别在光场的 X–T 与 Y–T 平面添加拓扑电荷为−1 和−1 的涡旋相位的仿真结果，图 2（f）显示在 X–T 和 Y–T 平面上产生了两个时空涡旋相位结构，它们在 T=0 附近的波包中心相互连接。图 2（g）、（h）展示了波包在 Y–T 和 X–T 平面上的强度和相位分布，可以发现，此时 Y–T 和 X–T 平面上的相位与拓扑电荷为 l=+1

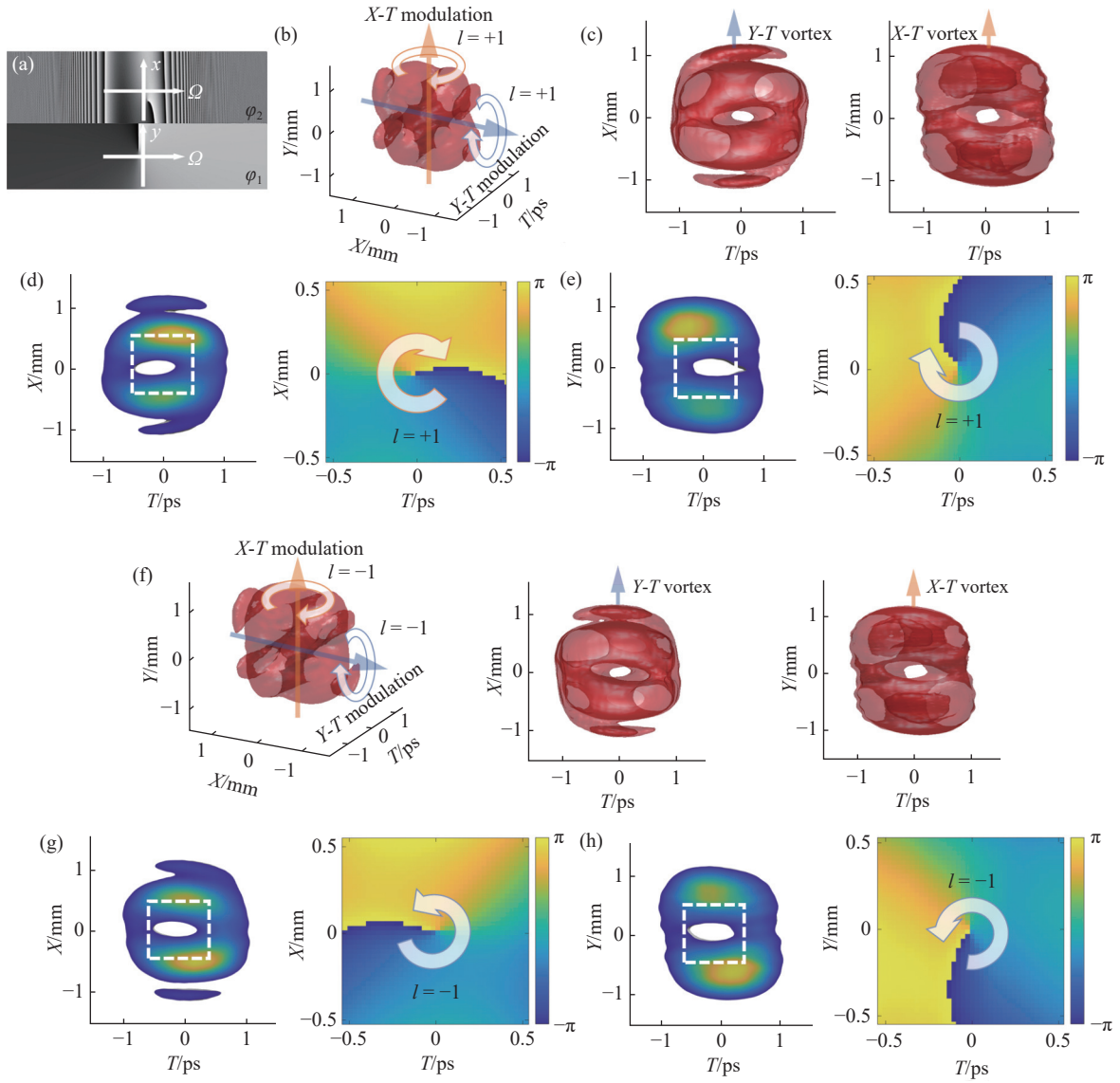

图 2　多维时空光涡旋（MD-STOV）波包的仿真结果

Fig. 2　Simulation results for multi-dimensional spatiotemporal optical vortex (MD-STOV) wavepacket

和+1 时的相位差为 π。这证实了涡旋相位在多个时空域中的产生，继而实现对波包携带的轨道角动量的矢量控制。

还可以利用该系统仿真生成具有三维晶格结构的多维时空波包。图 3(a)显示了仿真中加载到 SLM 上的 $\phi_1(Y,\Omega)$（下半部分）和 $\phi_2(X,\Omega)$（上半部分）相位图。$\phi_1(Y,\Omega)$ 具有 0 与 π 相间的棋盘样式的相位，因此可用于在 Y–T 域生成具有棋盘样式的时空波包；$\phi_2(X,\Omega)$ 具有 0 到 π 的光栅相位，因此先前的 Y–T 域棋盘格波包将转换为三维晶格状波包。图 3(b)显示了仿真生成的三维晶格波包的三维强度等值面图。图 3(c)显示了仿真生成的三维晶格波包的三维强度等值面剖面三视图，等值面设置为波包峰值强度的 8%，生成的波包在 X–Y–T 空间中具有三维晶格状结构。图 3(d)、(e)展示了增大了棋盘样式相位的格子尺寸后的仿真结果，图 3(d)为加载到 SLM 上的相位图。通过图 3(e)展示的三维晶格波包可以发现增大棋盘状相位的格子尺寸后，仿真生成的时空波包会具有更多的三维晶格状结构。这可以给需要三维周期光激发的应用提供很好的参考范例。以上仿真生成的两种多维时空波包验证了生成多维时空波包的装置方案的可行性。

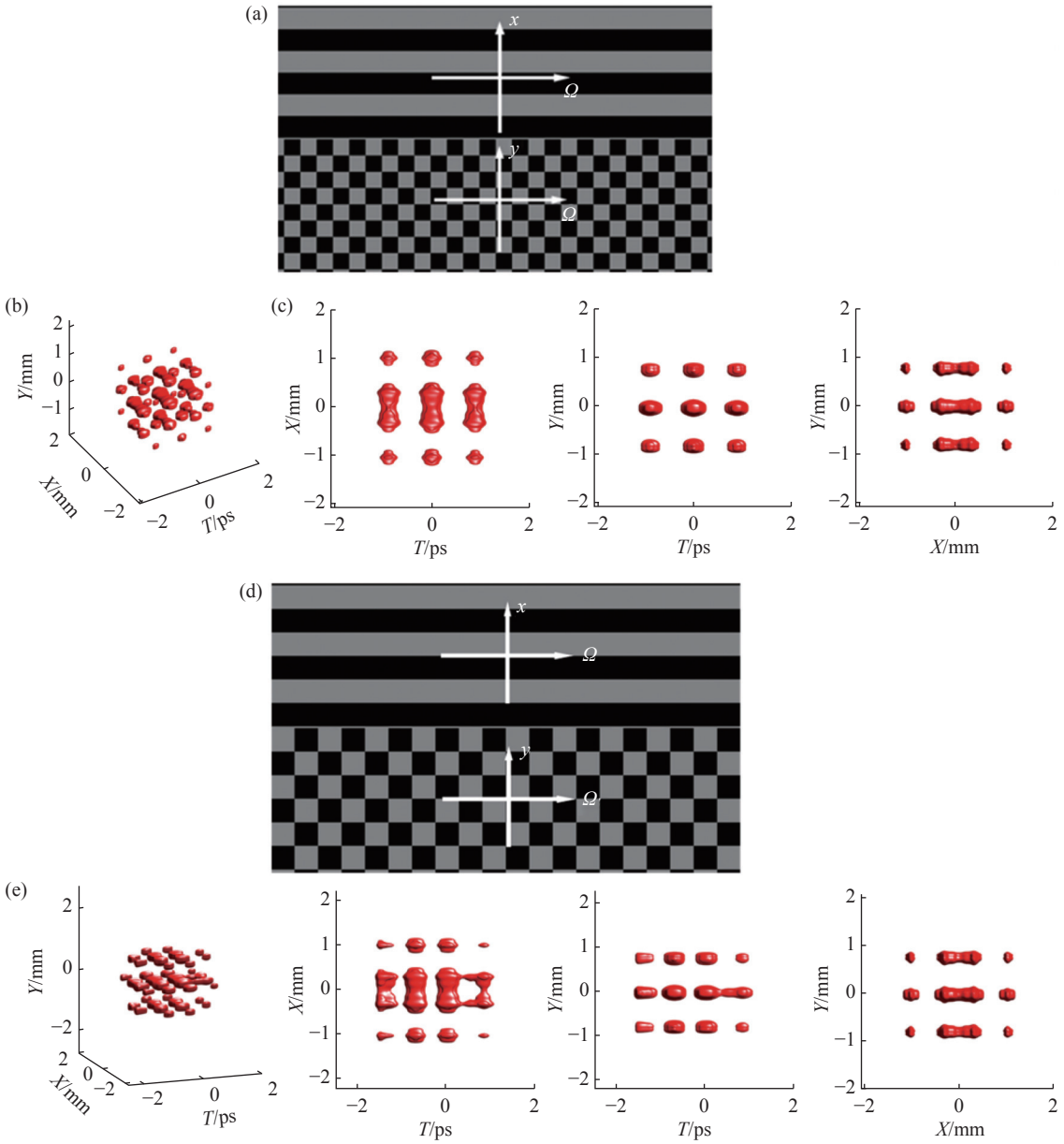

图 3　三维晶格波包的仿真结果

Fig. 3　Simulation results for three-dimensional lattice wavepacket

3　结论与展望

提出并设计了一种能够生成多维时空波包的装置方案，该方案通过使用道威棱镜实现坐标变换，运用时空调控系统中包含的脉冲整形器进行脉冲整形，并利用啁啾脉冲的频率和时间之间的关系，将空间频率域的调制转换到时空域，产生具有一定特性的时空波包。利用该方法可以通过灵活调控不同目标维度的时空光场从而得到理想的多维时空波包。多维时空光场可以具有传统时空光场无法具有的新光子学特性，这一突破性技术为光的多维时空操纵提供了新的可能性。具体来说，成功地仿真产生了两种具有显著多维时空分布特性的波包，这两种波包分别是多维时空光涡旋（MD-STOV）波包和三维晶格波包，通过仿真验证了生成多维时空波包的装置设计的可行性。研究发现，该方法可用于矢量设计波包的 OAM 特性，生成具有更多自由度的时空波包，甚至可能创造出全新的波包种类。多维时空波包的出现，将为时空光学研究开辟新的道路，它们

不仅可以作为研究工具，帮助深入理解光的时空特性，而且还可以为未来更多潜在的应用提供可能性，为时空光学研究创造更多机会。例如，它们可能在光通信、光量子器件、量子信息处理等领域发挥重要作用。具体有对光子轨道角动量的矢量调控，对特定手性物质或具有拓扑结构物质的相干激发等应用。优势在于在只运用一台空间光调制器的情况下通过分屏、调整光路等方法，实现空间光调制器的复用，达成在多个维度上对时空光场进行调控的目的。具有在节省器件使用的前提下，生成复杂多维时空光场的优势。

本设计方案的实验验证结果，将在后续研究中进行报告。在实验验证中可能出现各种各样的问题，例如光束传播距离过长导致光斑变形。为了解决这个问题，可以通过提高望远系统的放大倍率从而增大瑞利距离，使得光束在更长的距离内不扩散地传播，保持光斑形状；或是出现怎样实际操作使 SLM 先后调控两次时空光场的问题，可以通过调节反射镜，将第一次入射的光束与第二次入射的光束打在 SLM 上的位置分离至两个不同位置，将 SLM 分屏，在屏幕的两个部分对应光束打在 SLM 上的位置分别加载上调控的相位，从而实现前后两次不同的光场调控；此外也可能遇到在 X–T 平面和 Y–T 平面所加的时空涡旋在时间维度上不重合的情况，通过调节加载在 SLM 上的两个相位坐标使其重合的方法可以解决这一问题。

参考文献：

[1] PADGETT M J. Orbital angular momentum 25 years on [Invited][J]. Optics Express, 2017, 25(10): 11265 – 11274.

[2] SHEN Y J, WANG X J, XIE Z W, et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 90.

[3] HELL S W, WICHMANN J. Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy[J]. Optics Letters, 1994, 19(11): 780 – 782.

[4] ASHKIN A, DZIEDZIC J M, BJORKHOLM J E, et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. Optics Letters, 1986, 11(5): 288 – 290.

[5] FORBES A. Structured light from lasers[J]. Laser & Photonics Reviews, 2019, 13(11): 1900140.

[6] STRICKLAND D, MOUROU G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Optics Communications, 1985, 56(3): 219 – 221.

[7] KRAUSZ F, IVANOV M. Attosecond physics[J]. Reviews of Modern Physics, 2009, 81(1): 163 – 234.

[8] WEINER A M. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(5): 1929 – 1960.

[9] SHEN Y J, ZHAN Q W, WRIGHT L G, et al. Roadmap on spatiotemporal light fields[J]. Journal of Optics, 2023, 25(9): 093001.

[10] BHADURI B, YESSENOV M, REYES D, et al. Broadband space-time wave packets propagating 70 m [J]. Optics Letters, 2019, 44(8): 2073 – 2076.

[11] BHADURI B, YESSENOV M, ABOURADDY A F. Anomalous refraction of optical spacetime wave packets[J]. Nature Photonics, 2020, 14(7): 416 – 421.

[12] HALL L A, YESSENOV M, ABOURADDY A F. Space–time wave packets violate the universal relationship between angular dispersion and pulse-front tilt[J]. Optics Letters, 2021, 46(7): 1672 – 1675.

[13] HALL L A, ABOURADDY A F. Free-space group-velocity dispersion induced in space-time wave packets by V-shaped spectra[J]. Physical Review A, 2021, 104(1): 013505.

[14] KONDAKCI H E, ABOURADDY A F. Airy wave packets accelerating in space-time[J]. Physical Review Letters, 2018, 120(16): 163901.

[15] JHAJJ N, LARKIN I, ROSENTHAL E W, et al. Spatiotemporal optical vortices[J]. Physical Review X, 2016, 6(3): 031037.

[16] CHONG A, WAN C H, CHEN J, et al. Generation of spatiotemporal optical vortices with controllable transverse orbital angular momentum[J]. Nature Photonics, 2020, 14(6): 350 – 354.

[17] HANCOCK S W, ZAHEDPOUR S, GOFFIN A, et al. Free-space propagation of spatiotemporal optical vortices[J]. Optica, 2019, 6(12): 1547 – 1553.

[18] HANCOCK S W, ZAHEDPOUR S, MILCHBERG H M. Second-harmonic generation of spatiotemporal optical vortices[C]//Proceedings of Mid-Infrared Coherent Sources 2020. Washington: Optica Publishing Group, 2020.

[19] ZAHEDPOUR S, HANCOCK S W, MILCHBERG H M. Second harmonic generation of spatiotemporal optical vortices (STOVs) and conservation of orbital angular momentum[C]//Proceedings of 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference. Munich: IEEE, 2021: 1.

[20] WANG H G, CHEN Y Y, ZHANG X M, et al. Generation and periodic evolution of third harmonics carrying transverse orbital angular momentum in air-plasma filaments[J]. Optics Express, 2023, 31(22): 36810 – 36823.

[21] HUANG S L, WANG P, SHEN X, et al. Diffraction properties of light with transverse orbital angular momentum[J]. Optica, 2022, 9(5): 469 – 472.

[22] CAO Q, CHEN Z, ZHANG C, et al. Propagation of transverse photonic orbital angular momentum through few-mode fiber[J]. Advanced Photonics, 2023, 5(3): 036002.

[23] BLIOKH K Y, NORI F. Spatiotemporal vortex beams and angular momentum[J]. Physical Review A, 2012, 86(3): 033824.

[24] PORRAS M A. Transverse orbital angular momentum of spatiotemporal optical vortices[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2023, 177: 95 – 105.

[25] HUANG J Y, ZHANG J H, ZHU T F, et al. Spatiotemporal differentiators generating optical vortices with transverse orbital angular momentum and detecting sharp change of pulse envelope[J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 16(5): 2100357.

[26] ZHANG H L, SUN Y Y, HUANG J Y, et al. Topologically crafted spatiotemporal vortices in acoustics[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 6238.

[27] YESSENOV M, HALL L A, SCHEPLER K L, et al. Space-time wave packets[J]. Advances in Optics and Photonics, 2022, 14(3): 455 – 570.

[28] KABACINSKI A, OLIVA E, TISSANDIER F, et al. Spatio-temporal couplings for controlling group velocity in longitudinally pumped seeded soft X-ray lasers[J]. Nature Photonics, 2023, 17(4): 354 – 359.

[29] FANG Y Q, LU S Y, LIU Y Q. Controlling photon transverse orbital angular momentum in high harmonic generation[J]. Physical Review Letters, 2021, 127(27): 273901.

[30] SUN F Y, WANG W P, DONG H, et al. Generation of isolated attosecond electron sheet via relativistic spatiotemporal optical manipulation[J]. Physical Review Research, 2024, 6(1): 013075.

[31] CAO Q, ZHENG P K, ZHAN Q W. Vectorial sculpturing of spatiotemporal wavepackets[J]. APL Photonics, 2022, 7(9): 096102.

[32] CHEN J, LU K Y, CAO Q, et al. Automated close-loop system for three-dimensional characterization of spatiotemporal optical vortex[J]. Frontiers in Physics, 2021, 9: 633922.

（编辑：张　磊）