时变光场：超快时空涡旋脉冲簇

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/37405.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

时变光场：超快时空涡旋脉冲簇。 导读

光场调控是当前光学研究的前沿热点之一。超快激光不仅包含空间自由度，还具备时间维度，通过编织其时空结构分布，可在时域与空域中同时展现更为丰富的调制特性，从而显著拓展光场的可控维度与自由度。通常，时空结构光场处于皮秒至飞秒量级，其时变特性多依赖于非线性过程或光学频率梳技术，而这些方法仍主要局限于空间自由度的调控，实现对时空耦合自由度的动态调控依然面临重大技术挑战。

近期，上海理工大学詹其文教授团队与山东师范大学蔡阳健教授团队合作，以Ultrafast bursts of tailored spatiotemporal vortex pulses为题在Light: Science Applications发表最新研究成果，创新性地提出并实现了一种具有时变光学特性的时空涡旋超快脉冲簇。

研究团队通过全新的时空复用技术，成功产生了具有随时间特定分布的时空涡旋梳，每个梳齿均可高度自定义其时空分布结构，并具备极高的模式纯度，能够在横向OAM的大小、手性及不同自由度之间，以太赫兹频率实现随时间的超快切换。

这一突破性成果不仅拓宽了时空结构光场全新调控维度，也有望推动时空结构光场在超快光与物质相互作用、大容量编码通信、拓扑光场、非线性科学以及量子信息等前沿领域中的应用。

光学频率梳（Optical frequency comb）由一系列等间隔且相位稳定的窄线宽激光谱线组成，其频谱结构整齐有序，犹如梳齿；在时间域中则对应为规则的脉冲簇(串\梳)。若将不同频率的梳齿与携带不同拓扑荷的空间涡旋光束相结合，便可在时域中形成具有螺旋结构的自扭矩光束[如图1(a)和1(c)所示]。这种光束的纵向OAM在不同时刻呈现出差异，并随时间发生超快变化。这类时变OAM光束在光-物质相互作用、光谱学以及非线性光学等领域展现出重要的应用潜力。然而，现有研究主要局限于对光场纯空间自由度的调控；在超短时间尺度下，时空结构光场的调控仍仅停留在单个脉冲层面，其可控性受限且模式纯度不足，且具有频率依赖性。因此，如何在不同时间节点上实现对单个梳齿的独立、按需调控，从而构建如图1(b)所示的时空涡旋梳，依然是亟待突破的核心科学与技术难题。

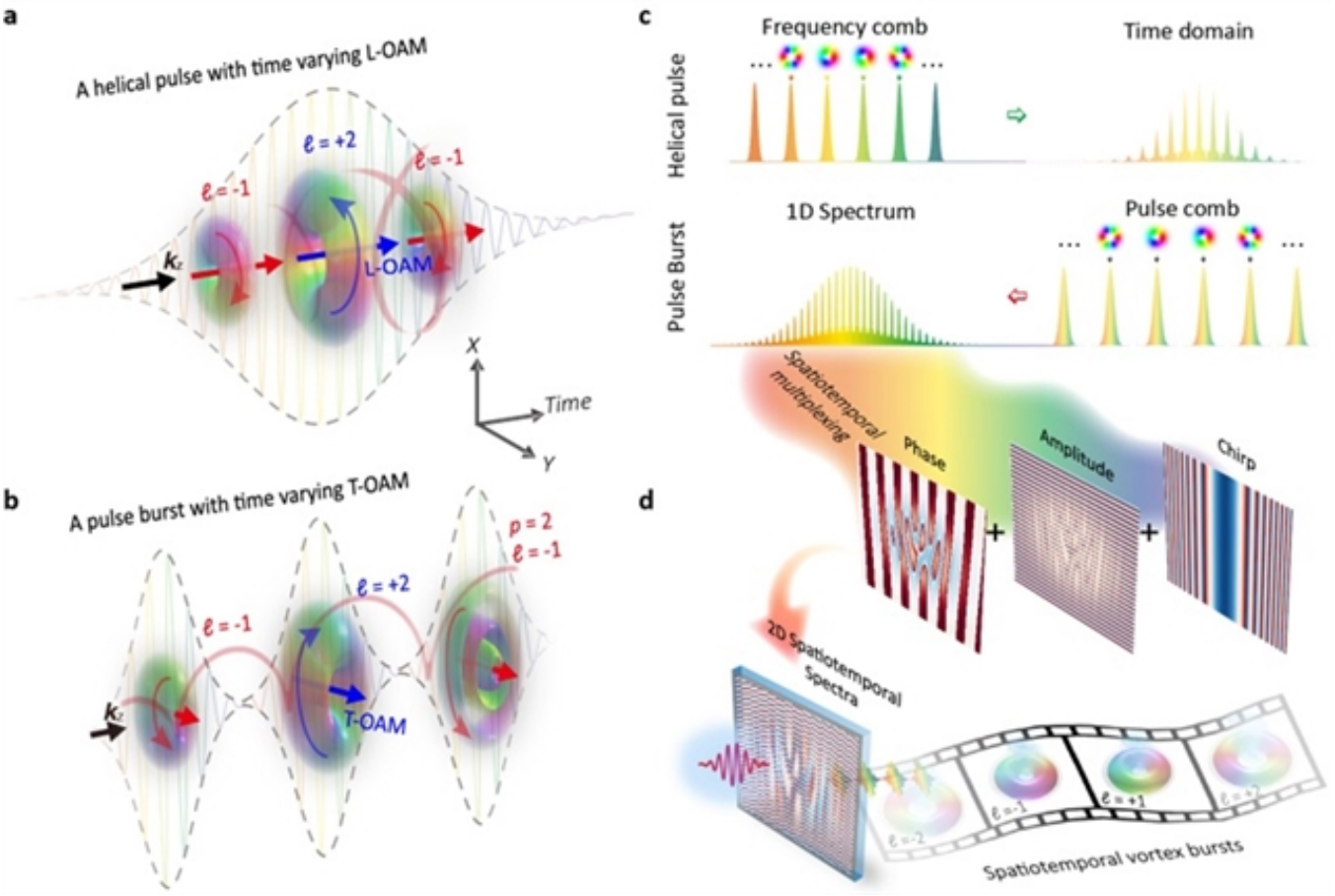


图1. 具有时变横向OAM的时空涡旋脉冲梳的实现原理。(a) 传统时变纵向OAM的自扭矩光束；(b) 具有时变横向OAM的时空涡旋簇；(c) 光学频率梳与脉冲梳(簇、串)的类比；(d) 时空复用全息图实现时空涡旋脉冲梳

研究团队受光学频率梳的启发，将时域中的每个梳齿与时空光学涡旋相关联，并在频域内构建出一种时空复用全息[如图1(d)所示]。通过对超快激光二维频谱的调控，可时域中产生具有特定时间间隔和分布的超快脉冲簇，类似于光梳，其中每个梳齿均携带特定的时空涡旋。

研究人员首先在实验中产生了一个具有时变方位量子数（拓扑荷数?从-3演化至+3）的时空涡旋脉冲簇。该脉冲簇由7个径向量子数为零的LG基模构成，相邻脉冲间隔为2.8皮秒，如图2所示。测量结果表明，其三维等强度分布呈现出由一系列时空涡旋组成的脉冲梳，各梳齿之间保持2.8皮秒的均匀间隔[如图2(a)所示]。每个梳齿均具有由时空相位奇点引起的中心暗核，其时空半径随时间逐渐演化。进一步的角向傅里叶功率谱分析表明，该脉冲簇的横向OAM随时间在太赫兹频率范围内变化，同时每个梳齿在目标模指数处均保持较高的模式纯度[如图2(b)所示]。

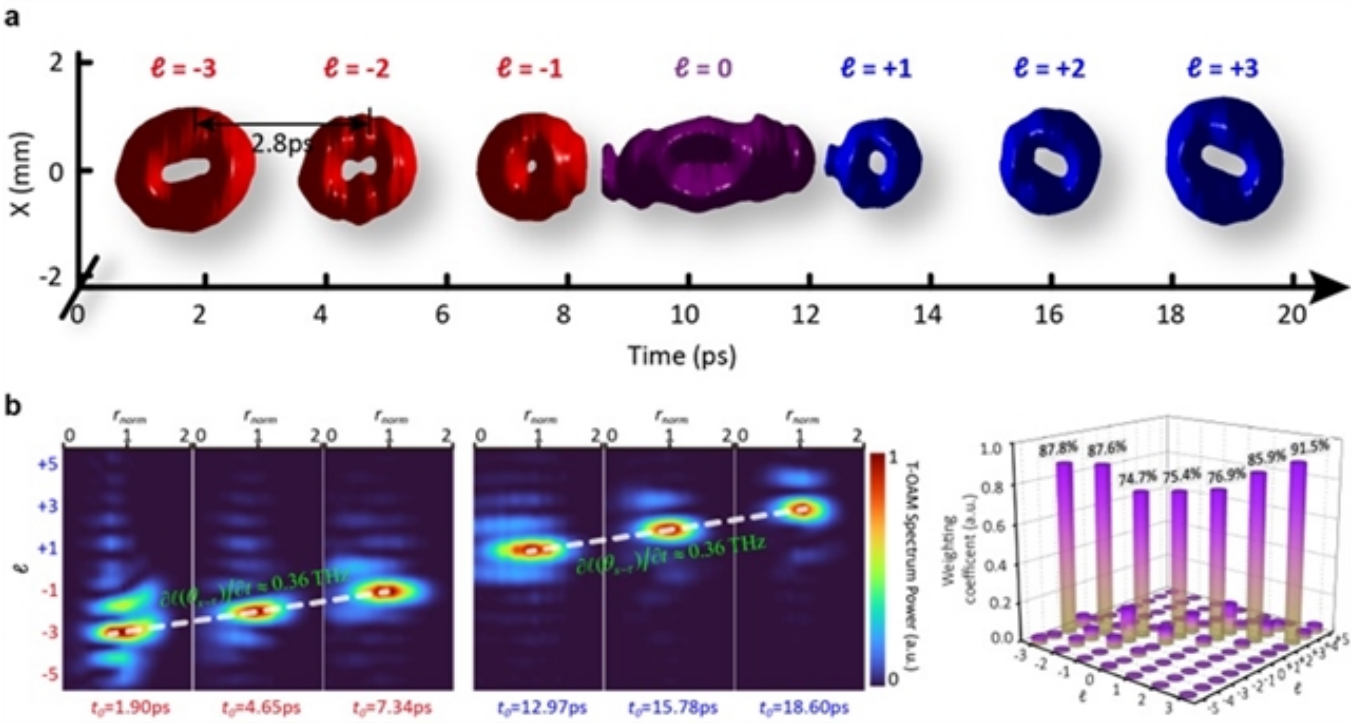


图2：具有时变横向OAM的超快时空涡旋脉冲簇：(a)
实验测量的等强度面，梳齿间隔2.8皮秒；(b)
左图为横向OAM功率谱分析，OAM变化率为0.36THz；右图为每个梳齿的模式纯度分析

研究人员进一步设计并产生了一种拓扑荷符号交替分布的超快时空涡旋脉冲簇，如图3(a)所示，其梳齿间隔为2.8皮秒，相位分布在时空平面上呈现出旋向的周期性交替。在反常色散条件下，能量密度流随时间演化为围绕奇点旋转的螺旋结构，并形成手性相反的涡旋偶极子（类似于自旋流），如图3(c)所示。能量手性的交替反转使得每个梳齿中光子携带方向相反的轨道角动量，从而构成了线性光学中的卡门涡街类比。与流体中由非线性涡旋脱落引发的卡门涡街不同，该光学涡旋偶极子源于在反常线性色散条件下、以群速度传播的多色波包。由此，时空涡旋梳中横向OAM的超快手性切换有望为探索光与物质相互作用中的能量转移机制提供新的物理手段。

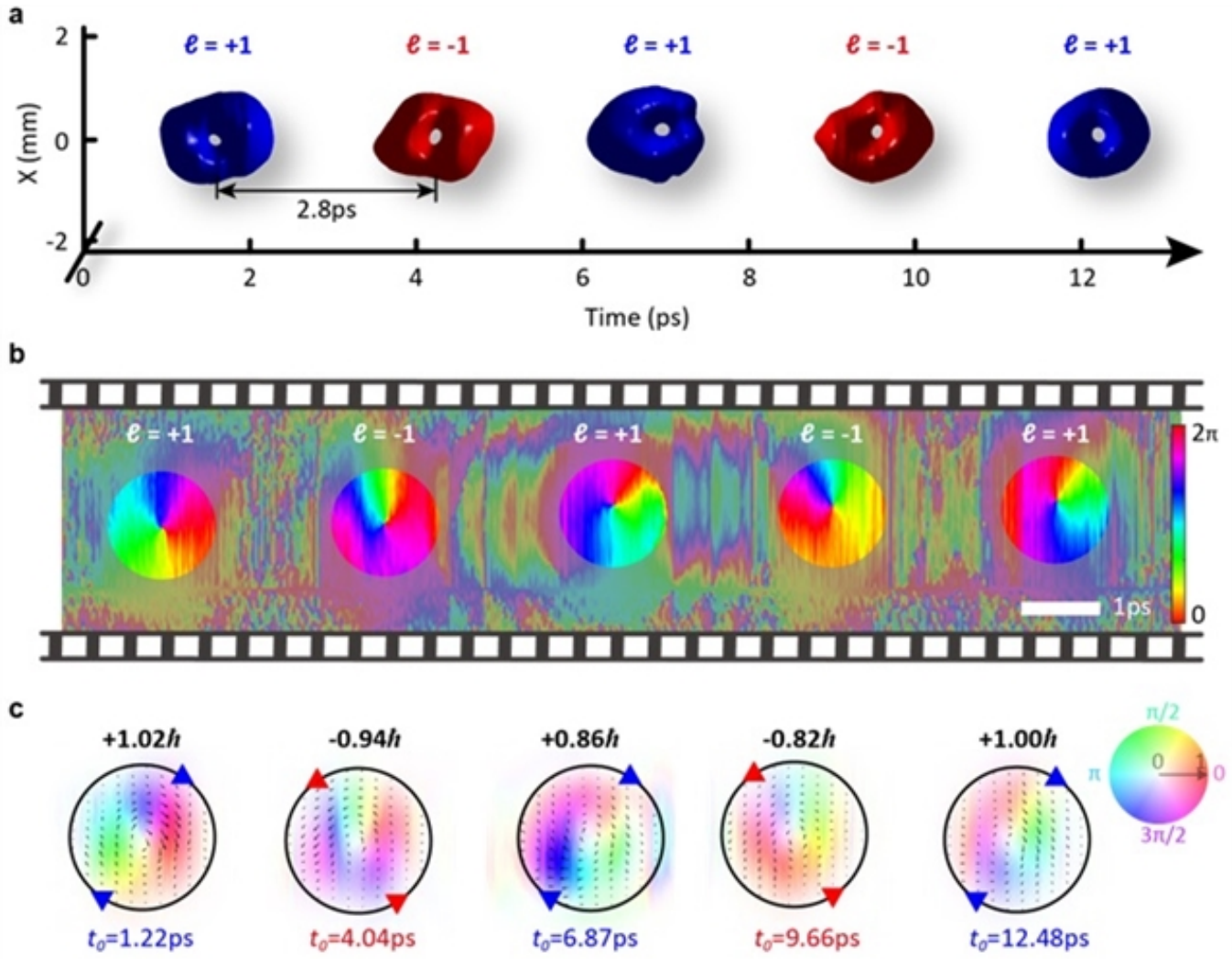


图3：具有手性交替的超快时空涡旋脉冲簇：(a) 实验测量的等强度面，梳齿间隔2.8皮秒；(b) 相位分布；(c)
反常色散下能流密度分布及平均OAM值，表现出手性随时间的交替分布的卡门涡街现象

此外，研究人员进一步验证了该技术的高度灵活性与可调控性。实验结果表明，所产生的超快脉冲梳的梳齿在时空域内可按需重构为任意目标分布，且其时间间隔能够实现线性可控，从而保证了每个梳齿均具备超高的模式纯度（见图4）。

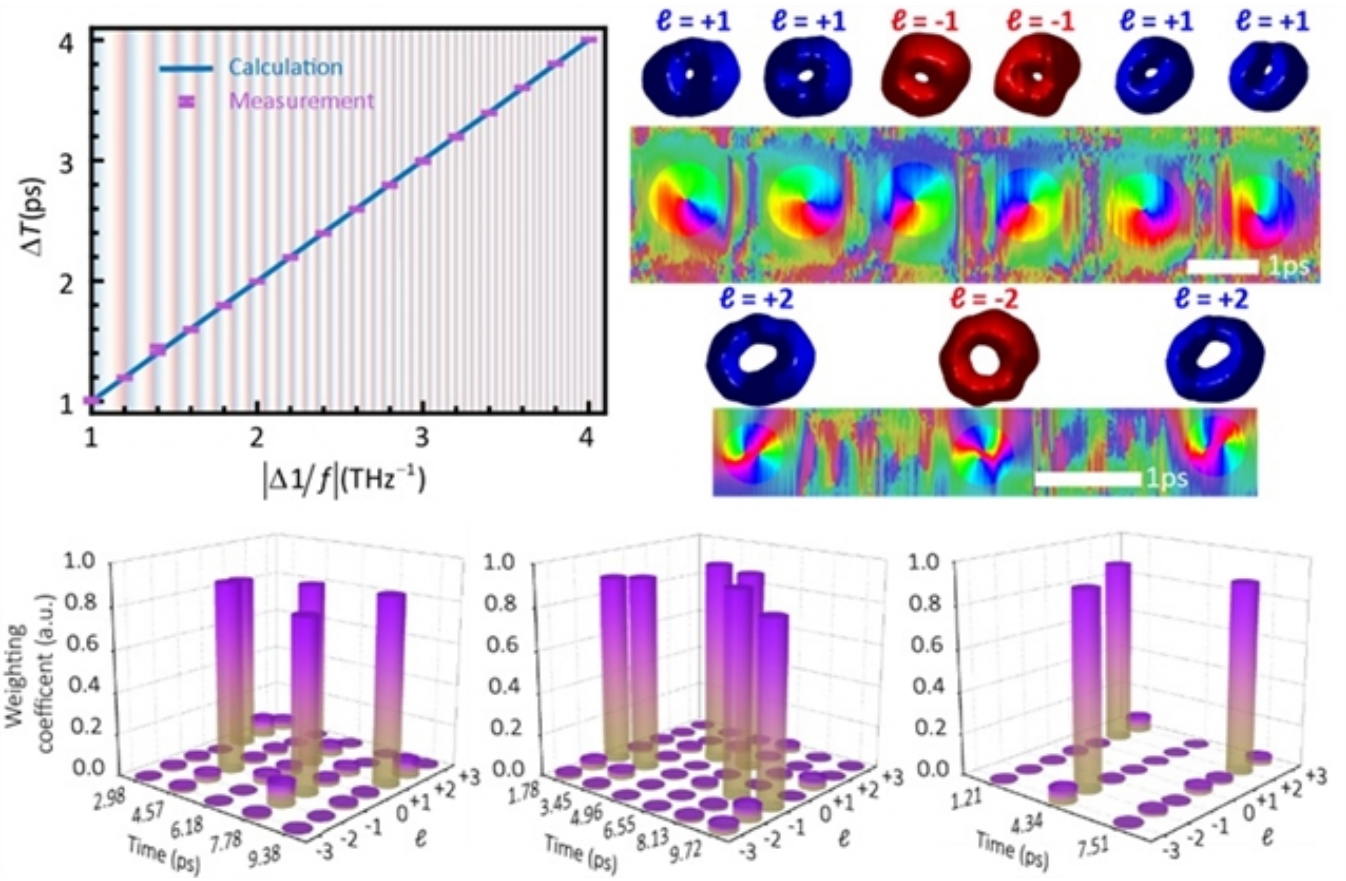


图4：时空涡旋脉冲簇的梳齿排布与间隔任意可控和超高模式纯度分析。

总结与展望

本研究拓展了时空结构光场调控的新维度，提出并实现了一类具有时变特性的时空涡旋脉冲簇。该脉冲簇类似于光梳，其梳齿的时空分布、横向OAM大小与手性以及脉冲间隔均可按需设计与调控，从而显著提升了对超短脉冲在时域与空域同步精确控制的能力，并为制备具有可调动态特性的复杂时空结构波包提供了新方法。时空涡旋脉冲簇的产生不仅有助于揭示横向轨道角动量在物理化学过程中的作用机制，还为时空光子拓扑学、多路复用光通信及超快事件探测等方向开辟了新的研究途径。

在本工作中，时空涡旋梳齿之间在时空域中保持正交特性，因此在非线性作用下能够独立驱动不同过程，如和频、差频及高次谐波产生等。与此同时，梳齿具有相同中心频率，可实现实现高效非线性同步，从而进一步提升非线性过程的效率。每个脉冲均携带特定的时空耦合特性，使其具备作为电子加速与新型辐射源驱动场的潜力。另一方面，超快脉冲簇的高重复率与可编程时空特性为光场提供了一种新的时间依赖自由度，有望应用于微纳加工、非线性光谱学和激光尾场加速等领域。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-025-02062-y

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。

作者：詹其文等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发