

doi:10.3788/gzxb20184705.0525001

压缩感知在条纹相机成像中的应用

刘爱林^{1,2}, 张敬金¹, 郭宝平¹, 杨勤劳¹, 袁清钰¹, 雷宝国¹, 邱振富¹

(1 深圳大学 光电工程学院 光电子器件与系统教育部重点实验室, 广东 深圳 518006)

(2 湖南科技学院 电子信息工程学院, 湖南 永州 425100)

摘 要: 条纹空间分辨率从中心到边缘逐渐降低, 为了改善条纹管像面的边缘空间分辨率, 构造了一个基于压缩感知的条纹相机成像重构模型. 压缩感知目标函数采用正交匹配法实现, 并对重构参数进行了优化. 原成像结果与重构结果对比表明: 压缩感知重构图的对比度比原图提高了 5%, 极限分辨率比原图提高了 2 lp/mm, 并且离轴远区的改善效果好于中心区的改善效果. 压缩感知重构方法可以改善像面边缘的成像对比度从而提高条纹相机成像的静态空间分辨率.

关键词: 光电子学与激光技术; 条纹相机; 压缩感知; 超快诊断; 空间分辨率

中图分类号: TB972; TN143

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)05-0525001-6

Application of Compressed Sensing in the Streak Camera Imaging

LIU Ai-lin^{1,2}, ZHANG Jing-jin¹, GUO Bao-ping¹, YANG Qin-lao¹, YUAN Qing-yu¹,
LEI Bao-guo¹, QIU Zhen-fu¹

(1 College of Optoelectronic and Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry Education, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

(2 College of Electronic and Information, Hunan Technology and Engineering University, Yongzhou, Hunan 425100, China)

Abstract: It is found that the resolution of the striations is reduced from the center to the edge. In order to improve the edge spatial resolution of the streak, the compression sensing is applied to the X-ray streak camera imaging system. The compressed sensing reconstruction model is constructed for the streak camera, the compressed sensing objective function is implemented by orthogonal matching method, and the reconstruction parameters are optimized. After the original image is compared with the reconstructed image, the result shows that the contrast ratio of the compressed sensing reconstruction is 5% higher than the original; the limit resolution is 2lp/mm higher than the original image, furthermore, the improvement effect far from the central area is better than that of the central area. The compressed sensing reconstruction can improve image contrast ratio on the edge of image, thus, the static spatial resolution of the image is improved.

Key words: Optoelectronics and laser technology; Streak camera; Compressed sensing; Ultrafast process diagnosis; Spatial resolution

OCIS Codes: 250.0040; 320.0320; 170.7180; 330.6130; 170.7160

0 引言

惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)研究中, 主要诊断对象的特征是: 空间尺度小(约

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(No.2014YQ230659), 湖南省自然科学基金(No.13JJ6079), 湖南省永州市科技计划项目(No.2015a20)和湖南科技学院重点学科建设项目(电路与系统)资助

第一作者: 刘爱林(1972-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为光电信号处理. Email: liuailing2001@163.com

导师(通讯作者): 郭宝平(1958-), 男, 教授, 硕士, 主要研究方向为光电信号处理. Email: bpguo@szu.edu.cn

收稿日期: 2017-11-22; **录用日期:** 2018-02-05

<http://www.photon.ac.cn>

100 μm)、演化快(约 100 ps)、状态极端(高温约 108 K, 高密度约 200 g/cm^3)等, X 射线条纹相机作为高时空分辨能力的科学仪器, 是 ICF 研究中的主要诊断工具, 其核心部件条纹管是由光电阴极、加速栅网、静电聚焦系统、偏转系统、荧光屏组成, 其基本原理是将 X 射线辐射的时间信息投影为荧光屏上可见光的空间信息. 时间分辨率、空间分辨率和动态范围是条纹相机的三个主要性能指标. 牛憨笨院士等^[1]证明空间电荷效应的累积限制了条纹相机时空分辨率的提高. 国内外在提高条纹相机时空分辨率方面取得了一些进展, 主要有中科院西安光学精密机械研究所^[2]采用行波偏转器前置短磁聚焦技术, 该技术克服了静电聚焦方式存在的减速场, 法国 Photonis 公司^[3]采用的平板电极结构技术, 该设计可以使电子团压缩时间弥散变小, 深圳大学光电研究所^[4-6]设计了大物面条纹管, 还有加速栅网和加速狭缝通道组合平板电极等各种结构的条纹管, 以上方法都较好的提高条纹相机的时空分辨率.

由于条纹管阴极面上不同高度发射的电子束其成像位置并非在同一平面上, 而是抛物面, 而一般的条纹相机采用的是平面荧光屏或者是球面荧光屏(但电子束实际像面并非完整的球面), 所以像面与荧光屏并非完全贴合, 因此非相切位置的电子束投影在荧光屏上时会出现散焦情况. 在实际测试时, 调整聚焦电压使得阴极中心分辨最佳, 此时其他离轴位置的电子束则并未处于最佳像面上, 类似于光学透镜的场曲现象, 因而中轴为聚焦区, 可以得到较高的静态空间分辨率, 而离轴区为散焦区, 空间分辨率下降.

压缩感知(Compressed Sensing, CS)可以恢复从欠采样的稀疏数据到最优实际目标像, 在成像系统降低光源强度, 减少 CCD 的曝光时间等条件下, 所成的像通过压缩感知重构算法恢复, 可获得与原条件下的成像效果相近的目标像^[7], 中科院深圳先进技术研究院^[8]应用压缩感知解决声光成像中场曲引起的散焦问题. 针对条纹管中离轴区为散焦区, 空间分辨率下降的问题, 采用压缩感知来提高条纹管边缘空间分辨率.

1 方法

1.1 成像系统

X 射线条纹相机主要由其核心部件条纹管、微通道板增强模块、高压及低压供电模块、扫描电路控制模块、图像采集模块(电荷耦合器件, CCD)以及图像记录系统(计算机)组成. 其成像原理是由光电阴极通过光电效应, 将对待表征的 X 射线入射脉冲的时序时间、时间间隔、强度分布等诊断信息线性传递给电子脉冲; 之后经过由静电聚焦或者磁聚焦构成的电子光学成像系统对电子束进行加速、聚焦; 再经过扫描电路偏转之后, 将电子束的时间信息投影在空间维度上, 经由荧光屏进行光电转换, 将其位置信息以及强度信息等通过 CCD 采集记录到计算机中^[4].

通过与 CCD 等二维探测器结合, 条纹相机可以提供各种超快中的时间信息, 空间信息以及强度(或者光谱)信息, 相应的, 其主要的参数即为时间分辨率, 空间分辨率以及动态范围^[5]. 条纹相机的时间分辨率和空间分辨率分别为条纹相机在记录过程中所可以分辨的最小空间细节和最小时间间隔, 是条纹相机的重要指标.

1.2 空间调制传递函数与空间分辨率

一个实际的电子光学系统, 由于像差的存在, 一个物点经过系统所成的像不是一个理想点. 它的光强从中心向外扩展, 弥散成一个中间亮, 四周渐暗的光斑, 在空间的分布可以用一个点扩展函数(Point Spread Function, PSF)来表示. 点扩展函数的分布反映了电子光学系统的成像性质. 电子光学系统是一个线性平移不变传输系统, 则传输前后的电子束斑就是系统的物和像. Csorba 提出一个公式用来表示电子光学成像系统的空间调制函数, 式中 ρ_c 被称为聚焦误差系数^[6].

$$\text{MTF}(f) = \exp[-(\pi\rho_c f)^2] \quad (1)$$

系统的衬度传递函数(Contrast Transfer function, CTF)对应的是方波图像, 系统的调制传递函数对应的是正弦图像, 由傅里叶级数可以得出^[7]

$$\text{MTF}(f) = \frac{\pi}{4} \text{CTF}(f) \quad (2)$$

1.3 压缩感知理论

CS 方法可以用欠采样的测量方法恢复稀疏和压缩信号, 压缩观测 $\mathbf{y} = \Phi\mathbf{x}$, 式中 \mathbf{y} 为观测所得向量($M \times 1$), \mathbf{x} 为原信号($N \times 1$) ($M \ll N$). \mathbf{x} 一般不是稀疏的, 但在某个变换域 Ψ 是稀疏的, 如余弦变换、傅立叶变

换、小波变换,变换式如 $x = \Psi\theta$, 式中 θ 为 K 稀疏的, 即 θ 只有 K 个非零项. 此时 $y = \Phi\Psi\theta$, 令 $A = \Phi\Psi$, 则 $y = A\theta$. 在条纹相机中, 如果从 CCD 获得测量数据是 y , 则与成像系统有关的测量矩阵为 Φ , 然后令 $y = \Phi\theta = \Phi\Psi^{-1}x$, 这时 CS 就成了 X-ray 扫描成像系统的一部分, 稀疏转换 Ψ 的重构可以通过解约束条件下的优化问题获得^[9]:

$$\min \|x\|_1 \text{ s.t. } y = \Phi\Psi^{-1}x \quad (3)$$

为了重构在条纹相机散焦区域所成的图像, 构造了一个基于 CS 重构模型, 方程为^[11]

$$\arg \min F = \|\Phi\Psi^{-1}x - y\| + \alpha \|x\|_1 + \beta TV(\Psi^{-1}x) \quad (4)$$

式(3)、(4)也可以写成

$$\arg \min F = \|\Phi\Psi^{-1}x - y\| + \alpha \|x\|_1 + \beta TV(\theta) \quad (5)$$

式中, Ψ 采用常用的余弦变换, 除了稀疏域中的 ℓ_1 范数项, 总的信号变异惩罚项也纳入到目标函数用来提高重构的精度, 第一项为重构图像与实验测量值之间的均方误差, 第二项为 x 的 ℓ_1 范数, 第三项 TV 为信号变异惩罚因子^[9], 同时, α 和 β 是平衡参数, 决定数据相容性和稀疏性之间的平衡. 过平衡值可能导致重构扭曲, 只有比例接近客观值, 才可以达到最佳的重构效果, 实验中, 通过尝试不同的组合确定最优的平衡参数 (α 和 β 取 0.05 和 0.9). 测试原理图与软件实现流程见图 1.

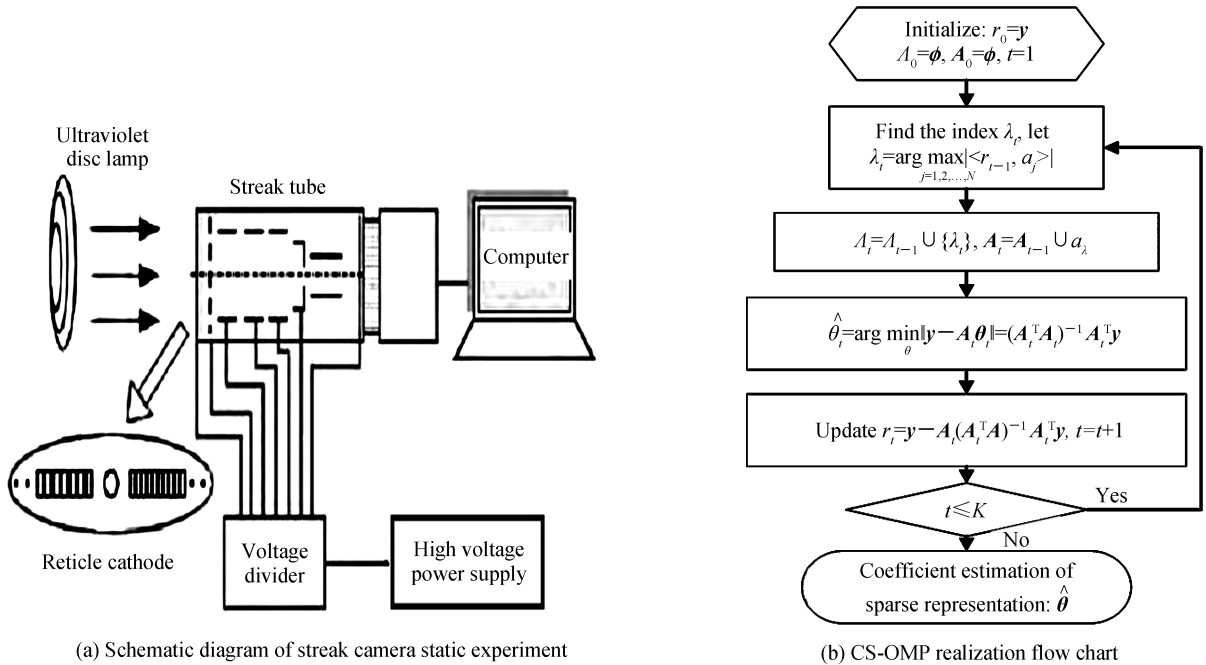


图 1 测试原理图与软件实现流程图
Fig.1 Schematic diagram of experiment and soft realization flow chart

2 实验

2.1 条纹相机静态测试

静态测试原理如图 1(a), 测试系统的条纹相机实物图、阴极实物图和静态空间分辨率测试现场如图 2, 荧光屏 $\Phi 52 \text{ mm}$ 耦合 1.3 : 1 的缩小光锥, PI2048 型 CCD 尺寸 $27.6 \times 27.6 \text{ mm}^2$ 无法全覆盖. 在 CCD 全覆盖一侧, 由测试图像得到的条纹对比度值, 在离轴中心附近 1.2 mm 以 3.5 mm 为间隔均取样得到的 4.7、8.2、11.7 mm 处, 对比度分别为 0.216、0.302、0.451、0.484, 以 CTF 为 0.05 时为极限空间分辨率, 可计算得变相像管中心分辨率 31 lp/mm, 边缘分辨率为 20 lp/mm, 分划条纹从中心到边缘分辨率降低, 实验结果与成像的场曲散焦现象分析结果相符.

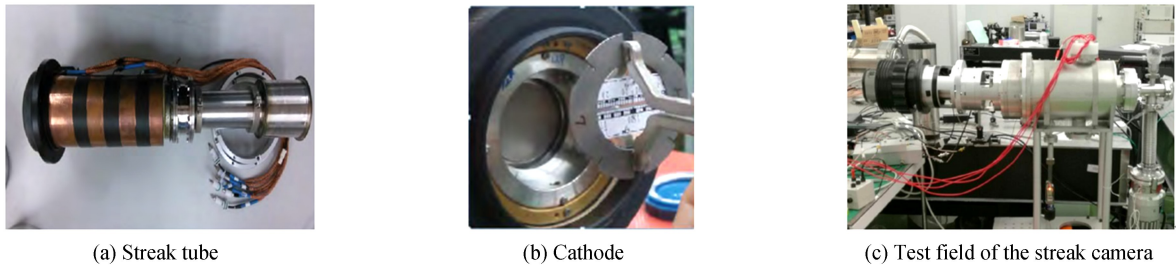


图2 条纹管、阴极实物与条纹相机测试现场

Fig.2 The photo of cathode, streak tube and the spatial resolution test field of the streak camera

2.2 压缩感知算法实现

压缩感知目标函数采用正交匹配法(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)求解^[12],算法实现流程图如图1(b),流程图中: r_t 表示残差, t 表示迭代次数, Λ_t 表示 t 次迭代的索引(列序号)集合, λ_t 表示第 t 次迭代找到的索引, a_j 表示矩阵 \mathbf{A} 的第 j 列, A_{Λ_t} 表示按索引 Λ_t 选出的矩阵 \mathbf{A} 的列集合, θ_t 为 $t \times 1$ 的列向量, \cup 表示集合合并, $\langle \cdot \rangle$ 表示求向量内积.测试了四种经典的测量矩阵:随机测量矩阵,部分哈达玛测量矩阵,贝努利测量矩阵,托普利兹,根据测量矩阵与重构误差之间关系,得出部分哈达玛测量矩阵的重构误差小,重构效果好.CS-OMP测量值(M)与重构成功率关系如图3(a),稀疏度(K)与重构成功率关系如图3(b),稀疏度(K)是图像矩阵 \mathbf{A} 中线性相关的最小列数,很难通过计算得到^[12]. M 值越大,重构成功率越高,信号稀疏度越小,重构的成功率越高,尝试不同测量值和稀疏度以达到条纹相机成像的最优重构值,测量值 M 取256,稀疏度(K)估算为40,测量矩阵选用部分哈达玛测量矩阵.

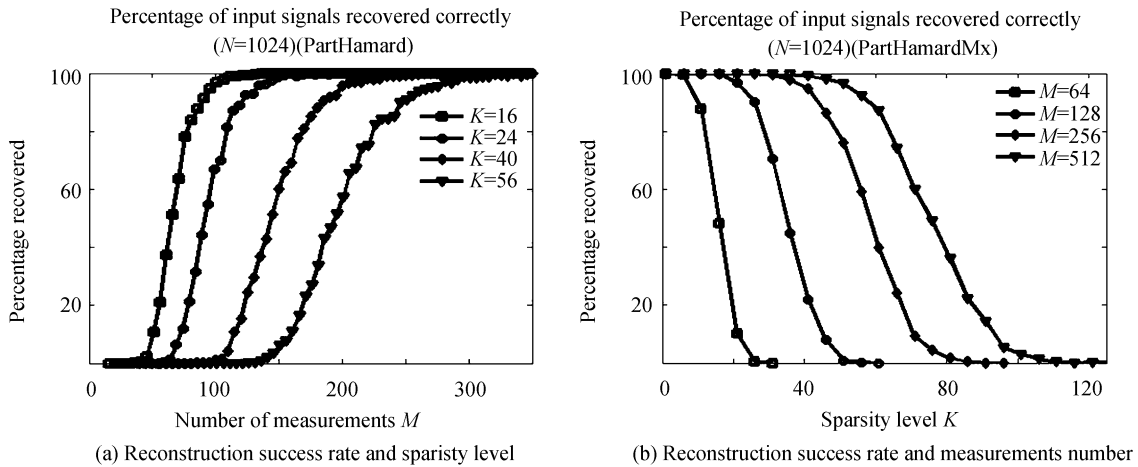


图3 重构成功率与测量值、稀疏度的关系

Fig.3 The relationship between reconstruction success rate and sparsity level, measurements numbers

2.3 实验结果分析

在可观测的阴极范围内,实际应用中应先将图像的背景噪声扣除,实际计算时的对比度计算公式为

$$C = \frac{(I_{\max} - I_{\text{nos}}) - (I_{\min} - I_{\text{nos}})}{(I_{\max} - I_{\text{nos}}) + (I_{\min} - I_{\text{nos}})} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min} - 2I_{\text{nos}}} \quad (6)$$

式中, I_{\max} , I_{\min} , I_{nos} 分别是条纹图像中的亮纹强度值、与之相邻暗纹的强度值和图像的背景噪声.CS-OMP重构图与原图对比度如表1,由球面荧光屏计算极限静态空间分辨率的方法求出相应的极限分辨率.从表1数据可以看出,CS-OMP重构图对比度平均提高了5.0%,极限分辨率平均提高了2 lp/mm,离轴中心距离1.2 mm处,对比度提高1.1%,极限分辨率提升1 lp/mm,而在离轴中心距离11.7 mm处,对比度提升了7.4%,极限分辨率提升了3 lp/mm,因此像面边缘对比度的提高比中心区明显,由超快静态图像中线强度图5也可以看出,CS-OMP重构图的对比度有一定的提高.使用散焦的动态测试图像实验,由表2可以看出,CS-OMP的散焦动态图像的条纹对比度平均提高了5.1%,静态测试图像与CS-OMP重构图对比如图4,动态条纹管成像重构实验重构效果如图6.



图4 条纹管 CS-OMP 重构图与原图比较
Fig.4 Comparison of streak camera static test image and CS-OMP reconstruction image

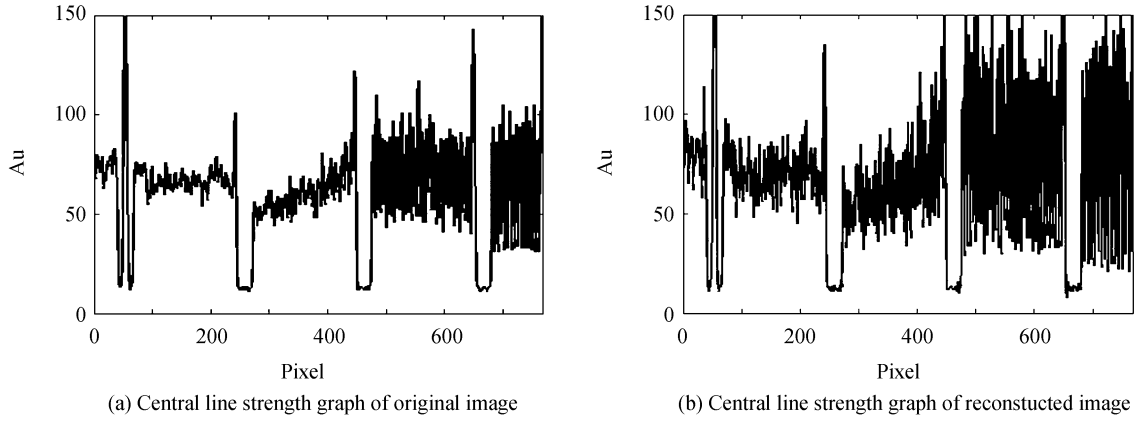


图5 条纹管静态图像中线强度图比较
Fig.5 Comparison of central line strength graph in streak camera static image

表1 条纹变像管静态空间分辨率测试数据比较

Table 1 Comparison of the static spatial resolution test data of the streak camera

| Streak spatial resolution / (lp · mm ⁻¹) | Distance from the center of the axis/mm | CTF / % | Limit spatial resolution / (lp · mm ⁻¹) | CS-OMP CTF / % | CS-OMP Limit spatial resolution / (lp · mm ⁻¹) |
|--|---|---------|---|----------------|--|
| 22 | 1.2 | 21.6% | 31 | 23.7% | 32 |
| 18 | 4.7 | 30.2% | 28 | 35.2% | 30 |
| 12 | 8.2 | 45.1% | 23 | 50.1% | 25 |
| 10 | 11.7 | 48.4% | 20 | 55.8% | 23 |

表2 条纹管动态图像条纹对比度比较

Table 2 Comparison of dynamic image contrast of streak camera

| Resolution / (lp · mm ⁻¹) | Original CTF (I) | CS-OMP CTF (I) | Original CTF (II) | CS-OMP CTF (II) | Original CTF (III) | CS-OMP CTF (III) |
|---------------------------------------|------------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|------------------|
| 23 | 22.3% | 27.4% | 18.2% | 23.6% | 10.2% | 15.1% |
| 25 | 21.1% | 26.5% | 17.4% | 22.5% | 9.1% | 14.6% |

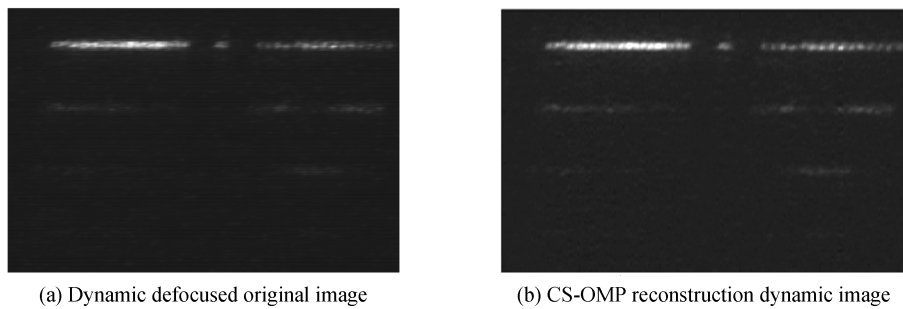


图6 条纹管动态散焦原图与 CS-OMP 重构图比较
Fig.6 Comparison of streak camera dynamic defocused image and CS-OMP reconstruction image

3 结论

条纹管阴极面上不同高度发射的电子束其成像位置并非在同一平面上,而是抛物面,通过对条纹变像管静态空间分辨率测试数据分析,离轴区为散焦区,应用压缩感知算法改善条纹管相机散焦区成像质量.为了达到条纹管相机成像最优恢复的效果,构建了一个基于 CS 的重构模型,测试了四种常用的测量矩阵与重构误差的关系,实验了稀疏度、测量值与重构成功率的关系,并且尝试不同的组合平衡参数,实验结果显示静态图像和散焦动态图像的对比度提升了 5%,静态测试图像的极限分辨率平均提升了 2 lp/mm,离轴中心距离 1.2 mm 处,对比度提高 1.1%,极限分辨率提升 1 lp/mm,而在离轴中心距离 11.7 mm 处,对比度提升 7.4%,极限分辨率提升了 3 lp/mm,说明边缘的对比度改善比较明显,CS-OMP 方法对由于场曲引起的边缘散焦现象有一定的补偿作用,为提升条纹管相机的空间分辨率提供一种新思路.

参考文献

- [1] NIU H, SIBBETT W. Theoretical analysis of space-charge effects in photochron streak cameras[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1981, **52**(12): 1830-1836.
- [2] LIU Rong, TIAN Jin-shou, MIAO Run-cai, *et al.* Dynamic characteristic analysis on streak image tube with high temporal resolution[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(10):1012001.
刘蓉, 田进寿, 苗润才, 等. 高时间分辨率条纹变像管的动态特性研究[J]. 光子学报, 2016, **45**(10):1012001.
- [3] SCHIMANN D, MENS A, SAUNEUF R, *et al.* Performance of the ultrafast streak camera C850X[C]. SPIE, 1992, 1757:8-18.
- [4] LIAO Hua, HU Xin, YANG Qin-lao, *et al.* Soft X-ray streak camera with dynamic range of 2000 and picosecond temporal resolution[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2190-2193.
廖华, 胡昕, 杨勤劳, 等. 动态范围 2000 的皮秒时间分辨软 X 射线扫描相机[J]. 光子学报, 2010, **39**(12):2190-2193.
- [5] ZHANG Jing-jin, YANG Qin-lao. Design of approximate concentric sphere large format X-ray streak tube [J], *Laser&Optoelectronics Progress*, 2017, **54**(5): 188-193.
张敬金, 杨勤劳. 类同心球大物面 X 射线条纹管设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, **54**(5):188-193.
- [6] GU Li, ZONG Fang-ke, LI Xing, *et al.* Development of X-ray streak camera with large dynamic range and high temporal spatial resolution[J]. *Acta Optic Sinica*, 2017, **37**(12): 1234001.
顾礼, 宗方轲, 李翔, 等. 大动态范围高时空性能 X 射线条相机研制. 光学学报, 2017, **37**(12): 1234001.
- [7] LUSTIG M, DONOHO D, PAULY J M. Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging[J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2007, **58**(6), 1182-1195.
- [8] MENG J, LIU C, ZHENG J, *et al.* Compressed sensing based virtual-detector photoacoustic microscopy in vivo[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, **19**(3): 036003.
- [9] WANG Q, QU G. Restricted isometry constant improvement based on a singular value decomposition-weighted measurement matrix for compressed sensing[J]. *IET Communications*, 2017, **11**(11): 1706-1718.
- [10] THOMPSON J V, MASON J D, BEIER H T, *et al.* High speed fluorescence imaging with compressed ultrafast photography[C]. SPIE, 2017, 10076: 1007613.
- [11] TROPP J A, GILBERT A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, **53**(12): 4655-4666.
- [12] DONOHO D L, ELAD M. Optimally sparse representation in general (non-orthogonal) dictionaries via ℓ_1 minimization [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, **100**(5): 2197-2202.

Foundation item: The National Special Foundation of the Mayor Equipment Development (No.2014YQ230659), The Project of Hunan Natural Science Foundation Funding (No.13JJ6079), The Science Plane Project in Yongzhou, Hunan (No.2015a20), the Construct Program of the Key Discipline in Hunan University of Science and Engineering (Circuits and System)