亮点

超快光学弹簧的实时成像：从泵浦探测到单次压缩测量的新方法

蔡阳健^{①②*}^① 苏州大学物理科学与技术学院, 苏州 215006^② 山东师范大学物理与电子科学学院, 济南 250014

*联系人, E-mail: yangjiancai@suda.edu.cn

收稿日期: 2016-01-01; 接受日期: 2016-01-01

摘要 超快光学弹簧在粒子旋转和操纵、荧光超分辨率成像和光学信息编码等领域具有非常重要的应用前景, 因此对超快光学弹簧时空信息的准确测量是至关重要的. 针对现有实验方法无法完整检测出超快光学弹簧时空演变过程的弊端, 压缩超快成像技术为其实时成像提供了一种全新的实验工具, 这也为精确表征复杂超快激光场的时空信息提供了一种新的思路.

关键词 光学弹簧, 压缩超快成像, 计算成像, 单次测量

PACS: 42.25.Bs, 42.30.Va, 42.30.Wb, 95.75.Mn

类似于大质量粒子可以携带自旋角动量 (SAM) 和轨道角动量 (OAM) 两种角动量, 光子作为一种无质量的粒子, 同样具有这两种特性. 很早以前人们就意识到 SAM 与光束的偏振有关, 但直到 20 年前, 光的 OAM 才被证实与光具有涡旋相位面有关, 这种具有螺旋相位面、携带轨道角动量的光学空间模式被称为涡旋光束. 由于涡旋光束的独特性质及其在红外和可见光谱区域广泛的存在, 已经从量子信息到显微成像等领域得到了广泛的应用^[1]. 当两束具有不同拓扑荷数的涡旋光束相互叠加时, 由于干涉将导致特定的空间结构分布, 产生一种新的同时在相位和强度上都具有螺旋结构的光场, 这种光场类似于弹

簧结构, 如图 1 (a)所示, 因此被称为光学弹簧^[2]. 光学弹簧最主要的特征是其强度分布会随时间变化发生周期性旋转, 旋转速度可以在赫兹到太赫兹的范围内自由调整, 目前低速旋转的光学弹簧已被应用于生物物质, 例如 DNA 片段的移动和旋转, 以及在受激发射损耗显微技术 (STED) 中降低光漂白的作用. 理论上吉赫兹或太赫兹高速旋转的光学弹簧具有更丰富的应用, 然而还未见其相关应用的报道, 主要原因便是高速旋转的光学弹簧依靠超短激光脉冲产生, 而现有对其观测和表征的方法不够完善, 例如基于泵浦探测的方法不能检测到单一脉冲, 无法感知不同脉冲之间的变化, 基于分幅相机的方法由于观测序列深度小, 不能获得单个光学弹簧的完整时

引用格式: 蔡阳健. 超快光学弹簧的实时成像: 从泵浦探测到单次压缩测量的新方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 123456
Cai Y J. Real-time imaging of ultrafast light springs: a new approach from pump detection to single-shot compression measurement (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 123456, doi: 10.1360/SSPMA2016-00000

空信息, 因而限制了光学弹簧的实际应用.

图 1 (a) 光学弹簧结构示意图, (b) 利用压缩超快成像观测超快光学弹簧光路装置图, (c)-(d) 测得的两瓣和四瓣结构超快光学弹簧的时空演化完整过程^[3].

Figure 1 (a) Schematic diagram of the optical spring structure, (b) experimental design for imaging the ultrafast light springs via compressed ultrafast imaging, (c)-(d) the complete spatio-temporal evolution of the measured ultrafast optical spring with two- and four-petal structures^[3].

最近, 华东师范大学的研究团队利用一种称为压缩超快成像的技术, 实现了对单个光学弹簧超短

脉冲的实时成像^[3], 光路装置如图 1 (b) 所示, 该方法仅通过单次测量就可以获得光场的完整时空演化信息^[3]. 压缩超快成像是一种典型的计算成像方法, 通过结合压缩感知理论和时空偏转成像的方法, 对动态目标进行空间编码和数据压缩, 再利用图像重构算法实现数据解码, 最终还原出原始动态目标的时间和空间演化信息, 具有数据压缩比高, 时间分辨率高和重构帧数多的特点. 基于该系统, 研究人员首次成功地捕获了以吉赫兹速度旋转的两瓣和四瓣结构超快光学弹簧的完整时空演化过程, 部分实验结果如图 1 (c, d) 所示. 目前, 压缩超快成像技术的成像速度最高可达 70 万亿帧每秒, 可以对以太赫兹频率旋转的光学弹簧进行成像和测量, 太赫兹光学弹簧在检测生物分子的空间结构或功能演变方面具有关键作用, 通过这项工作, 有望推动光学弹簧在生物、医药等领域的应用, 进而掀开对超快涡旋光束研究的新篇章.

参考文献

期刊

- 1 Gèneaux R, Camper A, Auguste T, et al. Synthesis and characterization of attosecond light vortices in the extreme ultraviolet. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 1-6.
- 2 Pariente G, Quéré F. Spatio-temporal light springs: extended encoding of orbital angular momentum in ultrashort pulses. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 2037-2040.
- 3 Jin Chengzhi, Qi Dalong, Yao Yunhua, et al. Single-shot real-time imaging of ultrafast light springs. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2021, 64(12): 124212

Real-time imaging of ultrafast light springs: a new approach from pump detection to single-shot compression measurement

CAI YangJian^{1, 2*}

¹ *School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China*

² *School of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China*

Ultrafast light springs play an important role in particle rotation and manipulation, fluorescence super-resolution imaging, and optical information encoding, and therefore the accurate measurement of the spatio-temporal information of ultrafast light springs is of great importance. To address the drawback that existing experimental methods cannot detect the spatio-temporal evolution of ultrafast light springs, compressed ultrafast imaging offers a new possibility for its real-time imaging and a new way to accurately characterize the spatio-temporal information of complex ultrafast laser fields.

Ultrafast light springs, compressed ultrafast photography, computational imaging, single shot

PACS: 42.25. Bs, 42.30. Va, 42.30. Wb, 95.75. Mn

doi: 10.1360/SSPMA2016-00000