

色散扫描技术在超短脉冲表征中的研究进展

赵变丽 谢赞 卓宇涵 王锦红 谭欣 李逵 刘琦 张晓世

Research progress of dispersion scan techniques in ultrashort pulse characterization

ZHAO Bian-li, XIE Yun, ZHUO Yu-han, WANG Jin-hong, TAN Xin, LI Kui, LIU Qi, ZHANG Xiao-shi

引用本文:

赵变丽, 谢赞, 卓宇涵, 王锦红, 谭欣, 李逵, 刘琦, 张晓世. 色散扫描技术在超短脉冲表征中的研究进展[J]. 中国光学, 2026, 19(5): 1-18. doi: 10.3724/CO.2026-0017

ZHAO Bian-li, XIE Yun, ZHUO Yu-han, WANG Jin-hong, TAN Xin, LI Kui, LIU Qi, ZHANG Xiao-shi. Research progress of dispersion scan techniques in ultrashort pulse characterization[J]. Chinese Optics, 2026, 19(5): 1-18. doi: 10.3724/CO.2026-0017

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3724/CO.2026-0017>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

具有横向效应的半导体激光器的同步传输技术

Synchronization transmission technology of semiconductor lasers with transverse effect

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 559 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0031>

星载多普勒非对称空间外差干涉测量中条纹图案的相位畸变校正

Phase distortion correction of fringe patterns in spaceborne Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometry

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 382 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0007>

距离选通成像系统中短脉冲激光驱动技术研究

Short pulse laser drive technology in a distance-selective imaging system

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 567 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0142>

二维 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 的制备与光学表征研究进展

Recent progress on synthesis and optical characterization of two-dimensional $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$

中国光学 (中英文). 2023, 16(1): 24 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0071>

非线性系统中双频光栅相位测量

Phase measurement with dual-frequency grating in a nonlinear system

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 726 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0013>

超薄超短物像距高分辨率检测成像系统设计及试验

Design and experiment of high-resolution detection imaging system with ultra-thin and ultra-short object-image distance

中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 61 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0099>

色散扫描技术在超短脉冲表征中的研究进展

赵变丽^{1,4}, 谢 赞⁵, 卓宇涵², 王锦红², 谭 欣^{1,4}, 李 逵^{1,3}, 刘 琦^{1,3*}, 张晓世^{2,4*}

(1. 云南大学 材料与能源学院, 云南 昆明 650500;

2. 云南大学 物理与天文学院, 云南 昆明 650500;

3. 云南大学 现代工学院, 云南 昆明 650500;

4. 西南联合研究生院, 云南 昆明 650092;

5. 复旦大学 智能机器人与先进制造创新学院, 上海 200433)

摘要:色散扫描(Dispersion scan, D-scan)是一种基于色散调制与非线性频谱响应的超短激光脉冲表征技术, 凭借其极简的光路设计和对宽带频谱及相位演化特征的高灵敏响应, 已发展成为超短激光脉冲表征领域的重要工具。本文以 D-scan 技术持续适应激光脉冲表征实时性、鲁棒性等需求, 以及向单周期、深紫外等极端参数拓展为核心主线, 系统综述了 D-scan 技术在优化反演算法及实验方案拓展等方面的关键进展。首先, 本文梳理了 D-scan 反演算法的发展过程, 从早期的 Nelder-Mead 与差分进化算法, 到目前作为标准的通用脉冲反演算法, 再到实现毫秒级实时重构的深度学习技术。重点分析了各类算法在计算速度、鲁棒性及抗噪性能方面的提升。在实验技术方面, 首先回顾了基于二阶非线性的二次谐波 D-scan 技术, 详细讨论了其从传统扫描式方案向实时单发测量的技术跨越, 同时介绍了基于二次谐波产生的 D-scan 在矢量光场表征中的最新进展。随后, 针对二阶非线性在跨倍频程光谱重叠及深紫外波段相位匹配方面的物理限制, 本文进一步探讨了基于三阶非线性效应及其衍生的 D-scan 技术, 系统阐明了这些方法在拓展 D-scan 应用边界、实现单周期极限与深紫外波段表征方面的关键作用。最后, 本文总结了当前 D-scan 技术在外部元件依赖性、长波长拓展及长脉宽测量方面面临的挑战, 并对其在强场物理及阿秒科学中的未来发展方向进行了展望。

关键词:色散扫描; 超短脉冲表征; 相位反演; 非线性光学

中图分类号: 0437

文献标志码: A

doi: 10.3724/CO.2026-0017

CSTR: 32171.14.CO.2026-0017

收稿日期: xxxx-xx-xx; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 云南省高校服务重点产业科技专项项目 (No. K264201240002)

Supported by Special Science and Technology Project of Yunnan Provincial Universities Serving Key Industries (No. K264201240002)

Research progress of dispersion scan techniques in ultrashort pulse characterization

ZHAO Bian-li^{1,4}, XIE Yun⁵, ZHUO Yu-han², WANG Jin-hong², TAN Xin^{1,4},
LI Kui^{1,3}, LIU Qi^{1,3*}, ZHANG Xiao-shi^{2,4*}

(1. *Department of Materials and Energy, Yunnan University, Kunming 650504, China;*

2. *Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650504, China;*

3. *School of Engineering, Yunnan University, Kunming, 650500, China;*

4. *Southwest United Graduate School, Kunming, 650092, China;*

5. *College of Intelligent Robotics and Advanced Manufacturing, Fudan University, Shanghai, 200433, .China)*

* *Corresponding author, E-mail: qliu15@ynu.edu.cn; zhangxiaoshi@itc.ynu.edu.cn*

Abstract: Dispersion scan (D-scan) is an ultrashort laser pulse characterization technique based on dispersion modulation and nonlinear spectral response, and, owing to its extremely simple optical configuration and high sensitivity to broadband spectra and phase evolution, it has developed into an important tool in the field of ultrashort pulse characterization. Focusing on the ability of D-scan to meet the demands of real-time operation and robustness, as well as its extension toward extreme parameters such as single-cycle pulses and the deep-ultraviolet region, this paper systematically reviews the key progress of D-scan technology in terms of retrieval algorithm optimization and experimental scheme expansion. First, the evolution of D-scan retrieval algorithms is summarized. This progression traces the shift from early Nelder–Mead and differential evolution algorithms to the current standard generalized pulse retrieval algorithm, and ultimately to deep-learning-based techniques that enable millisecond-level, real-time reconstruction. Particular emphasis is placed on the improvements in computational speed, algorithmic robustness, and noise immunity achieved across these diverse approaches. Regarding experimental techniques, the paper examines second-harmonic-generation (SHG) D-scans based on second-order nonlinearities. It details the technological transition from conventional scanning methods to real-time, single-shot measurements, and highlights recent progress in applying SHG D-scans to vectorial optical field characterization. Subsequently, to circumvent the physical limitations of second-order nonlinearities—specifically concerning multi-octave spectral overlap and phase matching in the DUV region—this review further explores D-scan techniques leveraging third-order nonlinear effects and their derivatives. It elucidates how these methodologies push the application boundaries of D-scan toward the single-cycle limit and into the DUV regime. Finally, current challenges confronting D-scan technology are outlined, including its reliance on external components and its extension to longer wavelengths and longer pulse durations. The paper concludes with an outlook on the future trajectory of D-scan technology within strong-field physics and attosecond science.

Key words: dispersion scan; ultra-short pulse characterization; phase retrieval; nonlinear optics

1 引言

飞秒激光因其超高时间分辨率与极高峰值功

率等特点,在物理、化学、生物医学及材料科学等领域得到广泛应用^[1-9],对飞秒激光脉冲宽度及其时域—频域特性的精确表征,是实现高精度应用与性能优化的关键前提。然而,对瞬态光场的精

确时频表征却面临着根本性的物理挑战: 现有光电探测器的响应速度远低于飞秒光场的振荡频率。为突破这一限制, 研究者们提出了一系列巧妙的间接测量方法, 其核心思想是引入光学非线性效应, 利用脉冲自身或参考脉冲作为“超快门”来获取时域信息。基于这一思路, 自相关技术^[10-11]、频率分辨光学开关法(Frequency-Resolved Optical Gating, FROG)^[12-14]、光谱相位干涉直接电场重构法(Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-field Reconstruction, SPIDER)^[15-18]以及多光子脉冲内干涉相位扫描技术(Multiphoton Intrapulse Interference Phase Scan, MIIPS)^[19-20]等多种飞秒脉冲表征方法相继发展, 并在超快光学研究中发挥了重要作用。但这些方法在实际应用中仍普遍存在一定的局限性。例如, 自相关技术无法直接恢复相位信息, 难以有效表征复杂时域结构; FROG 的测量与反演过程较为复杂耗时, 且对实验条件和算法依赖强。SPIDER 虽无需迭代, 但对系统稳定性和光学对准敏感; 而 MIIPS 在处理强非线性或复杂光谱脉冲时解析难度显著增加。总体而言, 复杂的系统结构及对光路调节精度和环境稳定的敏感性, 制约了这些技术在实际场景中的广泛应用。相比之下, D-scan^[21]作为一种不依赖干涉测量、结构紧凑且易于实现的脉冲表征方法近年来受到研究者的广泛关注, 逐渐发展为飞秒脉冲表征领域的重要技术之一。

D-scan 是一种基于色散调制与非线性频谱响应的脉冲表征方法。其原理是通过可调色散元件(如楔形玻璃或棱镜对)改变入射脉冲的色散, 并利用光谱仪记录相应非线性信号频谱随色散变化的二维图谱(D-scan 迹图)。该迹图编码了脉冲的时频信息, 结合数值反演算法即可实现脉冲重构。这种独特的测量机制赋予了 D-scan 显著的

优势: 它摒弃了复杂的干涉光路或时域扫描装置, 仅依赖常规光学元件即可实现结构简便、易于对准的高效测量, 显著降低了开展实验的设备成本与操作门槛。同时, D-scan 具备优异的适应性, 不仅对脉冲能量要求较低, 还能有效表征复杂相位啁啾及紫外等特殊波段的脉冲。随着算法与实验方案的持续优化, 其在极端宽带和少周期脉冲表征中的潜能正不断被挖掘。更为重要的是, 经过十余年的发展, D-scan 已不再局限于最初的单一实现形式, 而是演化成为逐渐完备的技术体系。为了应对从少周期脉冲到复杂矢量光场, 从高重频振荡器到低重频放大器的各种极端测量需求, 研究者在基础理论、反演算法以及实验架构上进行了大量的拓展与创新。例如, 为解决实时表征而发展出的单发(single-shot)测量架构, 为突破波段限制而引入的基于三阶非线性效应的 D-scan 技术等, 都极大地拓展了其应用边界。

综上所述, D-scan 凭借结构简洁、适应性强等优势, 已成为飞秒脉冲表征领域的重要技术之一。随着相关反演算法及实现方案的不断完善, 多种特定形式的 D-scan 技术相继发展成熟。基于此, 本文围绕 D-scan 的反演算法及不同技术实现形式, 系统分析了其物理原理、实验结构、适用场景及性能特点, 全面展示了 D-scan 技术体系的发展脉络与应用潜力。最后, 概述了当前 D-scan 技术在实验实现与适用范围方面面临的主要挑战, 并对其在强场物理及阿秒科学等前沿领域中的未来发展方向进行了展望。

2 D-scan 反演算法

为了清晰地定位 D-scan 技术的优势与定位, 表 1 对比了目前主流的超短脉冲表征技术。

表 1 常用超短脉冲表征技术的比较

Tab. 1 Comparison of commonly used ultrashort pulse characterization techniques

技术	可获取信息	测量方式	光路复杂度	脉冲形状	主要优点	主要局限
自相关	脉宽	扫描	低	需假设	光路简单, 容易实现	无法获取相位
FROG	时域强度与相位	扫描	中	无需假设	信息完整、适用复杂脉冲	光路复杂难对准, 反演耗时
SPIDER	光谱相位(可重构时域)	单次	中-高	无需假设	测量速度快、直接反演	对实验稳定性和色散匹配敏感
MIIPS	光谱相位(可色散补偿)	扫描	中	无需假设	可同步实现相位测量与色散补偿	依赖脉冲整形器, 带宽受限
D-scan	相位与强度(可重构时域)	扫描/单次	低-中	无需假设	实验设置简单, 可与脉冲压缩机集成, 反演算法鲁棒性强	窄带长脉冲测量存在限制

D-scan 技术通过记录非线性信号光谱随色散量变化形成的二维迹图,巧妙地将飞秒脉冲复杂的时域与频域信息编码其中。然而,获取实验迹图仅是测量的第一步,其核心挑战在于求解一个典型的逆问题:如何从这份二维“密码图”中,准确解码并重建出待测脉冲的完整复振幅信息。由于非线性过程的复杂性,D-scan 迹图与脉冲光谱相位之间存在高度非线性的映射关系,加之实验数据不可避免地包含噪声干扰,使得该反演问题无法通过解析方法直接求解,必须依赖数值算法。在 D-scan 技术的发展过程中,反演算法的改进始终围绕具体实验形式而不断调整与完善。不同 D-scan 技术在信号类型、数据规模及采集方式上的差异,对反演算法的稳定性、计算效率和鲁棒性提出了不同要求。因此,高效的反演算法的开发,不仅是实现高精度脉冲重构的前提,更是提升 D-scan 技术实时性与适用范围的关键。

2.1 传统迭代优化算法

在 D-scan 反演中,核心任务是从测量的二维迹图中重构出待测超短脉冲的复振幅信息。通常假设待测超短脉冲在频域中的复振幅可表示为

$$\tilde{E}(\omega) = |\tilde{E}(\omega)| \times \exp(i \times \varphi(\omega)) \quad , \quad (1)$$

其中 ω 是激光脉冲的频率, $|\tilde{E}(\omega)|$ 为光谱振幅(可通过光谱仪直接测量), $\varphi(\omega)$ 为待求解的光谱相位。

在测量过程中,脉冲通过可调色散元件(如玻璃楔对或啁啾镜)引入已知的色散相位 $\Phi(\omega, z)$, 该相位可通过截断泰勒级数展开表示为

$$\Phi(\omega, z) = \frac{1}{2!} \times \text{GVD} \times \omega^2 + \frac{1}{3!} \times \text{TOD} \times \omega^3 + \dots \quad , \quad (2)$$

其中 z 代表色散扫描参数(如玻璃插入量), GVD 和 TOD 分别表示二阶色散和三阶色散。引入色散后的频域电场在第 l 次迭代中可表示为

$$\tilde{U}(\omega, z)_l = \mathbf{E}(\omega)_l \times \exp(i \times \Phi(\omega, z)) \quad , \quad (3)$$

其中, $\mathbf{E}(\omega)_l$ 为初始猜测;该电场经逆傅里叶变换 F 至时域 $\tilde{U}(t, z)_l$ 、经过非线性过程(以 SHG 为例)作用后再进行傅里叶变换,可得到对应的 D-scan 迹图

$$\tilde{S}(\omega, z)_l = \mathcal{F} \left\{ \tilde{U}(t, z)_l^{SHG} \right\} \quad , \quad (4)$$

对于基于三次谐波产生的色散扫描(Third

Harmonic Generation Dispersion scan, THG D-scan)或其他高阶过程,仅需将时域的指数项改为相应的阶数 n 。

反演的目标在于寻找一组最优光谱相位 $\phi(\omega)$,使得模拟迹图 $\mathbf{S}$ 与实验测量迹图 $\mathbf{S}_{meas}$ 之间的差异最小。这一差异通常由“D-scan 误差”(G-error)来量化:

$$G = \sqrt{\frac{1}{N_j N_k} \sum_{j,k} [I^{meas}(\omega_j, z_k) - \mu I^{retr}(\omega_j, z_k)]^2} \quad , \quad (5)$$

其中 μ 为归一化因子,式中 N_j 和 N_k 分别为频率和色散扫描点的采样数, $I^{meas}(\omega, z)$ 和 $I^{retr}(\omega, z)$ 分别为测量和反演迹图的强度分布。

由于 D-scan 迹图与光谱相位之间存在复杂的非线性映射关系,该逆问题无法通过解析法求解,必须借助数值迭代算法寻找全局最优解。早期 D-scan 相位反演主要依赖通用的数值优化算法。Nelder-Mead(Downhill Simplex)算法是 D-scan 最初采用的反演方法^[21],其无需梯度信息、实现简单且对初始猜测相对不敏感,适用于信噪比较一般的实验数据。然而,该算法收敛速度较慢,计算效率随参数维度增加而显著下降,且在复杂脉冲条件下易陷入局部极小值。

为提升全局搜索能力,避免局部最优解的局,Escoto 等人引入了差分进化算法(Differential Evolution, DE)^[22, 23]。该算法通过种群全局优化策略显著提高了复杂脉冲(如包含高阶色散或多脉冲结构)的反演成功率,但计算代价较高,单次反演通常耗时达到分钟量级。相比之下,Levenberg-Marquardt(LM)算法^[24, 25]利用梯度信息实现了更快的局部收敛,但高昂的计算成本限制了其在高分辨率实时反演中的应用^[26]。

随着 D-scan 技术逐步从概念验证走向常规应用,研究者对其反演结果稳定性和计算效率的要求不断提高。特别是随着扫描点数增加、光谱采样精度提升的条件下,早期全局优化算法在反演时间和重复性方面逐渐暴露出局限性。随着 D-scan 实验复杂度和重复率的不断提升,结合物理模型约束的迭代算法被逐渐引入并发展。

2.2 通用脉冲反演算法

为了克服传统算法在速度、精度与鲁棒性之间的权衡难题,Geib 等人于 2019 年提出了通用

脉冲反演算法(Common Pulse Retrieval Algorithm, COPRA)^[26], 具体的算法流程如图 1 所示。COPRA 的提出标志着 D-scan 算法进入成熟阶段, 与传统

方法不同, 该算法不再依赖于特定的非线性过程物理模型, 而是创造性地融合了广义投影法的思想与梯度下降法的优势。

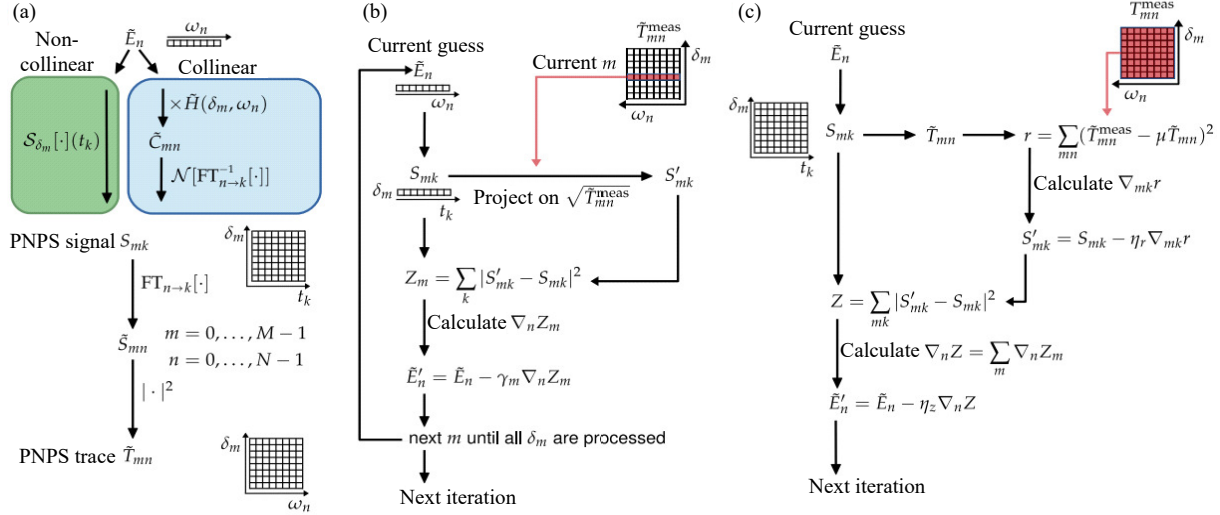


图 1 (a) 离散 PNPS 形式体系示意图; (b) COPRA 算法第一阶段: 局部迭代; (c) COPRA 算法第二阶段: 全局迭代^[22]

Fig. 1 (a) Diagram of the discrete PNPS formalism. (b) First stage of COPRA: local iteration. (c) Second stage of COPRA: global iteration^[22]

从机制上看, COPRA 将迭代过程分解为局部投影与全局更新两个阶段。在每一次迭代中, 首先进行局部投影: 算法逐次处理每个参数 δ_m 对应的光谱, 利用梯度下降法快速降低当前的局部误差, 从而获得修正后的辅助场:

$$\tilde{E}' = \tilde{E} - \gamma \nabla_E Z_m, \quad (6)$$

其中 $\tilde{E}'$ 是当前迭代的脉冲光谱(复振幅), 是更新后的脉冲光谱, γ 是迭代步长, Z_m 为对应参数下的局部误差函数, $\nabla_E Z_m$ 是单光谱的误差函数对的梯度。局部误差函数定义为:

$$Z_m = \sum_k |S'_{mk} - S_{mk}(\tilde{E})|^2, \quad (7)$$

其中 S'_{mk} 为模拟信号; S_{mk} 为测量信号: 即第 m 个色散参数下, 第 k 个频率点的一维测量信号值。

随后进入全局更新阶段, 算法通过最小化所有辅助场与待反演脉冲之间的总误差函数, 实现对脉冲复振幅的整体优化更新:

$$\mathbf{E}_{k+1} = \mathbf{E}_k - \eta_z \nabla_E Z, \quad (8)$$

其中 η_z 是迭代步长, Z 是全局总误差函数, 是所有局部误差的总和:

$$Z = \sum_m Z_m = \sum_{mk} |S'_{mk} - S_{mk}(\tilde{E})|^2, \quad (9)$$

得益于梯度下降算法的高效性, COPRA 展现出显著的性能优势: 在速度方面, 其收敛速度比传统的 Nelder-Mead 算法快 1-2 个数量级, 通常仅需数秒即可完成高质量反演; 在通用性方面, 该算法结构不依赖于特定的非线性算子, 可无缝适用于基于二次谐波产生的色散扫描(Second Harmonic Generation Dispersion scan, SHG D-scan)、THG、基于自衍射的色散扫描(Self-Diffraction Dispersion scan, SD D-scan)等多种 D-scan 变体; 在鲁棒性方面, 梯度下降过程天然具备对高频噪声的平滑作用, 使其在处理高噪声实验数据时依然保持良好的稳定性。

2.3 基于深度学习的反演算法

近年来, 人工智能技术的迅猛发展为解决 D-scan 反演中的效率与鲁棒性瓶颈提供了全新的视角。为满足快速数据处理的技术需求, 研究者开始引入基于数据驱动的反演方法, 尝试在保持重构精度的同时显著缩短计算时间。Zahavy 等人^[27]率先将深度神经网络(Deep Neural Network, DNN)引入到 FROG 迹图的反演中, 证明了神经网络可以作为一种高效的非线性映射工具。这种方

法从根本上改变了传统“迭代拟合”的思路,将复杂的相位恢复建模为一个从二维光谱迹图到一维相位曲线的回归预测问题。其核心在于通过大量数据训练一个 DNN,建立从输入测量迹图 S_{meas} 到输出光谱相位 $\varphi(\omega)$ 的复杂非线性映射函数。

在此基础上, Kleinert 等人^[28] 首次成功将 DNN 应用于 SHG D-scan 反演。通过构建包含大量随机模拟脉冲的数据集进行训练,该网络实现了对

超短脉冲相位的直接、准确预测。该工作最显著的突破在于实现了速度与鲁棒性的双重提升:训练好的网络能够在约 16 ms 内完成单次反演,比传统 DE 算法快数千倍;同时,该网络在信噪比低至 5 的恶劣条件下仍能保持较高的反演保真度,有效克服了传统算法对噪声敏感的缺陷,实验结果如图 2 所示。

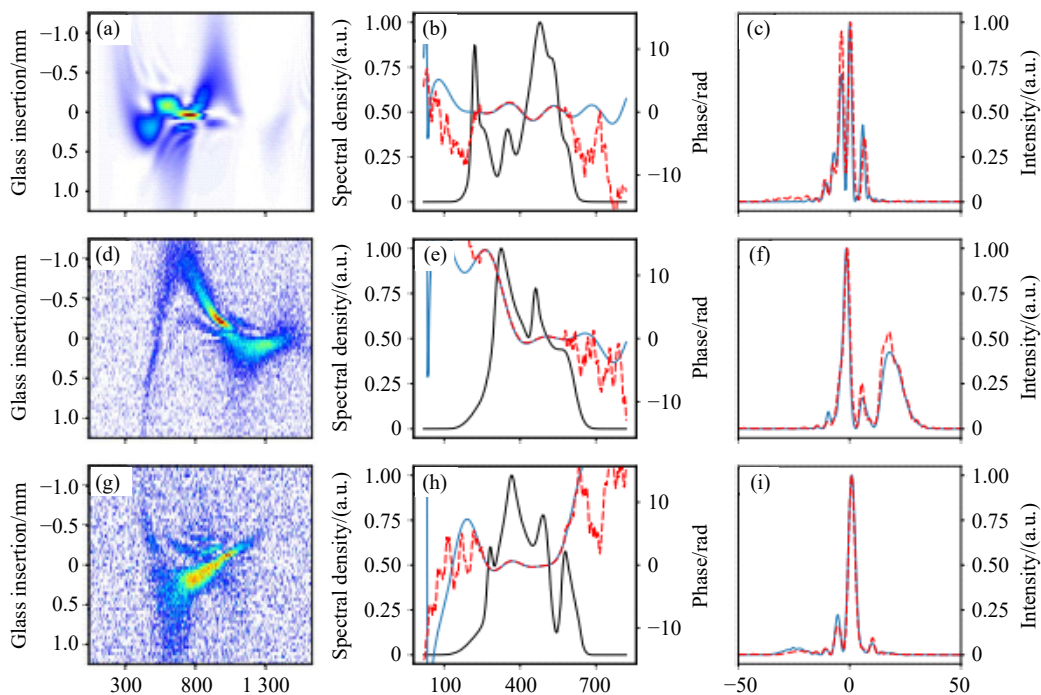


图 2 不同噪声水平下的模拟 SHG D-scan 测量结果: (a)、(d)、(g) 分别展示了随机生成的相位、强度、频谱响应函数加 0%、5%、10% 白高斯噪声(WGN)的模拟 SHG D-scan 轨迹; (b)、(e)、(h) 对应时间带宽积分别为 3.4、7.1 和 5.3 的频谱强度(黑色曲线)、原始信号(蓝色曲线)及恢复相位(红色虚线曲线); (c)、(f)、(i) 为最优玻璃插入点处原始(蓝色曲线)与恢复(红色虚线曲线)脉冲波形^[24]

Fig. 2 Simulated SHG d-scan measurements for different noise levels. (a), (d), (g) Simulated SHG d-scan traces with randomly generated phases, intensities, spectral response functions, and additive WGN of 0%, 5%, and 10%, respectively. (b), (e), (h) Spectral intensities (black curves) together with the original (blue curves) and the retrieved phases (dashed red curves), corresponding to time-bandwidth products of 3.4, 7.1, and 5.3, respectively. (c), (f), (i) Original (blue curves) and retrieved (dashed red curves) pulse shapes in time domain at the optimum glass insertion points^[24]

除了显著降低计算时间,深度学习强大的特征提取能力还被用于“解锁”那些物理模型过于复杂、难以通过传统解析法求解的新型测量系统。例如, Ziv 等人^[29] 提出了一种基于多模光纤和非线性晶体的全光纤单发测量方案。由于多模光纤中的模式色散与干涉会产生极其复杂的散斑图案,传统的物理建模反演极为困难。作者利用深度学习成功从杂乱的二维散斑图中重构出了输入脉冲的时域波形,回归架构如图 3 所示。这一

工作有力地证明,深度学习不仅能替代传统的迭代算法,更可以作为一种通用的数值工具,解决那些物理模型未知或过于复杂的逆问题。

然而,尽管纯数据驱动模型具有极快的速度,但其输出精度往往受限于训练数据集的覆盖范围,且有时会因缺乏明确的物理约束而导致结果偏差。针对这一问题, Sytceovich 等人^[30] 提出了将深度学习与物理模型相结合的“混合反演策略”:首先利用训练好的神经网络快速生成高置信度的

初始相位猜测, 随后结合物理模型驱动的迭代算法(如 COPRA)进行精细优化。这种策略巧妙地结合了两者的优势, 既保留了神经网络毫秒级的

反演速度, 又利用 D-scan 的物理约束确保了最终结果的高精度与可靠性。

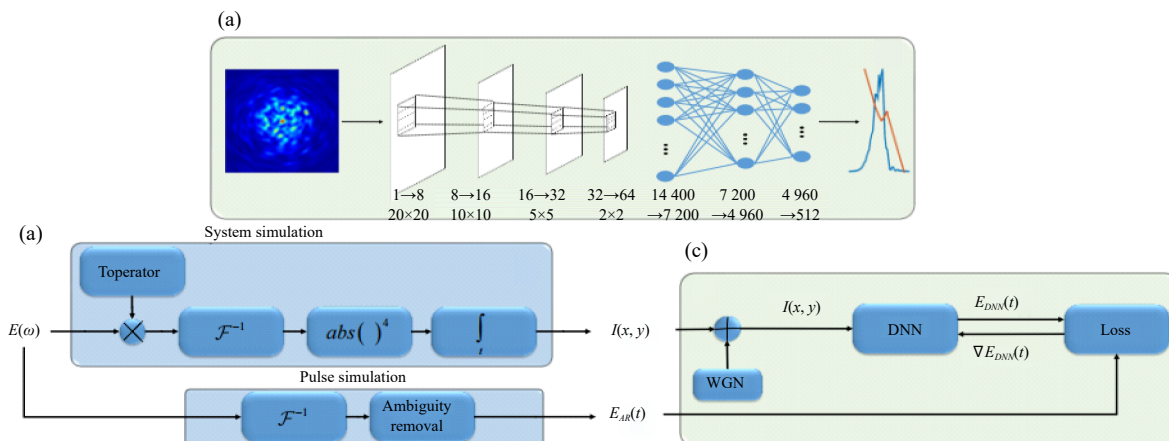


图 3 (A) 回归网络架构: 包含四个卷积神经网络层, 后接三个全连接层。输入信号为总频干扰模式, 经计算层处理后, 最终输出为时域电场实部与虚部的矢量形式; (B) 总频干扰测量及输入频谱脉冲标签生成的框图, 模拟输入信号被送入回归网络; (C) 回归网络的监督训练过程。每个干扰模式通过网络进行重建, 重建脉冲与真实脉冲波形的误差值通过反向传播和梯度下降算法进行网络训练, 从而优化网络参数^[25]

Fig. 3 (A) Regression network architecture: four CNN layers followed by three fully connected layers. The input to this network is a sum frequency interference pattern, which is passed through the computational layers, until a final output is produced in the form of a vector of the real and imaginary parts of the temporal electric field. (B) Block diagram of sum frequency interference measurement and of the label generation from an input spectral pulse. The input of the simulation is passed on to the regression network. (C) Supervised training of the regression network. Each interference pattern is passed through the network to create a reconstruction. The error between a reconstructed pulse and its ground truth pulse shape is used in back propagation and gradient descent to train the network and improve the network parameters^[25]

从早期扫描式 D-scan 的稳定反演, 到单发和 multidimensional D-scan 对快速计算的需求, 算法的改进为不同 D-scan 技术形态的实现提供了必要的计算支撑。随着高效反演算法体系的逐步成熟, D-scan 在数据处理层面的瓶颈已基本突破, 其整体表征性能越来越依赖于实验端所获取二维迹图的质量。在实验实现层面, 根据所利用非线性效应阶数的不同, D-scan 技术主要沿两条路线发展: 一是以二阶非线性效应为核心的 SHG D-scan; 二是面向超宽带与特殊波段需求发展的三阶非线性 D-scan 技术。接下来的章节将详细阐述这两种技术路线的实验发展历程, 并探讨它们在不同光场表征场景下的独特优势。

3 基于二阶非线性的 D-scan

基于二阶非线性效应的 D-scan, 特别是 SHG

D-scan, 是该技术最早提出、理论模型最成熟且应用最为广泛的形式。它奠定了 D-scan 技术“色散调制-非线性响应-数值反演”的基本框架, 并在此基础上演化出多种变体以适应不同的测量需求。本章将以标准的扫描式 SHG D-scan 为起点, 重点阐述其如何通过时空转换实现单发测量, 以及如何从标量场拓展至矢量场表征, 最后系统分析二阶非线性效应在极端参数测量中的固有局限性。

3.1 传统扫描式 SHG D-scan

传统扫描式 SHG D-scan 是整个技术体系的基石。该技术于 2012 年由 Miranda 等人^[21, 31]首次系统性提出并实验验证。其核心思想是利用机械装置(如电机驱动的玻璃楔对)逐点改变光路中的材料色散量, 并记录每个色散扫描点相应的 SHG 光谱。图 4 展示了其经典实验装置, 该装置利用啁啾镜与 BK7 玻璃楔成功实现了对钛宝石振荡器输出的 7.1 fs 脉冲的同步压缩与测量。这

一工作确立了 SHG D-scan 相较于传统方法的关键优势: 结构简洁、无需复杂的干涉分束光路、对光路准直不敏感, 同时也指出了其对倍频带宽及迭代反演的依赖。

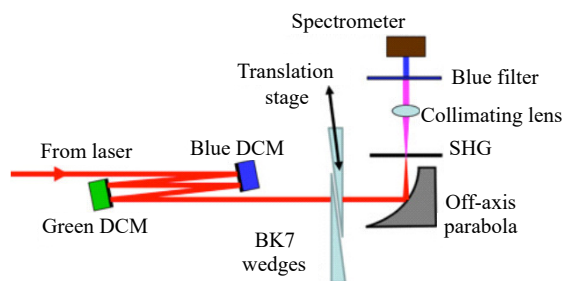


图 4 SHG D-scan 实验装置; 激光器采用 Femtolasers Rainbow CEP(重复频率 80 MHz, 单脉冲能量 2.5 nJ, FWHM 傅里叶极限 6 fs), SHG 为 20 μm 厚 BBO 晶体^[17]

Fig. 4 Experimental setup. The laser is a Femtolasers Rainbow CEP (80 MHz repetition rate, energy per pulse of 2.5 nJ, FWHM Fourier limit of 6 fs), SHG is a 20 μm thick BBO crystal^[17]

随后, 为了验证该技术在复杂光谱条件下的鲁棒性, Miranda 等人^[31]进一步将 SHG D-scan 应用于空芯光纤压缩后 6 fs 超宽带脉冲测量, 证明了即便在光谱结构复杂或存在调制的情况下, 通过优化算法仍能准确反演相位。但研究同时指出, 在跨倍频程光谱条件下, 倍频晶体的相位匹配带宽将成为关键限制因素。

随着技术的不断成熟, Sytceovich 等人^[30]对 D-scan 技术进行了系统性回顾, 总结了该技术在 3.4 fs 至 43 fs 及更长脉宽范围、覆盖可见光至红外波段的广泛适用性, 并详细探讨了不同色散元件对测量灵敏度的影响, 进一步确立了其作为超

短脉冲测量通用工具的地位。

3.2 单发 (Single-shot) SHG D-scan

尽管传统扫描式 D-scan 具有极高的测量精度, 但其依赖机械扫描逐点采集数据的工作模式限制了其测量速度, 难以满足对单发脉冲诊断或不稳定光源实时监测的需求。为了克服这一时间维度上的瓶颈, 研究人员引入了“空间多路复用”的概念, 即将色散扫描的维度从“时域顺序加载”转换为“空域并行编码”, 从而发展出了单发 SHG D-scan 技术。在随后的发展历程中, 为了应对不同应用场景的需求, 研究者们不断探索新的空间色散引入机制, 不仅实现了实时测量, 更成功将该技术的适用范围从最初的少周期极限拓展至百飞秒量级。

Fabris 等人^[32]率先提出了首个单发 SHG D-scan 方案, 实现示意如图 5 所示, 利用 BK7 玻璃棱镜在光束横截面上引入空间色散, 使得光束不同空间位置携带不同的色散量。并通过成像光谱仪一次性记录整个光束截面的 SHG 光谱, 即可在单次激光发射中获取完整的二维 D-scan 迹图。该方案成功实现了经空芯光纤压缩后亚 3.5 fs 少周期脉冲的实时表征, 确立了“空间换时间”的基本架构, 但该方案受限于棱镜材料的色散率, 主要适用于极短脉冲测量。为了进一步拓展脉冲测量范围, Salgado-Remacha 等人^[33]提出了一种基于无序非线性晶体(如铌酸锶钡, Strontium Barium Niobate, SBN)的横向二次谐波(transverse SHG, TSHG)单发方案, 利用晶体自身的宽带横向相位匹配特性和高色散, 同时完成了色散引入与倍频产生, 成功测量了 46 fs 的脉冲。

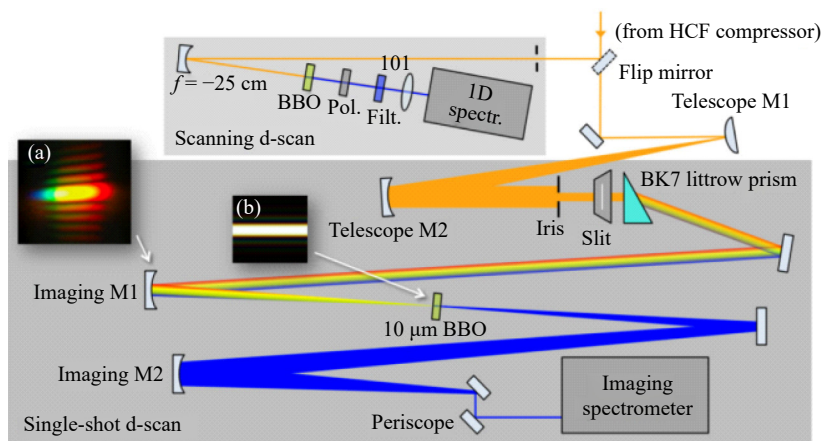


图 5 光学装置: 包括上方的扫描 D-scan 和下方新型单发 D-scan 装置^[28]

Fig. 5 Optical setup, comprising the scanning d-scan setup (top) and the new single-shot d-scan implementation (bottom)^[28]

Sytceвич 等人^[30]在其综述中详细梳理了单发 SHG D-scan 的早期实现路径,其核心思路是利用棱镜引入横向空间色散并通过特殊切割的非线性晶体实现横向倍频。这些方法虽然成功实现了对少周期脉冲的单发测量,但也面临着显著的物理限制:所需的色散扫描范围随着待测脉冲宽度的增加呈二次方增长,同时受限于棱镜材料的色散率,若要测量长脉冲(如 >100 fs),往往需要极大的光束孔径和棱镜尺寸,使系统在实际应用中难以实现。

在此基础上,为了应对不同脉宽的测量需求,多种空间色散编码方案被相继提出。针对长脉冲测量对大色散范围的需求,Capdeville 等人^[34]提出了一种多重反射单发 SHG D-scan 技术。该方案通过光束在平行镜片间的多次反射引入阶梯式色散,在 820 nm 波段引入了高达 $31\,100$ fs² 的群

延迟色散(Group Delay Dispersion, GDD),成功实现了对 100 fs 双脉冲序列的单发测量,显著拓宽了单发 D-scan 的测量窗口。近年来又发展出多种基于衍射光栅的改进方案,以进一步提升单发 D-scan 的可调色散范围。Díaz Rivas 等人^[35]结合棱镜与光栅设计了一种“Grism”结构(ZnS 棱镜+透射光栅),在 800 nm 波段实现了 $3\,200$ fs² 的色散调节范围,适用于 25 fs 左右脉冲的单发测量,但受限于 ZnS 材料特性,该方案不适用于紫外波段。为了进一步突破色散上限,Díaz Rivas 等人^[36]首次将单一衍射光栅空间依赖 GDD 效应应用于单发 SHG D-scan 技术。成功构建了色散范围高达 $\pm 100\,000$ fs² 的单发装置,如图 6 所示,实现了对 50~170 fs Yb 激光脉冲的单发测量,突破了传统棱镜方案难以测量长脉冲(>100 fs)的限制。

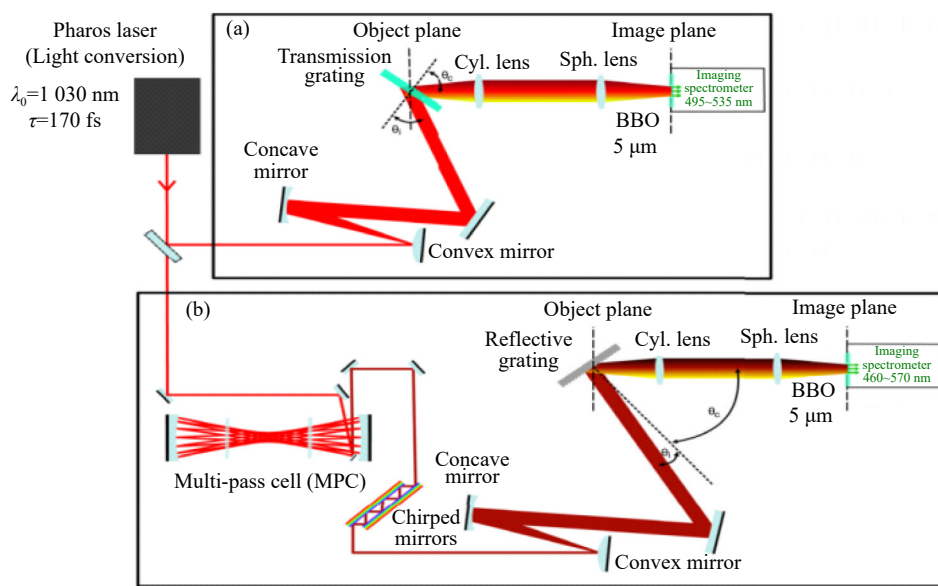


图 6 实验装置示意图: (a) 170 fs 脉冲的单发 D-scan; (b) 经过 MPC 后 50~80 fs 脉冲的单发 D-scan^[32]

Fig. 6 Schematic of the experimental setup: (a) single-shot d-scan of 170 fs pulses; (b) single-shot d-scan of 50-80 fs pulses after the multi-pass cell^[32]

3.3 基于 SHG D-scan 的矢量光场表征

随着超快光学研究的深入,许多复杂的非线性过程(如高次谐波产生、阿秒脉冲生成)对驱动脉冲的时变偏振态高度敏感。传统的标量电场表征已无法满足需求,促使 SHG D-scan 技术向矢量光场(偏振态)表征拓展。

Díaz Rivas 等人^[37]利用如图 7(a)所示的实验装置探索了时变偏振态的测量,通过记录两个正交偏振分量及中间角度投影的 D-scan 迹图,成功

重构了通过波片组合生成的 5.5 fs“偏振门(Polarization Gate)”脉冲,揭示了脉冲内部偏振态随时间的演化过程(图 7(b-c)所示),验证了 SHG D-scan 在矢量场测量中的潜力。为了彻底地解决偏振测量中的模糊性问题,Pérez-Benito 和 Weigand 提出了结合横向光电场的断层超快恢复技术的色散扫描(Dispersion scan technique in combination with the tomographic ultrafast retrieval of transverse light E-fields procedure, D-TURTLE)^[38],该方法借

鉴了层析成像思想,通过采集四个特定角度(0° , 90° , $\pm 45^\circ$)的 SHG D-scan 迹图,实现了对 5.5~7 fs 脉冲全偏振态的无歧义反演。D-TURTLE 不仅能精确测定脉冲的椭圆率和方位角,还能唯一确定

光场的旋向性(手性)以及各偏振分量间的相对时延,即便在两个分量时域不重叠的情况下依然有效。这一突破使得 SHG D-scan 技术正式具备了对复杂矢量超短脉冲进行完整时空表征的能力。

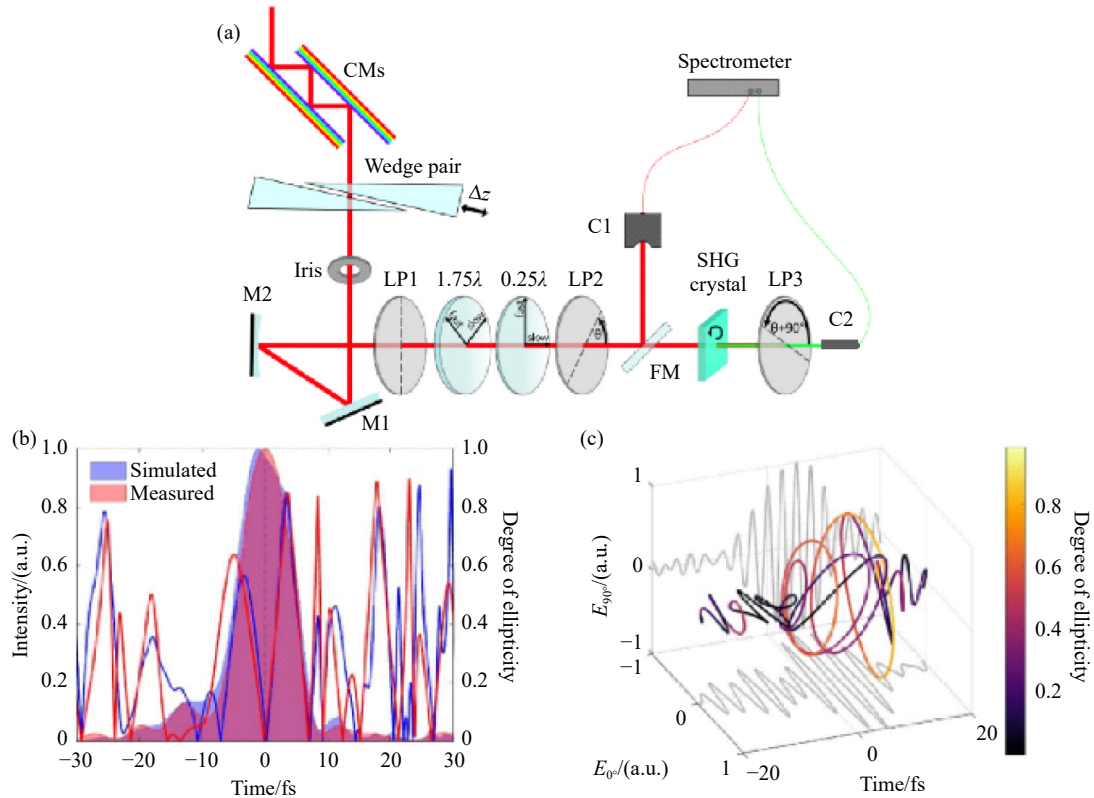


图 7 (a) 偏振 D-scan 装置示意图: M 代表金属镜, FM 代表翻转镜, LP 代表线性偏振器, C 代表光收集器; (b) 蓝色与红色阴影区域分别对应偏振的模拟与实测包络曲线, (b) 蓝色与红色阴影区域分别对应偏振的模拟与实测包络曲线, 蓝色与红色线条分别代表模拟与实测偏振门的椭圆度; (c) 彩色曲线展示了电场端点随时间的演变过程, 颜色深浅对应偏振态椭圆度的变化, 底部及背景中的线条分别表示电场的水平与垂直分量^[33]

Fig. 7 (a) Schematic diagram of the polarization d-scan setup. 'M' denotes Metallic Mirror, 'FM' for Flip Mirror, 'LP' for Linear Polarizer, and 'C' for Light Collector. (b) The shaded blue and red areas represent the simulated and measured envelopes of the polarization gate, respectively. The blue and red lines represent the degree of ellipticity for the simulated and measured polarization gate, respectively. (c) The colored line depicts the electric field endpoint's evolution over time, with the color indicating the polarization state's degree of ellipticity. The lines on the bottom and in the background represent the electric field's horizontal and vertical projections, respectively^[33]

3.4 SHG D-scan 的内在局限与挑战

尽管基于二阶非线性效应的 SHG D-scan 技术凭借其高转换效率和装置的简洁性,已成为当前超短脉冲测量的主流方案,但在面对光谱范围极宽或波长极短等极端参数测量需求时,其固有的物理局限性逐渐显现,成为制约技术进一步拓展的瓶颈。

首要挑战在于跨倍频程光谱的重叠干扰与相位匹配难题。对于单周期或亚周期的超宽带脉冲,其基频光谱的高频部分常与倍频信号的低频

部分发生重叠,由此产生的干涉效应会在 D-scan 迹图中引入复杂结构,显著增加相位反演的难度与不确定性。同时,SHG 过程严格依赖非中心对称晶体的相位匹配条件,这在极宽光谱范围内难以兼顾,直接限制了测量带宽。

此外,短波长波段的材料特性也构成了严重制约。在深紫外及真空紫外波段,绝大多数非线性晶体不仅存在强烈的材料色散,还面临严重的吸收损耗,这使得高效的 SHG 信号产生变得极为困难。正是这些源于二阶非线性过程本身的内在

物理约束,迫切敦促研究者寻求新的突破路径,即利用不依赖严格相位匹配且适用波段更广的三阶非线性效应来构建新一代 D-scan 技术。

4 基于三阶非线性的 D-scan

与高度依赖晶体对称性和相位匹配条件的 SHG 过程不同, 三阶非线性效应普遍存在于包括各向同性介质(如玻璃、气体)在内的多种光学材料中, 这一根本特性极大地拓宽了非线性介质的选择范围。更重要的是, 基于三阶效应衍生的 D-scan 技术具备解决极端测量难题的独特优势: THG 信号在频谱上与基频光大跨度分离, 从根本上避免了倍频程光谱条件下的信号重叠问题; 而基于简并四波混频过程的交叉偏振波(Cross-Polarized Wave, XPW)与 SD 技术, 其非线性信号与基频光波长相同, 天然满足超宽带相位匹配条件, 并消除了深紫外波段频率上转换带来的探测困难。这些特性使得基于三阶非线性的 D-scan 技术在单周期脉冲、超连续谱以及深紫外等特殊波段的表征中, 展现出二阶技术无法比拟的潜力。

4.1 THG D-scan

为解决 SHG D-scan 在跨倍频程光谱条件下面临的信号重叠问题以及深紫外波段严格的相位匹配限制,研究者提出了基于三阶非线性效应的 THG D-scan 技术,其实验装置如图 8 所示^[39]。

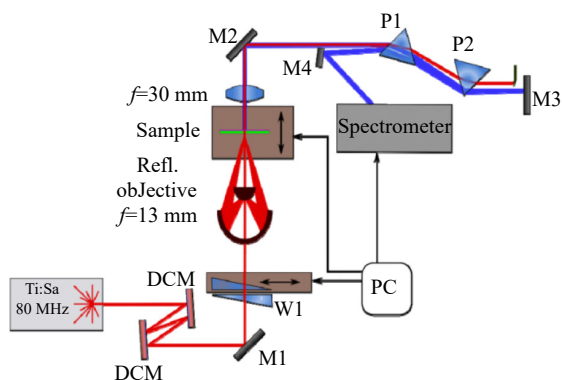


图 8 THG D-scan 实验装置^[35]

Fig. 8 Experimental setup used for THG d-scan^[35]

在介质选择方面,新型二维材料与传统材料各具特色。*Silva* 等人^[40]率先利用多层石墨烯作为非线性介质,利用其原子层厚度带来的无相位失配优势和超宽带响应,成功在 800 nm (7.2 fs) 及 3.1 μm (67 fs) 波段实现了脉冲测量,确立了该

技术在避免倍频程光谱干扰方面的核心优势,但同时也指出了原始石墨烯转换效率较低且易损伤的局限。针对该局限, Gomes 等人^[41, 42]通过光辅助氢化反应对化学气相沉积生长的多层石墨烯改性,在保持对亚 10 fs 脉冲响应能力的同时,将 THG 信号强度提升了约 2.5 倍,并显著提升了材料的损伤阈值。

除了二维材料,传统的固体薄膜和块体材料因其制备工艺成熟,也是 THG D-scan 的主要选择。Hoffmann 等人^[39]系统研究了 TiO_2 、 ZnS 等三元复合介质薄膜,实现了近共振增强的 THG D-scan,成功表征了 5.6 fs 的脉冲,并证明通过算法修正可消除材料吸收边的影响。而在更长波长的短波红外领域,Wyatt 等人^[43]发现使用普通的薄 BK7 玻璃片即可实现对 1.7 μm 、约 10 fs 脉冲的完整表征,该工作强调了在体材料中必须使用极薄介质(如 $<0.4\text{ mm}$)以最小化相位失配和自相位调制(Self-Phase Modulation, SPM)对测量结果的影响。为了彻底克服体材料的相位匹配带宽限制并规避二维材料的损伤问题,Gomes 等人^[44]提出了一种基于普通蓝宝石窗口表面三次谐波的 D-scan 方案。利用空气-电介质界面的超宽带响应以及改进的叠层成像反演算法,在无需高信噪比的前提下成功实现了对 800 nm、7 fs 脉冲的重建。

除了作为实验室通用表征工具, THG D-scan 因其可在气体介质中工作的特性, 在强场物理的原位 (in-situ) 表征中展现出独特优势。Crespo 等人^[45-46] 提出并完善了“THIS:D-scan”技术, 直接利用高次谐波产生 (High Harmonic Generation, HHG) 实验中的气体靶作为非线性介质, 在全功率 (10^{14} W/cm² 量级) 条件下实现了对亚 4 fs 脉冲的精准表征。该方法不仅与独立的 SEA-F-SPIDER 测量结果高度一致, 更重要的是它消除了传统异位测量中窗口片色散等带来的误差, 能够实时监测强场相互作用区域的脉冲时空特性。

然而, THG D-scan 也面临挑战: 其信号通常位于紫外甚至深紫外波段, 对光学元件透过率要求极高, 且易受大气吸收与色散影响, 在一定程度上限制了其在常规实验环境中的应用, 这促使研究者进一步探索无需频率转换的替代方案。

4.2 XPW D-scan

为了在保留三阶非线性过程优势(如无中心对称限制与超宽带响应)的同时,规避频率上转换

带来的探测难题, 研究人员提出了基于简并四波混频的 XPW D-scan 技术^[47]。XPW 过程产生的非线性信号与基频光波长相同但偏振垂直, 这种“简并”与“偏振正交”特性使其天然规避了相位匹配带宽限制和深紫外探测困难等问题, 并具备极高的时域对比度提升能力, 特别适用于对脉冲信噪比有极高要求的超短脉冲表征。

Tajalli 等人^[48]率先提出了基于 BaF₂ 晶体的 XPW D-scan 方案, 成功表征了近红外波段经空芯光纤压缩后 5~10 fs 的脉冲, 实验装置如图 9 所示。通过与标准的 SHG FROG 及 SHG D-scan 进行对比, 验证了该技术在单光束结构下的无相位匹配限制与高测量保真度。随后, 他们在高能量系统中对比了 XPW 与 SHG D-scan 对亚 4 fs (约 1.5 个光学周期) 脉冲的测量结果, 两者高度一致的时域波形证明了 XPW D-scan 在极端超短脉冲测量中的鲁棒性^[49]。

得益于无频率转换特性, XPW D-scan 在深紫外 (Deep Ultraviolet, DUV) 波段展现出不可替代

的应用价值。Tajalli 等人^[50]首次将 D-scan 技术拓展至 DUV 波段, 成功表征了中心波长为 267 nm、脉宽仅 8 fs 的超短脉冲, 具体的实验装置如图 10 所示。

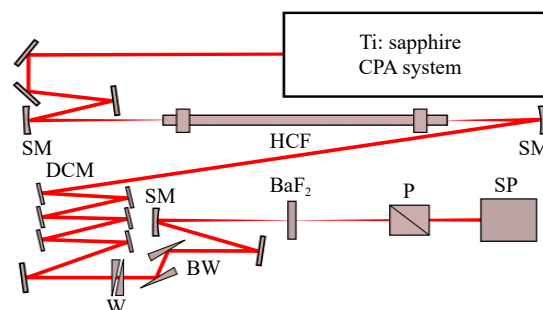


图 9 XPW D-scan 实验装置; SM: 球面镜; HCF: 空芯光纤; W: 楔形镜; BW: 布儒斯特角楔形镜; DCM: 双啁啾镜; P: 宽带 Glan-Taylor 偏振器; SP: 光谱仪^[44]

Fig. 9 Experimental setup of XPW d-scan. SM, spherical mirror; HCF, hollow-core fiber; W, wedge; BW, Brewster-angled wedge; DCM, double-chirped mirror; P, broadband Glan-Taylor polarizer; and SP, spectrometer^[44]

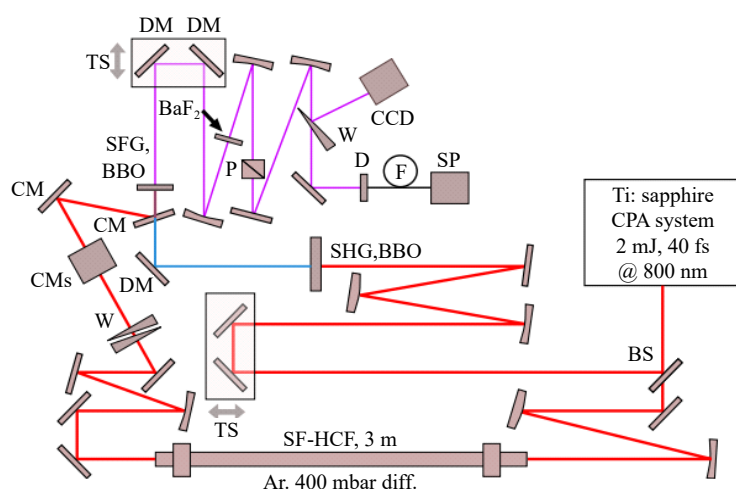


图 10 基于 800 nm 脉冲与其对应 SHG 的和频产生亚 10 fs 紫外脉冲的实验装置示意图, 以及 XPW D-scan 脉冲表征装置; BS: 分束器; TS: 平移台; SP: 光谱仪; DM: 二向色镜; CM: 啁啾镜; W: 熔融石英楔; P: 宽带 Glan-Taylor 偏振器; CCD: 电荷耦合器件; SF-HCF: 拉伸柔性空心光纤; F: 光纤; D: 熔融石英扩散器^[46]

Fig. 10 Schematic of the experimental setup for generation of sub-10 fs UV pulses via sum frequency mixing of 800 nm pulses and their corresponding second harmonic and the XPW d-scan pulse characterization device. BS, beam splitter; TS, translation stage; SP, spectrometer; DM, dichroic mirror; CM, chirped mirror; W, fused silica wedges; P, broadband Glan-laser polarizer; CCD, charge-coupled detector; SF-HCF, stretched flexible hollow-core fiber; F, fiber; and D, fused silica diffuser^[46]

由于深紫外波段缺乏宽带倍频晶体且探测器响应受限, XPW D-scan 成为了表征深紫外亚 10 fs 脉冲最有效的手段之一, 并通过测量已知厚度熔融石英片的色散效应验证了其准确性。此

外, 针对 XPW 过程可能伴随的传播效应 (如色散展宽和 SPM), Tajalli 等人^[51]通过深入的实验与理论研究表明, XPW D-scan 对晶体厚度并不敏感: 在测量 780 nm、亚 4 fs 脉冲时, 使用厚度差异

巨大的 $50\text{ }\mu\text{m}$ 和 $200\text{ }\mu\text{m}$ BaF_2 晶体所获得的反演脉冲形状几乎一致。这一发现不仅排除了 SPM 对测量结果的显著干扰, 还意味着可以使用较厚的晶体来提升非线性信号强度而不牺牲测量精度, 进一步巩固了 XPW D-scan 作为高信噪比、高可靠性超短脉冲测量技术的地位。

4.3 SD D-scan

与 XPW D-scan 依赖偏振选择不同, SD D-scan 技术通过空间衍射机制实现信号分离, 同样属于三阶非线性过程, 但在实验几何结构与应用场景上具有明显区别。具体地, SD 效应通过两束非共线光束在介质中干涉形成瞬态光栅, 进而衍射出信号光, 其产生波长与基频光相同。这种简

并特性不仅消除了深紫外波段倍频晶体的相位匹配限制, 还允许使用极薄的非晶介质(如熔融石英薄片), 从而最大限度地减少了引入的材料色散对极短脉冲的影响。

Canhota 等人^[52]首次提出了 SD D-scan 技术, 利用一块仅 $30\text{ }\mu\text{m}$ 厚的熔融石英薄片作为非线性介质, 成功实现了对亚 4 fs(跨越 480~1 050 nm 的超倍频程)脉冲的表征, 实验装置如图 11(a)所示。通过与 SHG D-scan 的对比, 证明了 SD D-scan 在测量单周期脉冲时具有极高的准确性(如图 11(c)所示), 且由于不需要倍频, 能够覆盖 SHG 无法企及的光谱范围, 特别适用于紫外及深紫外波段。

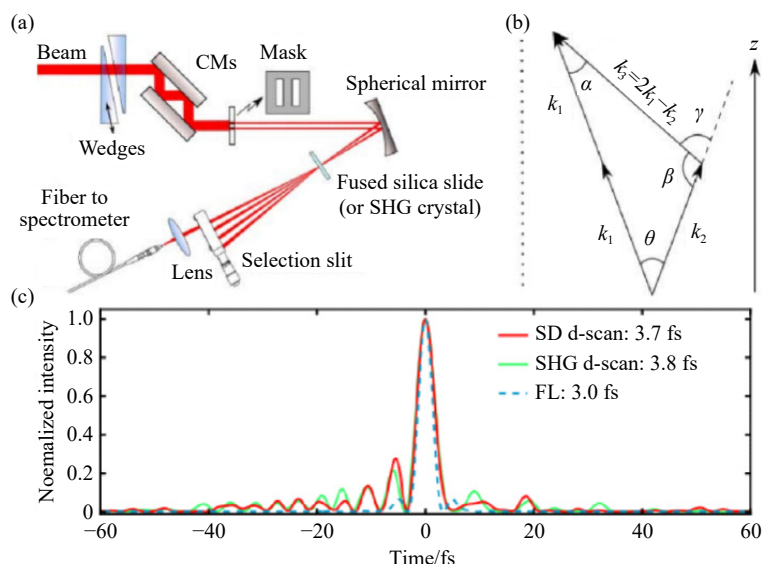


图 11 (a) SD D-scan 实验装置; (b) 非共线 SD 的波矢图; (c) SD D-scan 和 SHG D-scan 恢复的脉宽^[48]

Fig. 11 (a) Experimental setup for SD d-scan (see text for details). (b) Wavevector diagram of noncollinear SD. (c) Retrieved temporal intensities for SD and SHG d-scan^[48]

SD D-scan 独特的非共线几何结构还为多脉冲同时测量提供了可能。Canhota 等人^[53]提出了 Dual SD D-scan 技术, 用于在同一非线性相互作用区域内同时表征两个不同的超短脉冲。该方法针对空间非均匀紫外光束(中心波长 400 nm), 通过空间掩模选取光束中任意两个区域, 使其在一块 $30\text{ }\mu\text{m}$ 厚的熔融石英片中发生非简并自衍射(装置如图 12 所示)。在无需假设两脉冲相同的前提下, 仅测量其中一个 SD 信号的 D-scan 迹图, 便可同时反演出两束脉冲的完整信息(分别为 8.5 fs 和 12.5 fs), 实验结果如图 13 所示。该工作首次证明了 D-scan 技术可扩展至非简并四波混

频场景, 为泵浦-探测实验中双脉冲的原位、同步、无参考表征提供了一种结构简单且广泛适用的解决方案。此外, Geib 等人^[26]提出的通用算法 COPRA 不仅适用于 SHG、THG 等常规 D-scan, 也被证明能有效处理复杂的 SD D-scan 迹图, 为其广泛应用提供了算法支持。

最近, Codere 等人^[54]将 SD D-scan 技术推向了 DUV 波段的极限应用。他们结合空芯光纤展宽与声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM)脉冲整形, 在 256 nm 中心波长下产生了 $\sim 20\text{ fs}$ 的 DUV 脉冲, 并利用 SD D-scan 和 SD-FROG 两种方法进行了交叉验证。该工作不仅展示了 SD

D-scan 在深紫外波段的独特优势, 还通过 AOM 实现了对脉冲色散的精细控制, 为深紫外波段的

超快光谱学实验提供了完整的脉冲产生与表征方案。

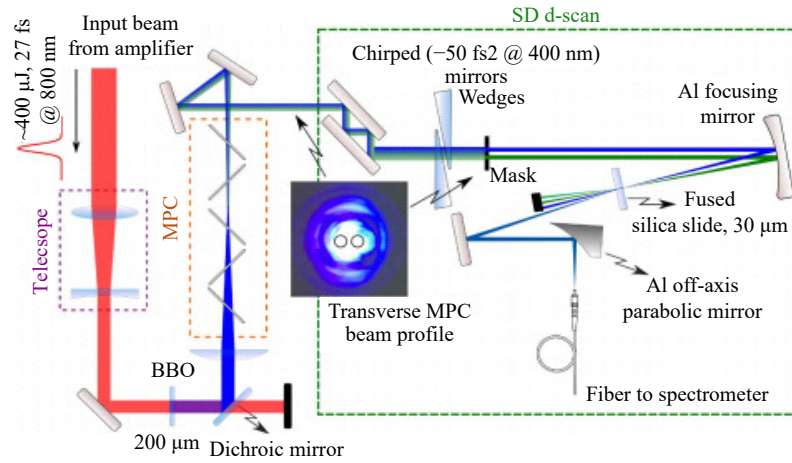


图 12 紫外脉冲压缩与 Dual SD D-scan 实验装置^[49]

Fig. 12 Experimental setup for UV MPC pulse compression and dual SD d-scan (see text for more details)^[49]

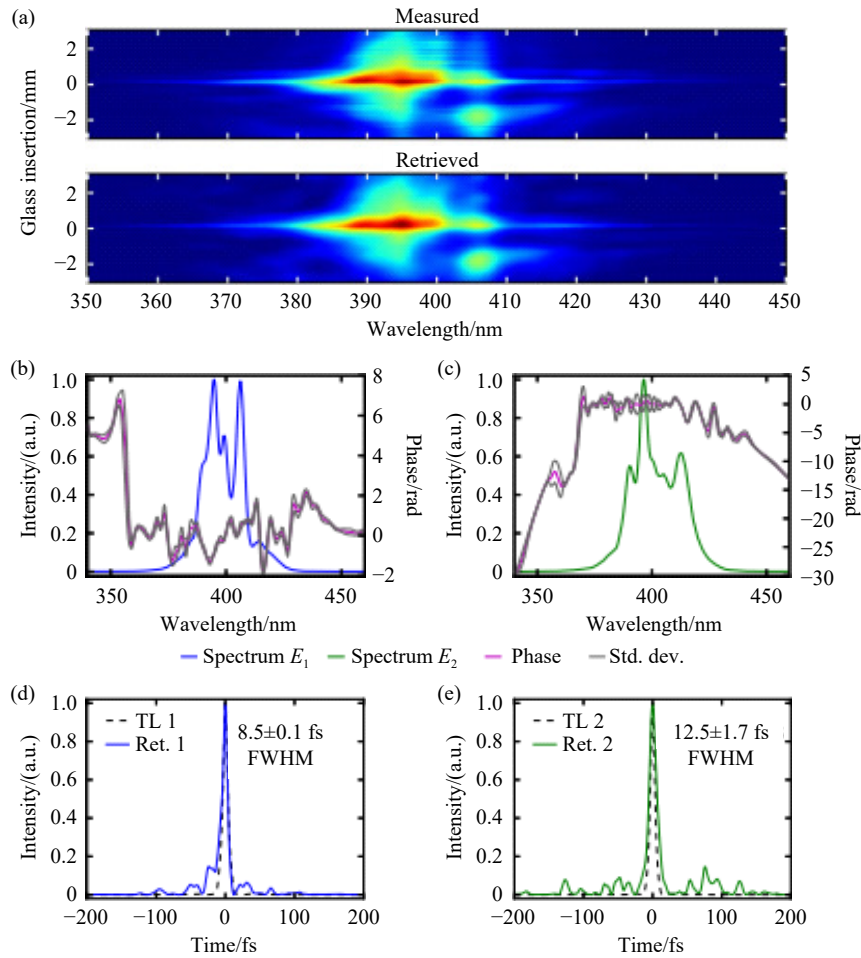


图 13 信号 ENL1 的 Dual SD D-scan 结果分析: (a) 测量与恢复的 D-scan 轨迹; (b)、(c) 脉冲 E1 和 E2 的测量光谱及恢复的光谱相位(标准偏差取自 20 次独立恢复); (d)、(e) 恢复的脉冲 E1 和 E2 脉宽曲线及对应的 TL 曲线^[49]

Fig. 13 Dual SD d-scan analysis of signal ENL1. (a) Measured and retrieved d-scan traces. (b), (c) Measured spectra of pulses E1 and E2 and retrieved spectral phases (standard deviations obtained from 20 independent retrievals). (d), (e) Retrieved temporal intensity profiles of pulses E1 and E2 and corresponding transform-limited (TL) pulses^[49]

值得注意的是, 在利用三阶非线性效应进行脉冲表征时, 除了上述的过程外, 基频光本身也会产生 SPM 效应。SPM 会导致基频光谱随色散量的变化而发生展宽或畸变, 理论上这一特征也可用于构建 D-scan 迹图以反演脉冲^[55-56]。然而, 与 XPW 或 SD 等“无背景”技术不同, SPM D-scan 需要在强基频光谱背景下探测微细的形状变化, 对测量信噪比要求极高。Tajalli 等人^[51]在研究 XPW D-scan 的传播效应时, 曾专门对 SPM D-scan 进行了实验评估。他们通过旋转偏振片抑制 XPW 信号, 仅记录基频光谱随玻璃插入量的变化。实验结果显示, 在同样的实验条件下, 基频光谱并未表现出明显的 SPM 效应, 且输入输出光谱几乎一致。这一方面证明了在典型的 XPW D-scan 测量参数下, SPM 效应不仅微弱且不会干扰相位反演的准确性; 另一方面也暗示了作为一种独立的测量手段, SPM D-scan 的灵敏度远低于 XPW 和 SD 技术, 因此在实际应用中并不常见。

综上所述, 基于三阶非线性效应的 D-scan 技术体系, 通过 THG、XPW 与 SD 三种不同的物理机制, 从频谱分离方式、信号探测手段及实验几何结构等多个维度, 成功突破了传统 SHG D-scan 的适用边界。THG D-scan 以其独特的频谱分离能力在宽带及强场原位诊断中展现优势; XPW D-scan 凭借高信噪比与无频率转换特性成为单周期及深紫外脉冲表征的有力工具; 而 SD D-scan 则依靠极薄介质与灵活的非共线结构, 在超宽光谱与多脉冲同步测量方面提供了高效解决方案。上述技术的引入与发展, 为 D-scan 在极端参数条件下的应用奠定了坚实基础。

5 总结与展望

D-scan 技术凭借独特的“测量即压缩”的理念与高度简化的实验架构, 已发展为覆盖多种非线性过程与测量范式的超短脉冲表征平台。相比 FROG 或 SPIDER 等传统方法, D-scan 在保持光路简洁与高鲁棒性的同时, 持续拓展其测量边界。尤其是近年来, 随着单发测量方案与三阶非线性过程的引入, D-scan 已实现从单周期极限脉冲的高精度表征, 向复杂矢量光场与多脉冲结构全场诊断的发展, 显著拓展了其在极端超快光学

中的应用维度。然而不可否认的是, 现有 D-scan 技术在实验实现与适用范围方面仍存在一些困难与挑战。

首先, 从系统架构角度看, 目前绝大多数 D-scan 实现方案均依赖于激光器外部引入独立的色散扫描单元, 如机械移动的玻璃楔、棱镜对或光栅压缩器。这种“外挂式”设计在一定程度上增加了系统体积与插入损耗, 也限制了长期稳定性与工程集成度, 难以满足工业级或复杂实验平台对紧凑化与高可靠性的要求。摆脱外部机械扫描、充分利用激光器内部已有色散调控模块(如展宽器或压缩器)实现原位色散扫描, 将成为 D-scan 实验系统向高度集成化发展的重要方向。其次, 从波长适用范围来看, D-scan 技术在可见光与深紫外波段的发展已日趋成熟, 但在中红外乃至远红外/太赫兹波段的应用仍明显不足。这一局限既源于长波段非线性介质转换效率低、相位匹配带宽受限等物理因素, 也与高性能红外阵列探测器价格高昂、获取困难等问题密切相关。随着中红外飞秒光源在强场物理和分子动力学研究中的重要性不断提升, 在兼顾宽带相位匹配、非线性材料性能与探测可行性的前提下, 发展适用于长波段的高效三阶非线性方案及低成本探测技术, 将是拓展 D-scan 波长版图的关键突破口。最后, 需要指出的是, D-scan 在少周期超短脉冲表征中展现出超高的灵敏度, 对长脉宽(>200 fs)的测量表征反而成为制约其适用性的瓶颈。根据色散扫描的基本原理, 所需的色散扫描范围随脉冲宽度呈二次方增长, 对于百飞秒量级脉冲, 往往需要引入极大的光程差或超大尺寸的棱镜与光栅系统, 这给实验的可行性带来了显著挑战。尽管近期基于高色散光栅的单发 D-scan 方案将测量上限拓展至 170 fs^[36], 但相比于 FROG 等技术, D-scan 在长脉宽通用性上仍存在显著差距。探索具有超高色散密度的新型紧凑光学元件, 或直接利用激光器内部具备大色散量的展宽器与压缩器作为扫描单元, 将是突破长脉宽测量瓶颈的必由之路。

随着新型非线性介质的不断涌现、色散扫描手段的持续发展以及智能反演算法的深入融合, D-scan 技术有望在测量精度、测量范围、适用波段等方面实现新的跨越。作为一种结构简单、鲁棒性强且高度通用的光场诊断方法, D-scan 将持

续在超快光学、强场物理及阿秒科学等前沿领域发挥重要作用,为揭示光与物质相互作用中的极端瞬态过程、推动超快科学研究边界的拓展提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] HOUARD A, WALCH P, PRODUIT T, *et al.*. Laser guides lightning[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(3): 231-235.
- [2] YOGO A, ARIKAWA Y, ABE Y, *et al.*. Advances in laser-driven neutron sources and applications[J]. *The European Physical Journal A*, 2023, 59(8): 191.
- [3] SCHOENLEIN R, ELSAESSER T, HOLLDACK K, *et al.*. Recent advances in ultrafast X-ray sources[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2019, 377(2145): 20180384.
- [4] ZHANG Y F, XU SH, CUI E N, *et al.*. Research and application progress of laser-processing technology in diamond micro-fabrication[J]. *Micromachines*, 2024, 15(4): 547.
- [5] LI J, REN X M, YIN Y CN, *et al.*. 53-attosecond X-ray pulses reach the carbon K-edge[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 186.
- [6] 王钰, 张一鸣, 谢群, 等. 飞秒激光赋能液晶光子学[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(12): 1612-1635.
WANG Y, ZHANG Y M, XIE Q, *et al.*. Femtosecond laser-empowered liquid crystal photonics[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(12): 1612-1635. (in Chinese).
- [7] YIN J B, LUO H, CAO T, *et al.*. Polarization-independent surface nanostructuring by femtosecond laser irradiation via microsphere in far field and ambient air[J]. *Light: Science & Applications*, 2026, 15(1): 114.
- [8] DU SH J, ZHANG F T, MA L. Advances in femtosecond laser synthesis and micromachining of halide perovskites[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2024, 5(3): 452-474.
- [9] WANG SH J, QIN W T, GUAN T Y, *et al.*. Flexible generation of structured terahertz fields via programmable exchange-biased spintronic emitters[J]. *eLight*, 2024, 4(1): 11.
- [10] BRADLEY D J, NEW G H C. Ultrashort pulse measurements[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(3): 313-345.
- [11] GU X, AKTURK S, SHREENATH A, *et al.*. The measurement of ultrashort light pulses - simple devices, complex pulses[J]. *Optical Review*, 2004, 11(3): 141-152.
- [12] KANE D J, TREBINO R. Characterization of arbitrary femtosecond pulses using frequency-resolved optical gating[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(2): 571-579.
- [13] TREBINO R, DELONG K W, FITTINGHOFF D N, *et al.*. Measuring ultrashort laser pulses in the time-frequency domain using frequency-resolved optical gating[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(9): 3277-3295.
- [14] FINCHEIRA F M C. *Frequency resolved optical gating setup for characterizing amplitude and phase of ultrafast optical pulses*[D]. Quebec: University of Quebec, 2013.
- [15] SHUMAN T M, ANDERSON M E, BROMAGE J, *et al.*. Real-time SPIDER: ultrashort pulse characterization at 20 Hz[J]. *Optics Express*, 1999, 5(6): 134-143.
- [16] KOSIK E M, ANDERSON M E, DE ARAUJO L E E, *et al.*. Precision and accuracy of ultrashort optical pulse measurement using SPIDER[C]. *Proceedings of the 12th International Conference on Ultrafast Phenomena XII*, Springer, 2000: 120-122.
- [17] LONDERO P, ANDERSON M E, RADZEWICZ C, *et al.*. Measuring ultrafast pulses in the near-ultraviolet using spectral phase interferometry for direct electric field reconstruction[J]. *Journal of Modern Optics*, 2003, 50(2): 179-184.
- [18] WILLIAMS E M K, DORRER C, RADUNSKY A S, *et al.*. Characterizing space-time coupling of the electric field of ultrashort pulses using the SPIDER technique[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5714: 173-185.
- [19] LOZOVY V V, PASTIRK I, DANTUS M. Multiphoton intrapulse interference. IV. Ultrashort laser pulse spectral phase characterization and compensation[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(7): 775-777.
- [20] XU B W, GUNN J M, DELA CRUZ J M, *et al.*. Quantitative investigation of the multiphoton intrapulse interference phase scan method for simultaneous phase measurement and compensation of femtosecond laser pulses[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2006, 23(4): 750-759.
- [21] MIRANDA M, FORDELL T, ARNOLD C, *et al.*. Simultaneous compression and characterization of ultrashort laser pulses using chirped mirrors and glass wedges[J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 688-697.

- [22] ESCOTO E, TAJALLI A, NAGY T, *et al.*. Advanced phase retrieval for dispersion scan: a comparative study[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(1): 8-19.
- [23] STORN R, PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. *Journal of Global Optimization*, 1997, 11(4): 341-359.
- [24] LEVENBERG K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1944, 2(2): 164-168.
- [25] MARQUARDT D W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1963, 11(2): 431-441.
- [26] GEIB N C, ZILK M, PERTSCH T, *et al.*. Common pulse retrieval algorithm: a fast and universal method to retrieve ultrashort pulses[J]. *Optica*, 2019, 6(4): 495-505.
- [27] ZAHAVY T, DIKOPOLTSEV A, MOSS D, *et al.*. Deep learning reconstruction of ultrashort pulses[J]. *Optica*, 2018, 5(5): 666-673.
- [28] KLEINERT S, TAJALLI A, NAGY T, *et al.*. Rapid phase retrieval of ultrashort pulses from dispersion scan traces using deep neural networks[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(4): 979-982.
- [29] ZIV R, DIKOPOLTSEV A, ZAHAVY T, *et al.*. Deep learning reconstruction of ultrashort pulses from 2D spatial intensity patterns recorded by an all-in-line system in a single-shot[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7528-7538.
- [30] SYTCEVICH I, GUO CH, MIKAELSSON S, *et al.*. Characterizing ultrashort laser pulses with second harmonic dispersion scans[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(5): 1546-1555.
- [31] MIRANDA M, ARNOLD C L, FORDELL T, *et al.*. Characterization of broadband few-cycle laser pulses with the d-scan technique[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 18732-18743.
- [32] FABRIS D, HOLGADO W, SILVA F, *et al.*. Single-shot implementation of dispersion-scan for the characterization of ultrashort laser pulses[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32803-32808.
- [33] SALGADO-REMACHA F J, ALONSO B, CRESPO H, *et al.*. Single-shot d-scan technique for ultrashort laser pulse characterization using transverse second-harmonic generation in random nonlinear crystals[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(14): 3925-3928.
- [34] CAPDEVILLE F, VILLANUEVA F, HIDALGO-ROJAS D, *et al.*. Multiple-reflections single-shot dispersion scan for fast ultrashort-pulse measurements[J]. *Optics Express*, 2024, 32(16): 28742-28752.
- [35] DÍAZ RIVAS D, SYTCEVICH I, CANHOTA M, *et al.*. Single-shot dispersion-scan using a combination of prism and grating[J]. *Applied Optics*, 2025, 64(31): 9476-9480.
- [36] DÍAZ RIVAS D, BARBERO C, GUO CH, *et al.*. Spatially dependent group delay dispersion from a diffraction grating and its application to the single-shot d-scan technique[J]. *Optica*, 2025, 12(12): 1923-1930.
- [37] DÍAZ RIVAS D, RAAB A K, GUO CH, *et al.*. Measurement of ultrashort laser pulses with a time-dependent polarization state using the d-scan technique[J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2024, 6(1): 015003.
- [38] PÉREZ-BENITO Ó, WEIGAND R. Characterization of the polarization state of few-cycle laser pulses using d-scan: D-TURTLE[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 179: 111273.
- [39] HOFFMANN M, NAGY T, WILLEMSSEN T, *et al.*. Pulse characterization by THG d-scan in absorbing nonlinear media[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5234-5240.
- [40] SILVA F, MIRANDA M, TEICHMANN S, *et al.*. Near to mid-IR ultra-broadband third harmonic generation in multilayer graphene: few-cycle pulse measurement using THG dispersion-scan[C]. *Proceedings of CLEO: 2013*, IEEE, 2013: 1-2.
- [41] GOMES T. Temporal measurement of few-cycle laser pulses by third-harmonic[C]. *Proceedings of the GRAPHENE and 2DM INDUSTRIAL FORUM*, GIF, 2020.
- [42] GOMES T, CANHOTA M, KULYK B, *et al.*. Ultrafast laser pulse characterization by THG d-scan using optically enhanced graphene coatings[J]. *arXiv preprint arXiv*, 2022, 2206.01676. (查阅网上资料, 不确定本条文献类型与格式, 请确认).
- [43] WYATT A S, JOHNSON A S, MATÍIA-HERNANDO, *et al.*. Complete characterization of shortwavelength infrared fewcycle pulses via third harmonic generation dispersion scan[C]. *Proceedings of the Super Intense Laser-Atom Physics XI*, 2015: 27980. (查阅所有网上资料, 未找到本条文献出版社信息, 请确认).
- [44] GOMES T, CANHOTA M, CRESPO H. Temporal characterization of broadband femtosecond laser pulses by surface

- third-harmonic dispersion scan with ptychographic retrieval[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(15): 3660-3663.
- [45] CRESPO H M, WITTING T, CANHOTA M, *et al.*. In situ temporal measurement of ultrashort laser pulses at full power during high-intensity laser-matter interactions[J]. *Optica*, 2020, 7(8): 995-1002.
- [46] CRESPO H, CANHOTA M, WITTING T, *et al.*. Direct measurement of intense sub-4-fs pulses in a gas target by 3rd-harmonic dispersion-scan[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2019, 205: 01026.
- [47] TAJALLI A, CHANTEAU B, KRETSCHMAR M, *et al.*. Full characterization of few-cycle pulses using cross-polarized wave generation d-scan technique[C]. *Proceedings of the CLEO: QELS_Fundamental Science 2016*, Optica Publishing Group, 2016.
- [48] TAJALLI A, CHANTEAU B, KRETSCHMAR M, *et al.*. Few-cycle optical pulse characterization via cross-polarized wave generation dispersion scan technique[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5246-5249.
- [49] TAJALLI A, OUIILLÉ M, VERNIER A, *et al.*. XPW and SHG d-scan characterization of sub-1.5-cycle pulses[C]. *Proceedings of the High Intensity Lasers and High Field Phenomena 2018*, Optica Publishing Group, 2018: 978.
- [50] TAJALLI A, KALOUSDIAN T K, KRETSCHMAR M, *et al.*. Full characterization of 8 fs deep UV pulses via a dispersion scan[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2498-2501.
- [51] TAJALLI A, OUIILLÉ M, VERNIER A, *et al.*. Propagation effects in the characterization of 1.5-cycle pulses by XPW dispersion scan[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(4): 5120407.
- [52] CANHOTA M, SILVA F, WEIGAND R, *et al.*. Inline self-diffraction dispersion-scan of over octave-spanning pulses in the single-cycle regime[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(15): 3048-3051.
- [53] CANHOTA M, WEIGAND R, CRESPO H M. Simultaneous measurement of two ultrashort near-ultraviolet pulses produced by a multiplate continuum using dual self-diffraction dispersion-scan[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(4): 1015-1018.
- [54] CODERE J, PEARSON B J, KAUFMAN B, *et al.*. Spectral broadening and pulse shaping in the deep ultraviolet[J]. *Optics Letters*, 2026, 51(2): 269-272.
- [55] SHARBA A B, CHEKHLOV O, WYATT A S, *et al.*. Characterization of ultrashort laser pulses employing self-phase modulation dispersion-scan technique[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(3): 035502.
- [56] SHARBA A B, SARRI G. Single shot complete characterization of femtosecond laser pulses employing self-phase modulation[J]. *Laser Physics*, 2019, 29(8): 085001.

作者简介:



赵变丽(1997—),女,宁夏固原人,2020年于宁夏师范大学获得学士学位,2023年于云南大学物理与天文学院获得硕士学位,现云南大学博士研究生在读,主要从事超短脉冲表征及飞秒激光放大器方面的研究。E-mail: zhaobianli@itc.ynu.edu.cn



张晓世(1975—),男,云南昆明人,博士,教授,云南大学东陆特聘教授。1998年于中国科学技术大学获得学士学位,2001年于中国科学技术大学获得硕士学位,2007年于美国科罗拉多大学博尔德分校,美国国家标准局, JILA 研究院获得博士学位。长期从事飞秒激光,极紫外激光,极端非线性光学以及相干衍射和量子成像等领域的研究及其工程化和商业化应用。E-mail: zhangxiaoshi@itc.ynu.edu.cn