

基于空谱干涉和远场的分步式短脉冲激光 时间同步探测

母杰^{1,2,3}, 王逍^{1,2,3*}, 左言磊^{1,2,3}, 胡必龙^{1,2,3,4}, 李伟^{1,2,3,4},
曾小明^{1,2,3}, 周凯南^{1,2,3}, 王晓东^{1,2,3}, 孙立^{1,2,3}, 吴朝辉^{1,2,3}, 粟敬钦^{1,2,3}

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

²等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900;

³上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240;

⁴中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

摘要 提出了一种基于空谱干涉和远场的分步式短脉冲激光同步探测方法, 先利用空谱干涉捕捉时间同步的大范围, 再利用远场实现同步的高精度探测。采用数值模拟对基于空谱干涉和远场的同步探测进行了分析, 研究结果证明了该方法的可行性。该方法兼顾了大范围和高精度的特点, 且对光强要求不高, 能确保大部分能量用于物理实验研究, 适用于短脉冲激光系统。同时, 该方法可用于等离子体参数诊断、短脉冲激光相干合成等领域的时间同步的测量与控制。

关键词 激光光学; 时间同步探测; 空谱干涉; 远场; 短脉冲激光

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0401003

Time Synchronization Step Detection for Short Pulses Using Spatial-Spectral Interference and Far Field

Mu Jie^{1,2,3}, Wang Xiao^{1,2,3*}, Zuo Yanlei^{1,2,3}, Hu Bilong^{1,2,3,4}, Li Wei^{1,2,3,4},
Zeng Xiaoming^{1,2,3}, Zhou Kainan^{1,2,3}, Wang Xiaodong^{1,2,3}, Sun Li^{1,2,3},
Wu Zhaohui^{1,2,3}, Su Jingqin^{1,2,3}

¹Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics,

Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Mianyang, Sichuan 621900, China;

³Collaborative Innovation Center of IFSA (CICIFSA), Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

⁴Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract In this study, a step-detection method for the time synchronization of short pulses, based on spatial-spectral interference and far field, is proposed. A large range of time synchronization is first captured using the spatial-spectral interference, and the high-precision detection of which is then realized using far field. The proposed method is then simulated and analyzed. Results show the feasibility of this proposed method, suggesting that it exhibits advantages such as a large range and high precision. Moreover, the low requirement of energy makes it suitable for a short-pulse laser system as most of the energy can be applied to physical experiments. Furthermore, it can be used for the measurement and control of the time synchronization in plasma parameter diagnosis, coherent beam combination, and other fields.

Key words laser optics; time synchronization detection; spatial-spectral interference; far-field; short pulse

OCIS codes 140.3295; 320.7100; 120.5050; 260.3160

收稿日期: 2019-09-17; 修回日期: 2019-12-01; 录用日期: 2019-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(61505188)、离子体物理重点实验室基金(6142A04180303)

* E-mail: wangxiaocn@263.net

1 引 言

短脉冲激光持续时间短,能量集中,能够提供瞬间的超高功率密度和超强电磁场,为惯性约束聚变^[1-2]、等离子体物理^[3-4]、实验室天体物理^[5-6]等科学研究提供了技术基础。高精度同步测试与控制是短脉冲激光研究中的一个重要内容。比如:在惯性约束聚变中,经常利用多路激光束同时到达靶点的方式来提高到靶能量,对靶丸进行压缩^[7];在进行等离子体参数诊断时,通常需要一束与主激光同步的探针光,通过精密改变主激光与探针光之间的延时来获知等离子体的演化规律;在短脉冲激光相干合成方面,激光束间的同步要求非常严格,需要精确测量与控制束间的延时^[8]。对于传统的利用高速示波器加光电管来测量误差的方法,精度一般只能达到纳秒至数十皮秒量级。例如美国泰克公司的采样示波器,其上升时间约为 30 ps,只能实现 50 ps 以上脉冲信号的测量。即使使用精度较高的条纹相机,精度也只能达到皮秒量级,例如美国 NOVA 装

置^[9]和我国的神光 II 装置^[10]是利用条纹相机来获取光束间的时间同步信息的,其时间测量精度为 10 ps。本文提出一种基于空谱干涉和远场的分步式短脉冲激光同步测试与控制方法,首先利用空谱干涉捕捉时间同步的大范围,再利用远场实现同步的高精度探测。该方法能表征光束在远场的同步情况,可在增加同步探测范围的同时提高同步探测的精度,满足了应用的多样化需求。

2 原 理

2.1 空谱干涉

短脉冲的空谱干涉原理如图 1 所示^[11]。同源的两束短脉冲激光入射到衍射光栅上,光栅的衍射效应使光束中不同的光谱成分沿水平方向散开(光栅的刻线为竖直方向)。再利用柱透镜对经过光栅后的光束进行聚焦,其中水平方向上不同的光谱成分聚焦在不同的位置,竖直方向上的场保持不变。将相机放置在柱透镜的焦平面处,记录聚焦后的光场分布。

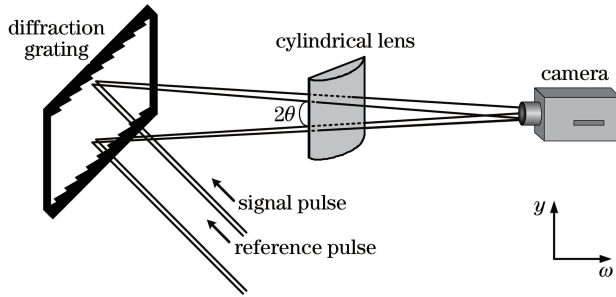


图 1 短脉冲的空谱干涉原理图

Fig. 1 Schematic of spatial-spectral interference for short pulses

焦平面处的光强分布可表示为^[11-13]

$$I(\omega, y) = I_{\text{ref}}(\omega) + I_{\text{sig}}(\omega) + 2\sqrt{I_{\text{ref}}(\omega)}\sqrt{I_{\text{sig}}(\omega)} \times \cos[2ky \sin \theta + \phi_{\text{sig}}(\omega) - \phi_{\text{ref}}(\omega)], \quad (1)$$

式中: $I_{\text{ref}}(\omega)$ 和 $I_{\text{sig}}(\omega)$ 分别为参考光和信号光的光谱强度; $\phi_{\text{ref}}(\omega)$ 和 $\phi_{\text{sig}}(\omega)$ 分别为参考光和信号光的光谱相位; ω 为角频率; y 为空间坐标; k 为波数; θ 为两束光夹角的一半。

当传输过程中参考光和信号光间没有高阶谱相位差引入时,分析空谱干涉亮条纹可得到空间坐标 y 与波长 λ 之间的关系表达式为^[12-13]

$$y = s\lambda - \frac{c}{2\sin \theta}t, \quad (2)$$

式中: t 为两束光之间的时间同步; c 为真空中的光速; $s = m/(2\sin \theta)$ 为亮条纹的斜率, m 为干涉级数。

对于暗条纹,也有(2)式的关系,区别在于 $s = (2m + 1)/(4\sin \theta)$ [$(2m + 1)$ 为干涉级数]。因此可以由空谱干涉条纹的斜率得到光束的束间同步信息。当光束间存在高阶谱相位差时,可通过预补偿的方式先控制该高阶谱相位差,再利用(2)式进行计算。

2.2 多光束远场

单光束的光场 $E(x, y)$ 可表示为

$$E(x, y) = A(x, y) \cdot \exp[i2\pi\varphi(x, y)], \quad (3)$$

式中: (x, y) 为近场坐标; $A(x, y)$ 为光束在空间上的振幅分布; $\varphi(x, y)$ 为光束在空间上的相位分布。

两路光束的出射光场可表示为

$$U(x, y) = \sum_{j=1}^2 E_j(x, y). \quad (4)$$

根据夫琅禾费衍射理论,两路光束的远场强度分布可描述为

$$I(u, v) = \left| c_0 \iint U(x, y) \exp \left[-i \frac{k}{f} (ux + vy) \right] dx dy \right|^2, \quad (5)$$

式中: (x, y) 为近场坐标; (u, v) 为远场坐标; $c_0 = \frac{1}{i\lambda f} \exp(ikf) \exp \left[i \frac{k}{2f} (u^2 + v^2) \right]$ 为系数因子, f 为光传播距离, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为光波长。

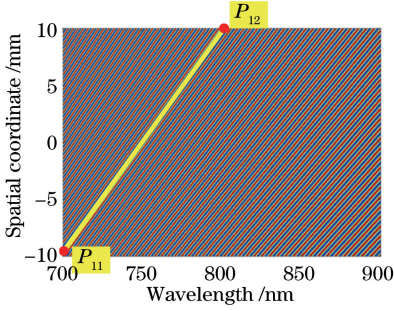


图 2 已知夹角情况下根据空谱干涉信息反演的时间同步

Fig. 2 Time synchronization retrieved from spatial-spectral interferogram with known angle

选择图中标记的亮条纹 ($P_{11}P_{12}$) 来计算两光束间的时间同步, 时间同步为 499.8 fs, 可以看出, 在已知两光束夹角的情况下, 根据条纹斜率得到的时间同步几乎与设定值相同, 这表明根据条纹斜率获取光束的束间同步是可行的。

假设并不知道两光束间夹角的确切大小, 则需要至少两条条纹才能进行时间同步计算。选择图 3 中所示的第一组亮条纹来进行计算, 得到的时间同步为 23.6 fs, 选择图 3 中所示的第二组亮条纹得到的时间同步为 484.9 fs。可以看出, 在光束夹角未知的情况下, 根据第二组亮条纹计算得到的时间同步精度要优于第一组亮条纹的计算结果。通常情况下, 条纹长度越长, 计算得到的 θ 和斜率越准确, 时间同步的计算精度也就越高。

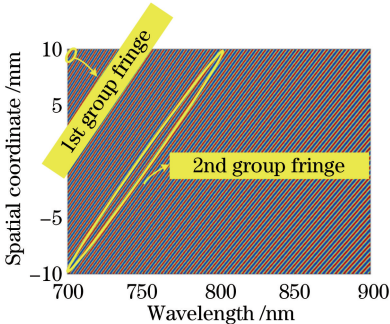


图 3 计算夹角情况下根据空谱干涉信息反演的时间同步

Fig. 3 Time synchronization retrieved from spatial-spectral interferogram with calculated angle

3 计算分析与结果讨论

3.1 基于空谱干涉的同步探测

假设参考光和信号光间没有高阶谱相位差, 两者之间的时间同步为 500 fs, θ 为 0.03° , 空间坐标 y 从 -10 mm 到 10 mm 以 $10 \mu\text{m}$ 的间隔变化, 波长 λ 从 700 nm 到 900 nm 以 0.1 nm 的间隔变化, 得到的空谱干涉信息如图 2 所示。

Point	Coordinate / (nm, mm)	Slope	t / fs
P_{11}	(700, -9.55)	1.9092×10^5	499.8
P_{12}	(802.4, -10)		

假设光路结构中设置有驱动器, 驱动器用于根据空谱干涉条纹斜率反演的结果控制时间同步。为便于观测效果, 以图 3 中所示的第一组亮条纹为例进行计算, 空谱干涉信息的演化过程如图 4 所示。由图 4 可以看出, 经过 5 次的同步补偿控制后, 残余的时间同步已经低于 1 fs。这表明在不知道光束夹角的情况下, 也可以实现对激光束间同步的高精度测量与控制。

3.2 基于远场的同步探测

基于远场进行同步的高精度探测是基于两光束的远场会随一个光学周期内的时间同步发生明显变化。

以两路波长为 800 nm、半峰全宽 (FWHM) 为 30 fs 的高斯脉冲为例, 令单光束的远场峰值光强为 1, 图 5 给出了两束光远场的峰值光强随时间同步的变化曲线。由图 5 可以看出, 整体上, 随着时间同步的增加, 峰值光强逐渐降低, 当两路脉冲完全同步时, 峰值光强最强。需要注意的是, 在局部地方, 峰值光强发生了剧烈变化。例如: 两光束完全同步时峰值光强为 4, 两光束时间同步为 1.33 fs 时峰值光强已经降低到 2.1; 之后, 峰值光强随着时间同步的增加逐渐增加, 当同步到一定值时, 峰值光强又开始逐渐下降, 并且该过程不断重复发生。

为叙述方便, 以下将时间同步用波长 λ 来表示。图 6 给出了两路光束的时间同步在 $0 \sim \lambda$ 之间变化时的远场焦斑。当时间同步为 0 时, 远场焦斑为理想情况下的整焦斑 [图 6(a)], 对应到图 5 中的远

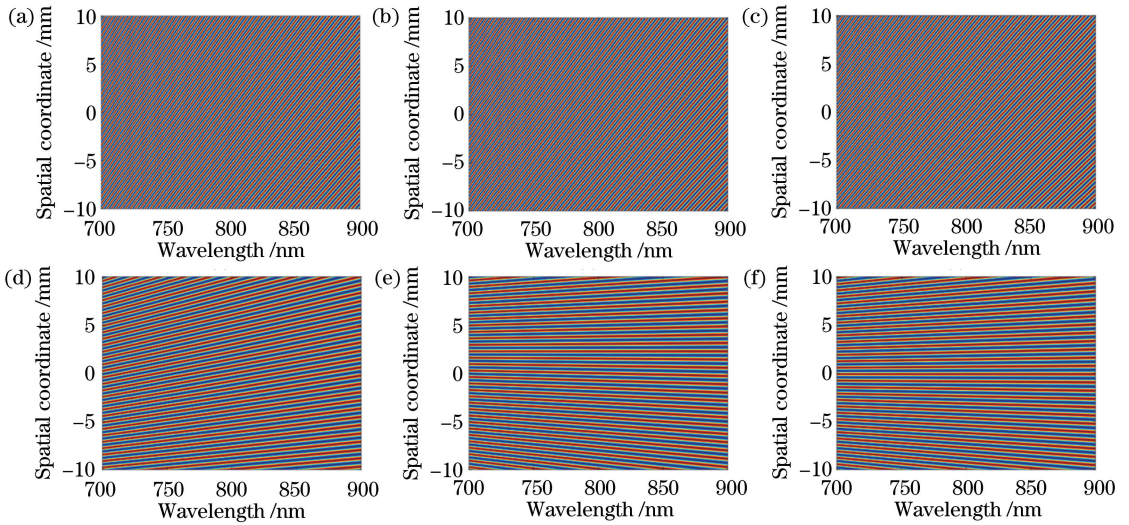


图 4 空谱干涉信息的演化。(a)初始干涉图;(b)第 1 次反演后的干涉图;(c)第 2 次反演后的干涉图;
(d)第 3 次反演后的干涉图;(e)第 4 次反演后的干涉图;(f)第 5 次反演后的干涉图

Fig. 4 Evolutionary process of spatial-spectral interferogram. (a) Initial interferogram; (b) interferogram after 1st inversion calculation; (c) interferogram after 2nd inversion calculation; (d) interferogram after 3rd inversion calculation; (e) interferogram after 4th inversion calculation; (f) interferogram after 5th inversion calculation

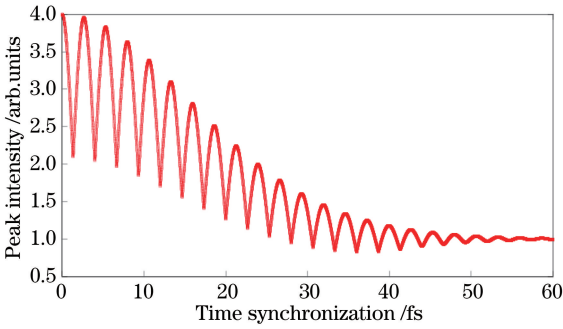


图 5 两光束峰值光强随时间同步的变化
Fig. 5 Peak intensity evolution with time synchronization between two short pulses

场峰值光强为 4; 当时间同步 $\in (0, \lambda/2)$ 时, 主瓣光强逐渐减弱, 右旁瓣光强逐渐增强; 当时间同步为 $\lambda/2$ 时, 远场焦斑由整焦斑分裂为两个等强度的光斑[图 6(c)], 对应到图 5 中的峰值光强 2.1; 当时间同步 $\in (\lambda/2, \lambda)$ 时, 左旁瓣光强逐渐增强; 当时间同步为 λ 时, 远场焦斑又变成整焦斑[图 6(e)]。

由图 6 可以看出, 两光束的远场焦斑形态随时

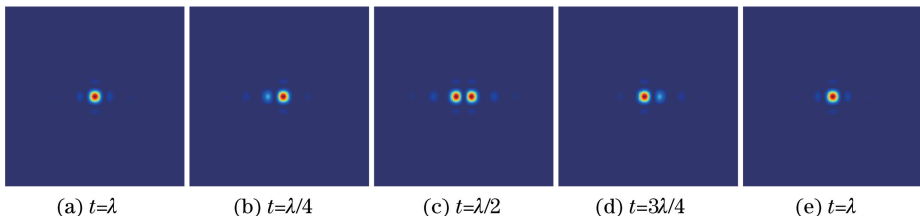


图 6 远场焦斑随一个周期内的时间同步的变化

Fig. 6 Far-field patterns along the time synchronization in an optical cycle

间同步发生周期性变化, 其峰值光强所在的位置与一个光学周期内的时间同步存在线性关系。因此, 可以利用远场来高精度地探测两光束间的时间同步。在操作时, 既可通过理论推导来确定上述的线性关系, 也可以通过对其中一条光路外加一个光学周期内的时间同步来标定得到。

将时间同步 t 表示为波长的整数倍和小数倍两部分: $t = n\lambda + n'\lambda$, ($n \in \mathbf{Z}$, $|n'| < 1$)。在进行同步探测与控制时, 首先根据空谱干涉信息确定时间同步的大范围, 对结果取光学周期的整数倍, 再根据远场来高精度地确定一个光学周期内的时间同步。该分步式方法可在增加同步探测范围的同时提高同步探测的精度, 满足应用的多样化需求。

4 结 论

本文提出了一种基于空谱干涉和远场的分步式短脉冲激光同步探测方法, 首先利用空谱干涉捕捉时间同步的大范围, 再利用远场实现同步的高精度

探测,并分别通过数值模拟进行了分析。该方法同时保证了探测范围和探测精度,且对光强要求不高,可采用透射光实现探测,能确保大部分能量用于物理实验研究,因此适合应用在短脉冲激光装置中。

参 考 文 献

- [1] Fan D Y, Zhang X M. Laser fusion and high power laser: history and progress [J]. *Physics*, 2010, 39(9): 589-596.
范滇元, 张小民. 激光核聚变与高功率激光: 历史与进展 [J]. *物理*, 2010, 39(9): 589-596.
- [2] Zhang X M, Wei X F. Review of new generation of huge-scale high peak power laser facility in China [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0100003.
张小民, 魏晓峰. 中国新一代巨型高峰值功率激光装置发展回顾 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0100003.
- [3] Li Y J, Yue D N, Deng Y Q, et al. Proton imaging of relativistic laser-produced near-critical-density plasma [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(15): 155201.
李曜均, 岳东宁, 邓彦卿, 等. 相对论强激光与近临界密度等离子体相互作用的质子成像 [J]. *物理学报*, 2019, 68(15): 155201.
- [4] Umstadter D. Relativistic laser-plasma interactions [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2003, 36(8): R151-R165.
- [5] Bulanov S V, Esirkepov T Zh, Habs D, et al. Relativistic laser-matter interaction and relativistic laboratory astrophysics [J]. *The European Physical Journal D*, 2009, 55(2): 483-507.
- [6] Zhang J, Zhao G. Introduction to laboratory astrophysics [J]. *Physics*, 2000, 29(7): 393-396.
张杰, 赵刚. 实验室天体物理学简介 [J]. *物理*, 2000, 29(7): 393-396.
- [7] Zhang B, Peng Z T, Xia Y W, et al. Conjugate-reflection-based measurement of time-synchronization in high-power laser facility [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0104002.
张波, 彭志涛, 夏彦文, 等. 基于共轭反射的高功率激光装置脉冲同步测试技术 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0104002.
- [8] Mu J, Li Z L, Jing F, et al. Coherent combination of femtosecond pulses via non-collinear cross-correlation and far-field distribution [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(2): 234-237.
- [9] Lerche R A. Timing between streak cameras with a precision of 10 ps [J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1346: 376-384.
- [10] Liu H, Peng Z T, Xu L B, et al. The research on synchronization measurement for multi-beams laser [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2009, 30(6A): 181-185.
刘华, 彭志涛, 徐隆波, 等. 多束激光时间同步测试技术研究 [J]. *计量学报*, 2009, 30(6A): 181-185.
- [11] Meshulach D, Yelin D, Silberberg Y. Real-time spatial-spectral interference measurements of ultra-short optical pulses [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1997, 14(8): 2095-2098.
- [12] Mu J, Wang X, Zuo Y L, et al. Time delay retrieval via the slope of spatial-spectral interference fringe for short pulses [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11052: 1105209.
- [13] Li Z L, Zuo Y L, Wu Z H, et al. Method of synchronization measurement via spatial-spectral interference in coherent combination of multi-channel ultra-short pulses [J]. *Laser Physics*, 2017, 27(8): 085001.