

# 基于全变分正则约束的二维冲击波速度场条纹重构技术

黎森, 余柏汕, 王玺\*, 张磊, 王晨燕, 梁佳欣

重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065

**摘要** 在惯性约束聚变过程中, 冲击波速度与靶丸内爆压缩对称性密切相关, 任意反射面速度干涉仪(VISAR)与压缩超快成像(CUP)系统的结合(CUP-VISAR)为冲击波速度二维时变诊断开辟了新思路。针对系统重建耗时长的问題, 提出并实现了一种针对 CUP-VISAR 系统的全变分正则化快速重建算法。对弯曲条纹的仿真重建分析结果表明, 本文提出的 TVAL3H 算法对比传统 TVAL3 算法, 峰值信噪比(PSNR)提升了 6.86 dB (25 frame)~1.20 dB (150 frame), 结构相似性(SSIM)提升了 26.67% (25 frame)~14.10% (150 frame), 时间消耗降低了 92.15% (25 frame)~78.30% (150 frame)。对比广义交替投影(GAP)和交替方向乘子(ADMM)算法, 时间消耗降低了 57.79% (100 frame, GAP)~77.20% (25 frame, ADMM)的同时 PSNR 和 SSIM 差异较小。在同一重构时间量级下, 所建立重构算法不同 frame 条件的 PSNR 相比 GAP 与 ADMM 算法分别提高了 1.92 dB (25 frame)~0.84 dB (150 frame) 及 1.85 dB (25 frame)~0.80 dB (150 frame); SSIM 相比 GAP 与 ADMM 算法分别提高了 9.23% (25 frame)~4.48% (150 frame) 及 8.85% (25 frame)~4.46% (150 frame)。

**关键词** 衍射与光栅; 压缩超快成像; 全变分正则项约束; 冲击波诊断; 三维重建; 哈达玛乘积

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230777

## 1 引言

近年来, 核能的开发与利用成为当前世界大国科技竞争前沿的重要领域, 惯性约束聚变(ICF)作为可控核聚变在极短的时间内向含有聚变燃料的靶丸注入大量能量, 靶丸内的燃料在极高的温度、压力和密度作用下发生压缩内爆而引起热核聚变反应。目前, ICF 也取得了一些研究进展<sup>[1-2]</sup>, 在整个聚变过程中, 由于各种因素的影响导致压缩内爆不均匀对称而使聚变失败, 也限制了 ICF 的发展研究<sup>[3]</sup>。测量冲击波的速度分布可以预估靶丸达到的压缩状态, 为 ICF 压缩内爆过程进一步优化提供可靠的参考数据。

ICF 内爆后期持续时间较短(100~200 ps), 因此对内爆后期的演化过程进行诊断需要更加精确有效的高时空分辨诊断技术<sup>[4]</sup>。任意反射面速度干涉仪(VISAR)<sup>[5]</sup>通过记录由多普勒频移形成的干涉条纹从而得到速度信息, 成为 ICF 内爆后期冲击波速度测量重要的诊断仪器。Celliers 等<sup>[6]</sup>使用线成像型 VISAR 测量的方法, 使用条纹相机作为成像记录设备, 测量到冲击波速度场不同时间下的一条线的速度分布。

Celliers 等<sup>[7]</sup>又采用 CCD 相机代替条纹相机, 对某一时间点的冲击波速度进行了二维面成像记录。由中国工程物理研究院激光聚变研究中心研制的成像型 VISAR 应用于神光 III 原型装置, 条纹相机时间分辨率达到 30 ps, 空间分辨率优于 5  $\mu\text{m}$ <sup>[8]</sup>。刘寿先等<sup>[9]</sup>将分幅相机作为线成像型 VISAR 中的记录设备, 能测量纳秒量级时间分辨率的多个时间点的冲击波速度。从目前传统的 VISAR 诊断系统来看, 无法同时满足超高时间分辨率和对二维信息记录这两个条件。压缩超快成像(CUP)<sup>[10]</sup>依赖条纹相机和压缩感知技术使其具有超高的时间和空间分辨率, 记录过程中条纹相机的狭缝需完全打开, 记录的图像会随着条纹相机的扫描产生混叠, 而压缩感知技术能还原混叠图像使得 CUP 系统实现二维空间成像。CUP-VISAR 的提出也为 ICF 的超高时间分辨的二维成像诊断研究提供了新的思路<sup>[11]</sup>。

目前 CUP-VISAR 诊断系统相关压缩数据重构主要基于冲击波二维速度场条纹分布特性, 通过建立基于全变分(TV)正则项的无约束优化问题, 采用两步迭代收缩/阈值(TWIST)算法<sup>[12]</sup>完成该优化问题求解,

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-03-23; 录用日期: 2023-04-23; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金重大仪器项目(12127810)、国家自然科学基金(61604028)、重庆市教委科学技术研究项目(KJZD-K202200607)

通信作者: \*xiwang@cqupt.edu.cn

在迭代求解过程中矩阵运算量大,从而导致重构耗时长;并且 CUP-VISAR 系统的测量数据存在严重噪声分布,主要噪声为 VISAR 测量系统噪声及 CUP 记录系统噪声、重构算法噪声等。其次,数字微透镜阵列(DMD)投影的编码矩阵对应孔径不是常规的  $1 \times 1$  像素比,而是  $7 \times 7$  像素比,较大孔径编码给目前压缩采样重构过程中的噪声抑制带来了挑战。根据上述研究背景及理论,本文提出一种基于全变分正则化的快速重建算法,采用哈达玛乘积的形式将全变分算法进行三维扩展,实现压缩采样数据去噪和快速重构,提升了冲击波二维速度场诊断系统压缩采样数据重构性能。通过仿真重建研究并分析了所建立的全变分正则化快速重建算法的重建复原效果。仿真结果表明,与目前的 CUP-VISAR 重构算法相比,本文所建立的全变分正则化快速重建算法的重建速度快、重建精度高,具有理论意义和实际应用价值。

## 2 CUP-VISAR 成像原理及压缩重建

### 2.1 CUP-VISAR 系统

传统的 VISAR 是探针光源发射一束探针光经过

光路到达探测靶面,在多普勒效应<sup>[13]</sup>作用下探针光反射产生多普勒频移,探针光经过光路返回到达两条带有干涉仪的光学支路,并发生干涉形成干涉条纹。两条支路是为了干涉条纹形成互补,防止信息丢失,靶面的速度变化使条纹的相位对应改变,进一步可以利用光学条纹相机记录靶面的速度历程信息。

CUP 技术利用 DMD 对动态场景进行编码,编码后的图像通过狭缝完全打开的条纹相机进行错位叠加,进而得到一张二维数据,借助稀疏采样重构还原算法将叠加的二维数据进行恢复还原。因此,一维 VISAR 冲击波诊断系统与 CUP 稀疏采样重构系统相结合的 CUP-VISAR 系统能够实现对冲击波速度二维分布的超快诊断。CUP-VISAR 系统总体布局如图 1 所示,首先,探针光源发出的探针光依次经过分束镜 BS1、透镜 L1、透镜 L2 到达靶面反射,探针光携带多普勒频移信息从原路返回,经 BS2 反射进入干涉仪进行混频干涉产生干涉条纹。干涉条纹光通过 BS7 分束镜进入 CUP 系统,在 DMD 进行编码后错位叠加,最后由条纹相机记录叠加后的图像,进而实现冲击波二维空间信息的编码压缩记录。

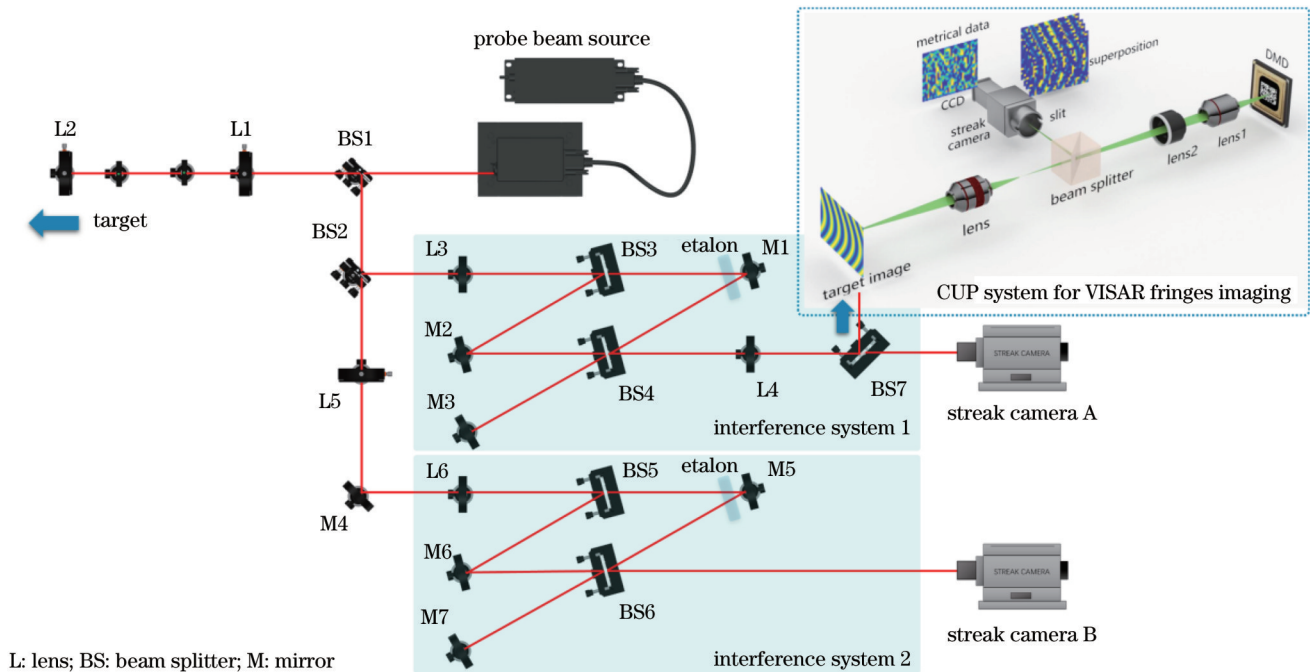


图 1 冲击波速度诊断的 CUP-VISAR 系统总体布局

Fig. 1 General layout of CUP-VISAR system for shock wave velocity diagnosis

### 2.2 CUP-VISAR 压缩采样数据重建原理

利用传统双灵敏度线成像型 VISAR 系统将 CUP 系统作为额外的记录设备,进而形成了具有高时空分辨的冲击波二维速度诊断 CUP-VISAR 系统,该系统主要的数据压缩采样和图像重构性能都在于所建立的 CUP 系统。数据采集过程主要通过条纹相机和 CCD 相机,记录获取的观测值和观测矩阵,图像反演过程则通过重构算法从获取的观测矩阵和观测值中反演出原

信号。与传统的信号获取方式不同,压缩感知理论能够同时对信号进行采样和压缩编码。目前重构算法可分为贪婪算法、凸松弛优化算法和阈值迭代算法三大类<sup>[14]</sup>。压缩感知采样重构过程是在已知的正演模型先验知识下,对以下线性方程组进行逆问题求解:

$$E = AI, \quad (1)$$

式中:  $A$  代表编码矩阵;  $I$  代表原数据;  $E$  代表测量数据。但式(1)的逆问题求解属于欠定问题求解,而对于

这种欠定问题求解,通常做法是增加待求状态量的先验约束,将该欠定问题求解转化为约束优化问题来求解,即式(1)逆问题求解可以转化为以下形式求解:

$$\begin{cases} \min \Phi(I) \\ \text{s.t. } E = AI \end{cases}, \quad (2)$$

式中,  $\Phi(I)$  为  $I$  的约束条件。在稀疏信号处理领域,由于待处理信号通常具有一定的平滑性,这个先验信息在超快诊断领域对于绝大部分真实诊断数据是满足的。基于此,Rudin等<sup>[15]</sup>提出了稀疏图像处理领域的TV约束模型。TV模型将图像稀疏矩阵与其梯度域关联起来,能在消除噪声和伪影的同时恢复图像边缘及细节信息,矩阵信号的变分值越小,图像的平滑度通常就越高。在TV正则项约束下,式(2)可以进一步写为

$$\begin{cases} \min \Phi_{\text{TV}}(I) \\ \text{s.t. } E = AI \end{cases}. \quad (3)$$

进一步,式(3)的约束优化问题可以转化为以下无约束优化问题进行求解:

$$f_{\text{TV}} = \operatorname{argmin} \left\{ \frac{1}{2} \|E - AI\|_2^2 + \tau \Phi_{\text{TV}}(I) \right\}, \quad (4)$$

式中,  $\tau$  为正则化参数,主要用于调节保真项与正则项的占比,控制全变分权重。

CUP-VISAR数据主要噪声影响来自冲击波速度场干涉光学系统噪声及探测器噪声以及编码叠加过程中产生的高斯噪声等,噪声类型具有多样化的特点。如上所述的全变分算法采用TV正则项约束,在消除噪声和伪影的同时平滑图像,并结合增强型拉格朗日函数法和交替最小化方法<sup>[16]</sup>,能保证重建精度的同时进行有效去噪。因此,所建立CUP-VISAR系统的重构求解主要通过增加待求状态量  $I$  的全变分先验约束,将该欠定问题的数学求解模型转化为基于TV约束的优化求解模型。

### 3 改进全变分快速重建算法

目前VISAR领域超快压缩感知诊断数据的重构通常采用两步阈值迭代(TWIST)、基于离散余弦的两步阈值迭代(TWIST-DCT)等算法<sup>[17-18]</sup>。传统全变分正则约束的压缩采样重构算法<sup>[19]</sup>基于全变分模型将稀疏采样矩阵与其梯度域关联起来,在消除噪声和伪影的同时恢复采样数据的边缘及细节信息,并结合增强拉格朗日函数法和交替最小化方法,求出拉格朗日函数模型最小值,再通过最速下降法<sup>[20]</sup>迭代,更新拉格朗日乘子,找到最小值。传统的全变分正则化重构算法作为经典的稀疏采样重构方法,主要针对一维采样数据来重建二维图像分布<sup>[21]</sup>,但本文所采用的CUP-VISAR系统压缩诊断过程是将三维数据采集成二维数据。根据CUP-VISAR系统物理诊断原理,其稀疏采样的待重构数据生成过程如图2所示。CUP-

VISAR系统的采样过程是  $f$  帧  $(m-f+1) \times n$  的编码矩阵与每帧冲击波干涉条纹原始图像进行哈达玛相乘,根据CUP-VISAR系统条纹相机全开口采样特性,所获得的测量矩阵按照从上到下错位排列,依次叠加得到大小为  $m \times n$  的CUP系统的采样数据。由于CUP-VISAR数据采样使用哈达玛乘积的形式,所以带哈达玛乘积方式的全变分正则化算法更有利于采样数据的重构。

如图2所示,传统全变分正则化算法恢复CUP-VISAR系统的三维诊断数据,需要将  $m \times n \times f$  大小的三维线性观测矩阵算子每帧展开为对角矩阵并依次排列形成一个  $(m \times n) \times (m \times n \times f)$  的二维矩阵;而冲击波速度场条纹分布的采样数据需按列排列为二维矩阵,利用全变分正则化算法重构后重新排列为三维数据,此类传统全变分正则化重构算法由于线性观测矩阵算子展开的对角矩阵包含大量零元素,零元素不包含有效信息而且扩大了矩阵运算量,因而对重构运算硬件条件,包括内存和CPU的要求较高,重构时间一般较长,对于40 frame以上诊断数据重建,必须采用分块的方式进行,而分块重构会导致分块边缘数据存在明显的块效应<sup>[22]</sup>,从而明显降低重构质量。

因此,全变分正则化算法不能直接对二维数据进行重建,需要进行进一步扩展优化,实现对CUP-VISAR的二维采集数据重建为三维数据,同时提升算法重构速度。本文结合增强拉格朗日函数法和交替最小化方法建立了改进的全变分正则化重构算法TVAL3H,在重构过程中,直接使用哈达玛乘积的方式,将TVAL3算法扩展为三维重建方式,对冲击波速度场采样数据进行有效重建,保证重构质量的同时显著提高了算法重构速度。

针对CUP-VISAR系统的多维诊断稀疏采样数据特点,基于经典全变分正则化算法提出了一种基于哈达玛积运算的TVAL3H重构模型,其重构模型流程为

$$\min_x \sum_i \|D_i x\|, \text{ s.t. } Ax = y, \quad (5)$$

式中:  $A$  是测量矩阵;  $y$  是测量值;  $\|D_i x\|$  表示对原始信号  $x$  中每个点进行离散梯度计算:

$$\|D_i x\| = \sum_{i,j} \sqrt{(x_{i+1,j} - x_{i,j})^2 + (x_{i,j+1} - x_{i,j})^2}. \quad (6)$$

引入松弛变量  $w_i$ , 式(5)变为

$$\min \sum_i \|w_i\|, \text{ s.t. } Ax = y \text{ and } D_i x = w_i. \quad (7)$$

式(7)对应的增强型拉格朗日函数为

$$L(w_i, x) = \sum_i (\|w_i\| - v_i^T (D_i x - w_i) + \frac{\beta_i}{2} \|D_i x - w_i\|_2^2) - \lambda^T (Ax - y) + \frac{\mu}{2} \|Ax - y\|_2^2, \quad (8)$$

式中:  $\lambda$  和  $v$  为拉格朗日乘子;  $\mu$  和  $\beta$  为惩罚因子。式(8)是凸优化问题,由于具有非线性和不可微的特性,不易求解,可以采用交替方向变换法将式(8)转化为以下两个子问题,对  $x$  和  $w_i$  进行最小化迭代求解:

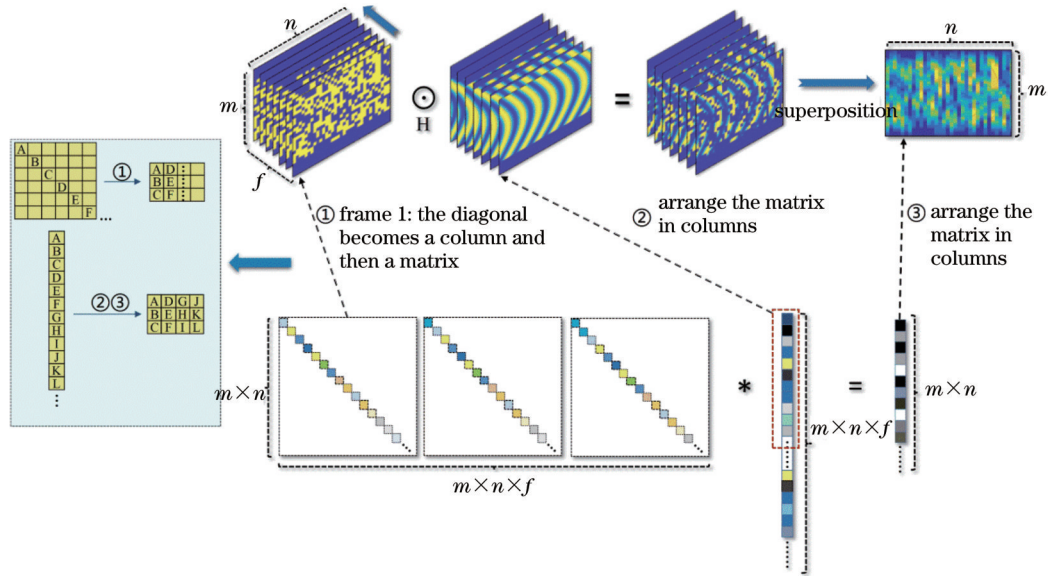


图 2 CUP-VISAR 系统三维诊断数据流程图

Fig. 2 3D diagnostic data flow chart of CUP-VISAR system

$$L(w_i, x) = \sum_i \left[ \|w_i\| - v_i^T (D_i x - w_i) + \frac{\beta_i}{2} \|D_i x - w_i\|_2^2 \right], \quad (9)$$

$$L(w_i, x) = \sum_i \left[ -v_i^T (D_i x - w_i) + \frac{\beta_i}{2} \|D_i x - w_i\|_2^2 \right] - \lambda^T (Ax - y) + \frac{\mu}{2} \|Ax - y\|_2^2. \quad (10)$$

对式(9)、式(10)分别采用迭代阈值收缩法<sup>[23]</sup>、Barzilai-Borwein(BB)梯度法<sup>[24]</sup>求解,加快了算法的收敛速度。对拉格朗日乘子的更新公式为

$$v_i = v_i - \beta_i (D_i x - w_i), \quad (11)$$

$$\lambda_i = \lambda_i - \mu (Ax - y). \quad (12)$$

TVAL3H算法流程如表 1 所示。

表 1 TVAL3H算法流程

Table 1 Flow chart of TVAL3H algorithm

Input: coding matrix  $A$ , measurement matrix  $y$ , maximum iterations maxcnt;

Output: reconstruct data  $x$ ;

Initialization:  $w, x, v, \beta, \lambda, \mu$ ;

- 1) The problem to be solved is divided into two subproblems by method of the augmented Lagrange function;
- 2) Substitute  $x$  into subproblem 1, and solve  $w_i$  using iterative shrinkage;
- 3) Substitute  $w_i$  into subproblem 2, and  $x$  is solved using Barzilai-Borwein gradient method;
- 4) Update Lagrange multiplier  $v, \lambda$ , and update penalty function factor  $\beta, \mu$ ;
- 5) Step 2) and step 3) alternate iteration, and stop iteration when accuracy meets the requirements or iterations reach maximum number.

## 4 仿真分析

基于改进的全变分正则化重构算法,对不同帧数及不同尺寸掩模版条件下的CUP-VISAR系统仿真条纹诊断数据进行了重构。图 3(a)~3(h)分别展示了本文所建立的 TVAL3H 重建算法对 25、50、100、150 frame 条纹相机采集条件下,CUP 系统编码孔径为  $1 \times 1$  及  $7 \times 7$  的冲击波诊断条纹图重建效果,诊断条纹分布采样数据维度为  $350 \times 780$ 。

由图 3 可见,随着重建帧数的增加,冲击波诊断条纹重建质量逐渐降低,一方面原因在于重构帧数增加导

致重构实际采样率下降,另一方面原因在于CUP-VISAR系统的压缩采样是一个叠加过程,帧数的增加不仅使得单元像素重叠数据增加,同时引入的噪声也增加。就算法层面而言,所建立的改进全变分正则化算法是寻求凸优化问题的最优解,帧数的增加意味着要求解的向量长度增加,加大了最优解的寻找难度。同时由图 3 可知,随着编码孔径尺寸的增加, $7 \times 7$  编码孔径条件下重构条纹质量相对  $1 \times 1$  编码孔径条件下的结果明显降低,其原因主要在于编码孔径大于像素尺寸时,同一个孔径范围内,多个像素共享了该孔径的编码,造成像素单元信息混叠,导致恢复数据离真实数据偏差变大。

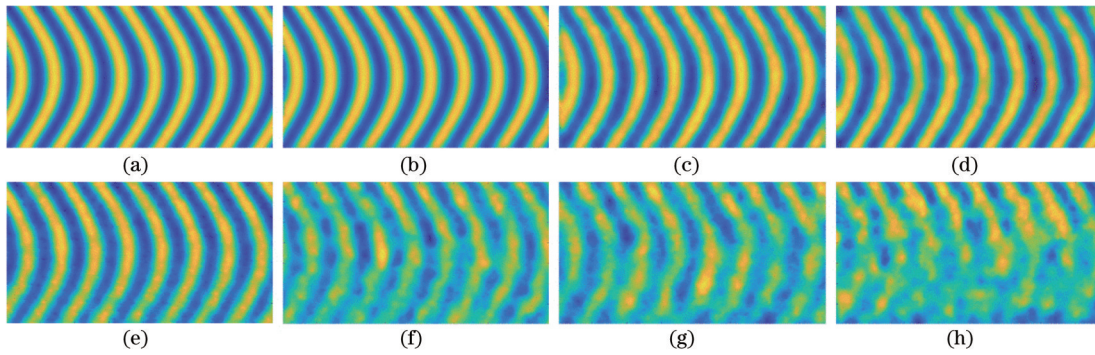


图3 TVAL3H算法重建条纹图。(a) 25 frame重建 $1\times 1$ ; (b) 50 frame重建 $1\times 1$ ; (c) 100 frame重建 $1\times 1$ ; (d) 150 frame重建 $1\times 1$ ; (e) 25 frame重建 $7\times 7$ ; (f) 50 frame重建 $7\times 7$ ; (g) 100 frame重建 $7\times 7$ ; (h) 150 frame重建 $7\times 7$ ;

Fig. 3 Fringe patterns reconstructed by TVAL3H algorithm. (a) 25 frame reconstruction  $1\times 1$ ; (b) 50 frame reconstruction  $1\times 1$ ; (c) 100 frame reconstruction  $1\times 1$ ; (d) 150 frame reconstruction  $1\times 1$ ; (e) 25 frame reconstruction  $7\times 7$ ; (f) 50 frame reconstruction  $7\times 7$ ; (g) 100 frame reconstruction  $7\times 7$ ; (h) 150 frame reconstruction  $7\times 7$

表2展示了采用本文改进全变分正则化算法对25、50、100、150 frame的不同编码孔径数据重建结果的性能分析。 $1\times 1$ 编码孔径条件下,25、50、100、150 frame恢复弯曲条纹的峰值信噪比(PSNR)分别为26.71、24.07、19.36、18.39 dB,结构相似性(SSIM)分别为90.02%、87.38%、79.63%、76.96%,随着帧数增加,重构采样率下降及引入噪声增多的条件下,50、100、150 frame时重构条纹数据相比25 frame时PSNR分别下降了2.64、7.35、8.32 dB,SSIM分别下降了2.64%、10.39%、13.06%。在 $7\times 7$ 编码孔径条件下,25、50、100、150 frame恢复弯曲条纹的PSNR分别为17.14、12.87、11.61、10.81 dB,SSIM分别为74.18%、58.66%、53.09%、49.91%,由于孔径变大的影响,25、50、100、150 frame的 $7\times 7$ 重构条纹数据相比 $1\times 1$ 时PSNR分别下降了9.57、11.20、7.75、7.58 dB,SSIM分别下降了15.84%、28.72%、26.54%、27.05%。由此可见,帧数的增加以及孔径的变大都会使得条纹重建质量降低。

对于50 frame条件下 $1\times 1$ 孔径的 $350\times 780$ 维度诊断数据,本文重构算法所耗时间为396 s,文献[18]中对 $334\times 789$ 的50 frame数据进行恢复,TWIST消

表2 不同帧数条件下的TVAL3H重构算法诊断条纹重建结果

Table 2 Diagnosis of fringe reconstruction results using TVAL3H reconstruction algorithm under different frame number conditions

Aperture	Performance	25	50	100	150
		frame	frame	frame	frame
$1\times 1$	PSNR /dB	26.71	24.07	19.36	18.39
	SSIM /%	90.02	87.38	79.63	76.96
	Time /s	155	396	1321	2613
$7\times 7$	PSNR /dB	17.14	12.87	11.61	10.81
	SSIM /%	74.18	58.66	53.09	49.91
	Time /s	158	395	1379	2490

耗时间为1593 s,TWIST-DCT消耗时间为1176 s,与之相比,本文算法时间消耗分别降低了75.14%、66.33%。针对 $7\times 7$ 编码孔径条件下不同帧数的弯曲条纹仿真数据采用4种不同算法进行了重建,对比分析了本文所提出的三维TVAL3H算法与标准TVAL3算法、GAP算法、ADMM算法的重建性能。如图4所示,为了实现对二维诊断数据的重构,避免内存不足和提升重构速度,采用基于分块重构流程的标准TVAL3算法,但出现了较为明显的块效应。且对于 $7\times 7$ 编码孔径诊断条件,采用标准TVAL3重构算法对于不同帧数的条纹数据的处理,在复原效果上均不理想。本文所建立TVAL3H算法避免了块效应的影响,对于大编码孔径的条纹数据具有更好的复原效果。此外,从视觉效果来看,不同帧数下TVAL3H和GAP、ADMM的恢复效果接近,并且25 frame条件下复原的条纹细节比150 frame条件下的更多。

本文所构建的TVAL3H算法在重构过程中,直接使用哈达玛乘积的方式,将TVAL3算法扩展为三维重建方式,对冲击波速度场采样数据进行有效重建。此外,在重构求解过程中采用BB梯度法求解子问题,在保证重构质量的同时显著提高了算法重构速度。图5展示了复原数据的定量对比分析,图5(a)是 $7\times 7$ 编码孔径条件下不同算法的PSNR对比,图5(b)是 $7\times 7$ 编码孔径条件下不同算法的SSIM对比。图6是 $7\times 7$ 编码孔径条件下不同算法重构速度对比。由图6可知,与传统TVAL3重建算法相比,TVAL3H重建算法在25、50、100、150 frame时重建时间分别比传统TVAL3减少了92.15%、93.15%、76.45%、78.30%,PSNR分别提升了6.86、3.06、1.83、1.20 dB,SSIM分别提升了26.67%、17.69%、15.55%、14.10%,TVAL3H相对于标准TVAL3重建质量和重建速度都有明显提升。与GAP算法相比,TVAL3H重建算法在25、50、100、150 frame时重建时间分别比GAP算法减少了76.76%、76.13%、57.79%、61.80%,但

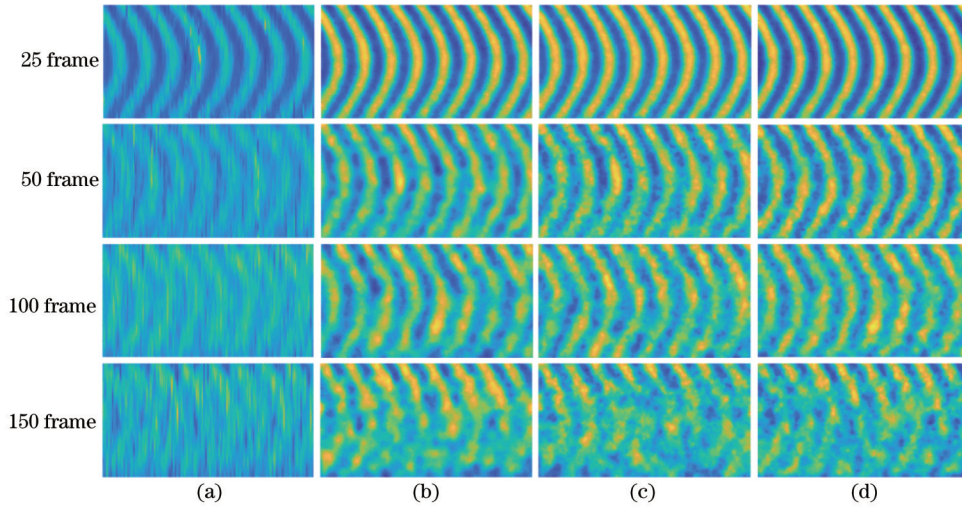


图 4 不同算法冲击波诊断速度条纹复原图。(a)TVAL3算法;(b)TVAL3H算法;(c)GAP算法;(d)ADMM算法

Fig. 4 Velocity fringe restoration images of shock wave diagnosis by different algorithms. (a) TVAL3 algorithm; (b) TVAL3H algorithm; (c) GAP algorithm; (d) ADMM algorithm

PSNR 分别仅有 0.47、0.10、0.08、0 dB 的降低,SSIM 的差异仅有 1% 左右。与 ADMM 算法相比, TVAL3H 重建算法在 25、50、100、150 frame 时重建时间分别比 ADMM 算法减少了 77.20%、

58.33%、61.00%,但 PSNR 分别仅有 0.49、0.15、0.13、0.02 dB 的降低,SSIM 的差异仅有 1% 左右。因此, TVAL3H 算法在保证重建质量的同时具有速度优势。

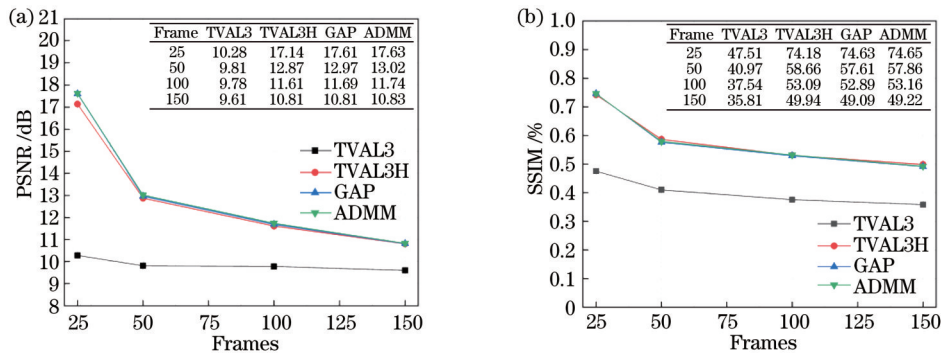


图 5 7×7 编码孔径条件下不同算法重构性能指标。(a)不同算法的 PSNR;(b)不同算法的 SSIM

Fig. 5 Reconstruction performance indices of different algorithms under 7×7 coding aperture. (a) PSNRs of different algorithms; (b) SSIMs of different algorithms

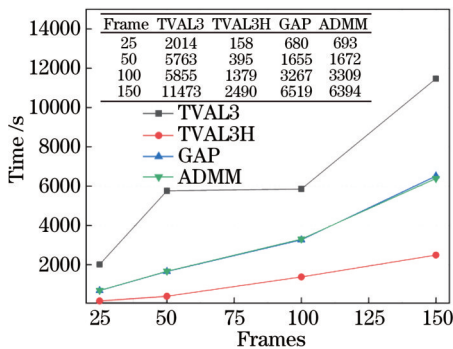


图 6 7×7 编码孔径条件下不同算法重构速度对比

Fig. 6 Comparison of reconstruction speed of different algorithms under 7×7 coding aperture

针对不同算法对不同帧数弯曲 7×7 孔径条纹进行重建,控制重构时间在和 TVAL3H 同一个量级,分

析对比了 GAP、ADMM 与本文提出的 TVAL3H 算法的恢复效果。图 7 是 7×7 孔径条件下,3 种算法同一时间量级的重构性能对比。其中,25 frame 时,将 TVAL3H、GAP 和 ADMM 的重建时间控制在 170 s±5 s;50 frame 时重建时间控制为 400 s±5 s;100 frame 时重建时间为 1490 s±10 s;150 frame 时重建时间控制为 2550 s±10 s。在 25、50、100、150 frame 时, TVAL3H 重建的 PSNR 达到 17.14~10.81 dB,相比 GAP 算法具有 1.92~0.84 dB 的优势,与 ADMM 算法相比具有 1.85~0.80 dB 的优势。TVAL3H 重建条纹图像的 SSIM 为 74.18%~49.91%,相比 GAP 算法提高了 9.23%~4.48%;比 ADMM 算法提高了 8.85%~4.46%。即相同重构时间条件下, TVAL3H 算法重构条纹分布的 PSNR 和 SSIM 都优于 GAP 和 ADMM 算法。

## 5 结 论

针对 CUP-VISAR 系统在复杂诊断环境中存在的重建噪声较大且重建算法耗时长的问题, 本文提出并实现了适用于 CUP-VISAR 压缩采样诊断数据的全变分正则化的三维扩展重建算法 TVAL3H。通过模拟 CUP-VISAR 诊断过程中冲击波条纹图像的 CUP 过程, 并结合实际压缩编码时的孔径问题, 采用  $1 \times 1$  和  $7 \times 7$  不同编码孔径条件完成了基于 CUP-VISAR 系统冲击波速度诊断干涉条纹仿真数据的重构实验。

本文提出的 TVAL3H 算法对比 TWIST 以及 TWIST-DCT 在重建速度上具有优势。对于 25 frame 和 50 frame 条件下的  $350 \times 780$  维度诊断数

据, 重构所花费的时间在 400 s 内。TVAL3H 对比传统 TVAL3 算法, 在 25、50、100、150 frame 时重建的 PSNR 和 SSIM 都有明显提升, 重建时间大幅度缩减。对比 GAP 和 ADMM 算法, 重建速度明显提升的同时 PSNR 和 SSIM 差异不大。将 TVAL3H 算法与 GAP、ADMM 算法的恢复时间统一到同一时间量级, 在不同帧时, TVAL3H 算法恢复条纹的 PSNR 和 SSIM 都优于 GAP 和 ADMM 算法。利用本文提出的改进全变分正则化重构算法模型对模拟 CUP-VISAR 数据进行重建, 大幅度提升重建速度的同时能够保证重建质量, 获得较好的重建效果, 可以用于 CUP-VISAR 真实数据冲击波诊断, 为 ICF 研究提供理论基础和应用价值。

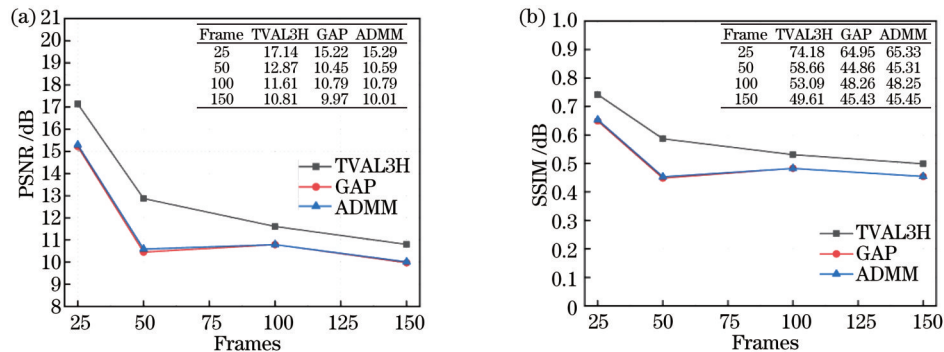


图 7 同一时间量级不同算法恢复性能对比。(a)不同算法的 PSNR;(b)不同算法的 SSIM

Fig. 7 Comparison of recovery performance of different algorithms at the same time order. (a) PSNRs of different algorithms; (b) SSIMs of different algorithms

## 参 考 文 献

- [1] 伊圣振, 司昊轩, 黄秋实, 等. 激光惯性约束聚变 X 射线诊断用多通道 Kirkpatrick-Baez 成像系统研究进展[J]. 光学学报, 2022, 42(11): 1134007.  
Yi S Z, Si H X, Huang Q S, et al. Research progress of multi-channel Kirkpatrick-Baez imaging system for X-ray diagnosis of laser inertial confinement fusion[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(11): 1134007.
- [2] 张茂兴, 孟萃, 徐志谦, 等. 激光惯性约束聚变装置内复合环境的线缆耦合效应[J]. 光学学报, 2022, 42(23): 2314002.  
Zhang M X, Meng C, Xu Z Q, et al. Cable coupling effect of complex environment in laser inertial confinement fusion device[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(23): 2314002.
- [3] 王峰, 理玉龙, 关赞洋, 等. 压缩感知技术在激光惯性约束聚变研究中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(3): 031021.  
Wang F, Li Y L, Guan Z Y, et al. Application of compressed sensing technology in laser inertial confinement fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(3): 031021.
- [4] Clark D S, Weber C R, Milovich J L, et al. Three-dimensional modeling and hydrodynamic scaling of National Ignition Facility implosions[J]. Physics of Plasmas, 2019, 26(5): 050601.
- [5] Jakubowska K, Mancelli D, Benocci R, et al. Reflecting laser-driven shocks in diamond in the megabar pressure range[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9(1): e3.
- [6] Celliers P M, Collins G W, Da Silva L B, et al. Accurate measurement of laser-driven shock trajectories with velocity interferometry[J]. Applied Physics Letters, 1998, 73(10): 1320-1322.
- [7] Celliers P M, Erskine D J, Sorce C M, et al. A high-resolution two-dimensional imaging velocimeter[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(3): 035101.
- [8] 徐涛, 王峰, 彭晓世, 等. 成像型任意反射面速度干涉仪系统的光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0722001.  
Xu T, Wang F, Peng X S, et al. Optical system design of imaging velocity interferometer system for any reflector[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0722001.
- [9] 刘寿先, 温伟峰, 袁树云, 等. 分幅面成像任意反射面速度干涉仪诊断激光驱动飞片全场速度[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912007.  
Liu S X, Wen W F, Yuan S Y, et al. Full field velocity measurement of laser-driven flyer using framing-imaging velocity interferometer system for any reflector[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912007.
- [10] Liang J Y, Zhu L R, Wang L V. Single-shot real-time femtosecond imaging of temporal focusing[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 42.
- [11] 王峰, 张兴, 理玉龙, 等. 激光惯性约束聚变研究中高时空诊断技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(11): 112002.  
Wang F, Zhang X, Li Y L, et al. Progress in high time-and space-resolving diagnostic technique for laser-driven inertial confinement fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(11): 112002.
- [12] Bioucas-Dias J M, Figueiredo M A T. A new TwIST: two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(12): 2992-3004.
- [13] Shi X H, Lin X, Kaminer I, et al. The superlight inverse Doppler effect[J]. Nature Physics, 2018, 14(10): 1001-1005.
- [14] 宋云. 压缩感知图像与视频重建方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017: 25-36.

- Song Y. Research on compressed sensing image and video reconstruction method[D]. Changsha: Hunan University, 2017: 25-36.
- [15] Rudin L I, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1992, 60(1/2/3/4): 259-268.
- [16] Hong M Y, Luo Z Q. On the linear convergence of the alternating direction method of multipliers[J]. *Mathematical Programming*, 2017, 162(1): 165-199.
- [17] Yang Y M, Li Y L, Guan Z Y, et al. A diagnostic system toward high-resolution measurement of wavefront profile[J]. *Optics Communications*, 2020, 456: 124554.
- [18] 甘华权. 基于稀疏基的压缩图像反演方法与实验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022: 14-20.  
Gan H Q. Compression image inversion method and experimental research based on sparse basis[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022: 14-20.
- [19] Li C B. An efficient algorithm for total variation regularization with applications to the single pixel camera and compressive sensing[D]. Houston: Rice University, 2010.
- [20] Andrei N. An acceleration of gradient descent algorithm with backtracking for unconstrained optimization[J]. *Numerical Algorithms*, 2006, 42(1): 63-73.
- [21] Condat L. A direct algorithm for 1-D total variation denoising[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, 20(11): 1054-1057.
- [22] Luo Y, Ward R K. Removing the blocking artifacts of block-based DCT compressed images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003, 12(7): 838-842.
- [23] Kim D, Park D. Element-wise adaptive thresholds for learned iterative shrinkage thresholding algorithms[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 45874-45886.
- [24] Tan C H, Ma S Q, Dai Y H, et al. Barzilai-Borwein step size for stochastic gradient descent[C]//Proceedings of the 30th International Conference on Neural Information Processing Systems, December-5-10, 2016, Barcelona, Spain. New York: ACM Press, 2016: 685-693.

## Fringe Reconstruction Technology of Two-Dimensional Shock Wave Velocity Field Based on Total Variation Regularization Constraints

Li Miao, Yu Baishan, Wang Xi\*, Zhang Lei, Wang Chenyan, Liang Jiaxin

*College of Opto-electronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China*

### Abstract

**Objective** In recent years, the development and utilization of nuclear energy have become an important field at the frontier of the world's scientific and technological competitions. Inertial confinement fusion (ICF), as controlled fusion, injects a large amount of energy into the target pellet containing fusion fuel in a very short period, and the fuel inside the pellet undergoes compressional implosion under the action of extremely high temperature, pressure, and density to cause thermonuclear fusion reactions. Throughout the fusion process, the fusion fails due to the uneven symmetry of compressional implosion caused by various factors, which also limits the development of ICF research. Measuring the velocity distribution of shock waves can predict the compression state reached by the target pellet and provide reliable reference data for further optimization of ICF compressional implosion processes. CUP-VISAR is a significant diagnostic instrument for shock wave velocity measurement in the late stage of ICF implosion by recording the interferometric fringes formed by Doppler shift. The CUP-VISAR system provides a new way of thinking about the research on ultra-high temporal resolution 2D imaging of ICF. Currently, the two-step iterative shrinkage thresholding (TWIST) algorithm is mainly employed to solve the optimization problem, which has a large amount of matrix operation during the iterative solution process and thus leads to the defect of long reconstruction time. In this study, a fast and better-quality data reconstruction algorithm is adopted for CUP-VISAR measurement systems.

**Methods** The traditional reconstruction algorithm of total variational regular constraint compression sampling is based on the total variational model to associate the sparse sampling matrix with its gradient domain to recover the edge and detail information of the sampled data during eliminating noise and artifacts. The traditional total variational regular constraint is mainly utilized to reconstruct two-dimensional data based on one-dimensional sampled data, but the adopted compression diagnosis process of CUP-VISAR systems is to collect three-dimensional data into two-dimensional data. The traditional total variational regularization algorithm is leveraged to recover the 3D diagnostic data of CUP-VISAR systems. It is necessary to expand the 3D linear observation matrix operators into a diagonal matrix for each frame and arrange them successively to form a two-dimensional matrix. However, the sampled data of the fringe distribution of the shock wave velocity field need to be arranged as a one-dimensional matrix, which is reconstructed into three-dimensional data after employing the full variational regularization algorithm. The diagonal matrix expanded by the linear observation matrix operator contains a large number of zero elements that do not contain effective information and expand the matrix



computation amount. Thus, the requirements including memory and CPU are relatively high, and this traditional total variation regularization reconstruction algorithm needs generally long reconstruction time. For diagnostic data with more than 40 frame, the partitioning method should be adopted for the reconstruction. However, the partitioning method may exert an obvious block effect on the data at the partitioning edge, which significantly reduces the reconstruction quality. Therefore, as the total variation regularization algorithm cannot directly reconstruct the two-dimensional data, it needs to be further extended and optimized to reconstruct the two-dimensional data collected by CUP-VISAR into three-dimensional data and improve the algorithm reconstruction speed spontaneously. We propose an improved total variation regularization reconstruction algorithm TVAL3H by combining the enhanced Lagrange function method and the alternate minimization method. The convex optimization problem to be solved is divided into two sub-problems which are solved by the iterative threshold shrinkage method and the Barzilai-Borwein gradient method respectively. In the reconstruction process, the TVAL3 algorithm is directly extended to 3D reconstruction by the Hadamard product method, which can effectively reconstruct the sampled data of the shock wave velocity field, significantly improve the reconstruction speed of the algorithm, and guarantee the reconstruction quality.

**Results and Discussions** Simulation reconstruction analysis results of the bending stripes show that the proposed TVAL3H algorithm improves peak signal to noise ratio (PSNR) by 6.86 dB (25 frame)–1.20 dB (150 frame) (Fig. 6) and structure similarity (SSIM) by 26.67% (25 frame)–14.10% (150 frame) (Fig. 6), and reduces time consumption by 92.15% (25 frame)–78.30% (150 frame) (Fig. 6) compared with the conventional TVAL3 algorithm. The time consumption is reduced by 57.79% (100 frame GAP)–77.20% (25 frame ADMM) while the PSNR and SSIM differences are smaller compared with the GAP and ADMM algorithms (Fig. 6). At the same reconstruction time scale, the PSNR of the proposed reconstruction algorithm improves by 1.92 dB (25 frame)–0.84 dB (150 frame) and 1.85 dB (25 frame)–0.80 dB (150 frame) compared with GAP and ADMM algorithms respectively in different frame conditions (Fig. 7). SSIM improves 9.23% (25 frame)–4.48% (150 frame) and 8.85% (25 frame)–4.46% (150 frame) (Fig. 7) compared with GAP and ADMM algorithms respectively.

**Conclusions** We propose and implement a three-dimensional extended reconstruction algorithm TVAL3H with total variation regularization for CUP-VISAR compressed sampling of diagnostic data, which simulates the ultrafast compression of shock wave fringe images in the CUP-VISAR diagnostic process. The reconstruction experiments on simulation data of the shock wave velocity diagnostic interference fringe based on the CUP-VISAR system are completed by simulating the compressed ultrafast photography process in the CUP-VISAR diagnostic process and combining the aperture problem during the actual compression coding in different coding aperture conditions of  $1 \times 1$  and  $7 \times 7$ . The proposed TVAL3H algorithm has advantages in reconstruction speed compared with TWIST and TWIST-DCT algorithms. For the  $350 \times 780$  dimensional diagnostic data at 25 and 50 frame, the spent reconstruction time is within 400 s. TVAL3H algorithm significantly improves the reconstruction PSNR and SSIM at 25, 50, 100, and 150 frame compared with the conventional TVAL3 algorithm, with significantly reduced construction time. Compared with the GAP and ADMM algorithms, the reconstruction speed is significantly improved with little difference in PSNR and SSIM. By unifying the recovery time of the TVAL3H algorithm with GAP and ADMM to the same time scale, the PSNR and SSIM of TVAL3H recovery fringes are better than those of GAP and ADMM at different frames. The reconstruction results are better than those of GAP and ADMM.

**Key words** diffraction and grating; compressed ultrafast photography; total variational regularization constraint; shock wave diagnosis; three-dimensional reconstruction; Hadamard product