放大同轴全息图压缩传感层析重建

于瀛洁1,林星羽1,伍小燕2*

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院,上海 200072;

2. 上海第二工业大学 智能制造与控制工程学院,上海 201209)

摘 要: 文中对放大方式下同轴全息图压缩传感重建开展了实验研究,目的是实现分层物体放大方 式下的同轴全息图的层析重建。首先,对同轴全息图压缩传感重建进行了理论介绍,并给出了实现步 骤,包括全息图频域减采样模式、两步迭代算法流程等;其次,建立了点源放大同轴全息图记录实验 系统和显微物镜放大同轴全息图记录实验系统,以双层样本为例开展了实验工作,所记录的同轴全息 图基于压缩传感理论进行了层析重建,同时基于传统的卷积算法也进行了反衍射重建。实验结果表 明:两种放大方式下获得的全息图,通过压缩传感层析重建技术能够实现物体的层析重建,并且比传 统卷积反衍射重建具有更好的结果,显示了压缩传感层析重建的能力和优势。

关键词:同轴全息图; 压缩传感; 层析重建

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0603017

Tomographic reconstruction of magnified in-line hologram based on compressive sensing

Yu Yingjie¹, Lin Xingyu¹, Wu Xiaoyan^{2*}

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: The compressive sensing reconstruction of magnified in –line hologram was experimentally researched in this paper. It aimed at the tomographic reconstruction of magnified multilayer samples. Firstly, the compressive sensing reconstruction of in –line hologram was introduced in theory, and the realization procedure was shown, including frequency domain down–sampling mode, the flow of two–step iterative algorithms, etc. Secondly, hologram recording system in case of point–source magnification and microscope objective magnification was established, the experimental work was carried out, which took multilayer samples as an example, and tomographic reconstruction of recorded in–line hologram based on compressive sensing. In the same time, it processed back–propagation reconstruction based on traditional convolution algorithm. The experimental results show that compressive sensing tomographic reconstruction modes, and have better reconstruction results than the traditional convolutional inverse diffraction reconstruction. And it shows the ability and superiority of compressive–sensing tomographic reconstruction.

Key words: in-line hologram; compressive sensing; tomographic reconstruction

收稿日期:2019-01-10; 修订日期:2019-02-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51775326)

作者简介:于瀛洁(1969-),女,研究员,博士,主要从事光学测量方面的研究。Email: yingjieyu@staff.shu.edu.cn

通讯作者: 伍小燕(1981-), 女, 讲师, 博士, 主要从事全息测量方面的研究。Email: orchis_2005@163.com

0 引 言

数字全息是目前比较成熟且应用日益广泛的 技术方法,基于单幅全息图就可以实现三维信息再 现,具有灵敏度高、响应速度快、能够记录动态物体 的瞬时状态等特点。但对于多层物体同轴全息而 言,重建结果受离焦像、零级像和共轭像的影响。 David J. Brady 将压缩传感理论应用在数字全息领 域中¹¹,提出了压缩全息的概念,实验实现了两层距 离较远的蒲公英的全息图层析重建[2]。该团队也对 散射型的物体进行了研究[3-4]并将压缩全息技术拓 展到了全息显微技术^[5-6]。在一些危险物品的安全监 测中,也应用了压缩全息技术[7-8],改进了原先传统 毫米波内全息技术监测过程中运行速度较慢、扫描 时间较长的问题。以色列班古里昂大学成立了专门 的课题组开展压缩全息技术方面的研究, Rivenson 和 Stern 等开始关注压缩全息技术以及理论和实现 条件分析[9-10],在其综述性参考文献[11]中分析了 压缩全息在菲涅耳全息技术当中的适用范围[12];采 用压缩菲涅耳全息技术可以实现物波部分被遮挡时 物体的恢复[13];将压缩全息技术应用于多视角投影 全息当中,减少传统多视角投影全息重建的投影数 以节约操作时间[14]等。

除此以外, 压缩全息技术在国外有许多团队在 进行各个应用方面的研究, 比如照明光源较弱情况 中离轴压缩全息的研究^[15];在压缩全息技术中,结合 使用相移干涉技术以及单像素成像技术, 对镜片的 相位分布进行评估^[16];Kim 等^[17]提出基于压缩感知 的自干涉非相干数字全息重建方法,采用 LED 作为 离散点源,与角谱法重建结果相比,压缩全息重建可 以提高轴向分辨率,适用于动态监测。2018 年,L. C. Liang 和 Brady 等提出压缩全息技术来重建完全 没有共轭像的全息图^[18],使用总变差稀疏约束的迭 代算法来滤除共轭信号并克服了全息重建中固有的 物理对称性。

随着杜克大学、班古里昂大学等高校对压缩全 息技术的不断深入研究,清华大学、浙江大学、燕山 大学、华南师范大学和上海大学等一些科研工作者 也陆续开展压缩理论在全息技术上的应用研究。例 如,清华大学对相移压缩数字全息进行的研究¹¹⁹;浙 江大学采用压缩同轴全息重建颗粒性物体^[20];华南 师范大学基于压缩全息技术建立了单像素的全息成 像系统^[21];上海大学基于压缩全息技术建立了点源 放大压缩全息层析系统^[22-23]等。

压缩全息技术已经成功应用于同轴全息^[1]、离轴全 息^[24-25].相移全息^[26-27]、单像素全息^[28-30]及弱相干全息^[31]、 非相干全息^[32]、彩色全息^[33]、自干涉全息^[34]、扫描全息^[35] 等多种全息图形式,实现了对透明、非透明和分层物体 的三维重建^[36-38]。显微全息实现方式上有多种实现^[39-41], 以满足不用应用的要求。其中点光源直接照射物体的 放大方式(后文简称点源放大)和显微物镜放大方式是 两种常用的放大方式,前者系统简单,但受限于系统尺 寸放大倍率有限,后者可以获得较大的放大倍率。文中 介绍了两种显微放大常用形式的同轴全息图记录系 统-即点源放大和显微物镜放大同轴全息图记录系 统-即点源放大和显微物镜放大同轴全息记录系统,以 及在两种记录方式下获得的全息图的压缩传感重建方 法,并基于多层切片式物体开展了这两种显微记录下 获得的放大全息图的压缩传感重建实验,文中实验结 果对压缩显微全息重建技术的实现具有参考意义。

1 基于压缩传感的放大同轴全息重建

压缩传感与全息技术之间的关联性表现在:全 息记录系统为菲涅耳远场记录时,测量基相当于傅 里叶测量矩阵,当选择恰当的稀疏矩阵时,可以通过 压缩传感理论从少量测量数据中实现高精度重建; 全息记录系统为菲涅耳近场记录时,测量基为菲涅 耳测量矩阵,同样选择恰当的稀疏矩阵时,也可以通 过压缩传感理论实现少量数据的高精度重建。

图 1 所示为两种常用的放大同轴全息记录系统 示意图,其中图 1(a)中点源照射物体,其衍射光波由 CCD 所记录;图 1(b)中物体经显微物镜放大后,衍 射光波由 CCD 所记录,一般 CCD 放置在偏离像方 成像的位置。



(a) Point-source magnification



(b) 显微镜放大
 (b) Microscope magnification
 图 1 显微放大同轴全息记录系统示意图
 Fig.1 Schematic diagram of microscopic magnified in-line holographic recording system

两种放大方式系统实现和倍率上有所差别,但 全息图压缩传感重建原理是一致的。去除直流项之 后的全息图可以简化为公式(1)所示的带有系统误 差的线性关系^[42]:

$I(x, y; z_{ccd}) =$

 $2\text{Re}\{U_0^{*}(x, y; z_{ccd})U_s(x, y; z_{ccd})\}+N(x, y)$ (1) 式中: Re{·}取实部; (x, y; z_{ccd})为记录平面坐标; U_0 为入射光在 CCD 平面上的光场; U_s 为物体在 CCD 平面上的衍射场; N(x, y)为 U_s 的自相关项所 带来的系统误差。

全息图去除直流项之后频谱信息离散化后可表示为:

$$F_{I_{00}} = 2F_{2D} \left\{ \operatorname{Re}(U_{0,n_{1}n_{2}}^{*}U_{s,n_{1}n_{2}}) \right\} + e + n = 2F_{2D} \left\{ \operatorname{Re}\left\{ \sum_{l} C_{l} F_{2D}^{-1} \left\{ F_{2D} \left\{ \beta_{n_{1}n_{2}l}^{\cdot} \right\}_{m_{1}m_{2}} H_{F, m_{1}m_{2}l} \right\}_{n_{1}n_{2}} \right\} \right\} + e + n$$

式中: β 为物体散射场; H_F 为菲涅耳传递函数; F_{2D} 为二维傅里叶变换; F_{2D}^{-1} 为二维傅里叶反变换;n为N自相关项的频谱;e 为外界噪声频谱。

对于显微放大同轴全息图,频谱信息大多数都 集中在频域中心位置并且信息分布密度从中心位置 往边缘逐渐衰减。因此为了减少采集点源放大同轴 全息图的数据量,在全息图频域进行采样即数据压 缩处理。数据压缩过程可以通过在原点附近采集大 部分数据,边缘采集少量数据的方法。文中采用指数 分布变密度减采样^[43],采样模式生成的二值矩阵用 *M*表示。频域去除直流项并减采样之后,点源放大全 息图频谱少量数据可以表示为:

$$\hat{F}_{I_{os}} = M^* \cdot F_{I_{os}} \tag{3}$$

定义 X 和 Y 分别为物体散射场 $\beta_{n,n,l}$ 和全息图频

谱 $\hat{F}_{I_{o}}$ 的向量表示,因此公式(2)可简化为:

$$Y=2HX+e+n \tag{4}$$

式中: H 为测量矩阵,其中每个元素可表示为 H_{ij} = $\left[F_{2D}\operatorname{Re}\left\{CF_{2D}^{-1}H_{F}F_{2D}\right\}\right]_{ii}\circ$

根据测量基-稀疏基以及重构算法的分析可知, 公式(4)可以通过最小全变差算法的两步迭代法求 解。因此原始信号可以通过公式(5)求解实现。

$$f(X) = \arg\min_{f} \frac{1}{2} ||Y - 2HX||_{2}^{2} + \tau ||X||_{TV}$$
 (5)

式中:||X||_{TV} = $\sum_{m} \sum_{n} \sum_{q} \cdot \sqrt{(X_{m+1,n,q} - X_{m,n,q})^2 + (X_{m,n+1,q} - X_{m,n,q})^2 + (X_{m,n,q+1} - X_{m,n,q})^2};$ τ 为用来平衡的正则化参数。

为满足压缩传感重建算法,*Y*,*f*和*X*都应该采用 一维向量表示;而*X*求解过程是在不断更新其当前 值,其更新过程为:

$$X_{t} = \Gamma_{\lambda} \left(X_{t-1} \frac{\phi^{\mathrm{T}} (Y - \phi X_{t-1})}{s}, \frac{\mathrm{thr}}{s} \right)$$

$$X_{t} = (1 - \alpha) X_{t-2} + (\alpha - \beta) X_{t-1} + \beta \Gamma_{\lambda} (X_{t-1}, \mathrm{thr})$$
(6)

式中: $t \ge 2$; X_0 为初始值; α 、 β 为决定收敛速度的两参数; Γ_{λ} 为除噪函数,其中 $\Gamma_{\lambda}(X_i) = \psi_{\lambda}^{\mathsf{T}}(X_i + \phi^{\mathsf{T}}(Y - X_i))$;

$$\psi_{\lambda}^{\mathrm{T}} = \sum_{i} T(\langle X, \psi_{i} \rangle) \cdot \psi_{i} \circ$$

综上,针对同轴全息图的层析重建的基于最小 全变差算法的两步迭代算法流程如下。

已知:测量数据 Y

初始化:迭代时间 *t*=1,迭代终止值 ε,步长 *s*=1

 根据 Y= φX 反向求解 X,并且令 X₀=X,同时 根据公式(5)计算 X₀的目标函数 f(X₀);

(2) 消噪处理: $X_1 = \Gamma_{\lambda}(X_0 + \phi^T (Y - \phi X_0)/s, \text{ thr}/s)$ 并 且计算 X_1 的目标函数;比较 $f(X_0)$ 和 $f(X_1),$ 如果 $f(X_1) > f(X_0),$ 则采用 2s 重新计算;否则继续下一步;

(3) 更新迭代次数 t=t+1;

(4) 根据公式(6),由前两估计值 X_{t-1} 和 X_{t-2} 评估 X_t ;

(5) 计算 X_i 的目标函数 $f(X_i)$,并且比较 $f(X_i)$ 和 $f(X_{i-1})$;如果 $f(X_i) > f(X_{i-1})$,更新 $X_0 = X_{i-1}$ 并返回步 骤(2);否则继续下一步;

(6) 计算终止函数 $C(X_t, X_{t-1}) = |f(X_t) - f(X_{t-1})| / f(X_t);$ 如果 $C(X_t, X_{t-1}) > \varepsilon$,则更新迭代次数 t = t+1 且返回 步骤(4);否则停止迭代。

2 显微同轴全息压缩传感再现实验

2.1 点源放大记录系统的实验分析

点源放大全息记录系统如图2所示,由激光光 源、空间滤波器、孔径光阑和显微物镜等形成一个 点光源照射被测物体,放大后由 CCD 记录同轴全 息图。激光器的波长为 632.8 nm; CCD 像素数为 960 pixel×960 pixel、像素尺寸为 4.65 µm×4.65 µm; 点光源与记录平面的距离约 33 mm; 被测样本是前 后表面分别刻有相同的字母C且这两图像沿光轴方 向是部分重叠的光学元件,元件厚约1.5 mm;待测 样本与记录平面的距离大约为10 mm。





Tested object

图 2 点源放大全息记录系统与被测物体 Fig.2 Point source amplification holographic recording system and tested object

图 3(a)是所采集的全息图,采用指数分布变密 度减采样模式(图 3(b)),对全息图傅里叶频谱进行 减采样处理。参考文献[44]中压缩全息重建实验中 采用 25%的采样率已获得较好的重建质量,而随着 采样率的增大,压缩传感重建质量具有一定的上升 趋势,因此文中为寻求测试实验较好的重建效果,采 取 50%的采样率实现频域数据的减采样。然后依据 上述压缩传感重建步骤对频域减采样全息图进行 重建。图4所示为点源放大同轴全息图重建结果。 图中分别是反衍射重建以及压缩传感重建结果,并 画出了第一层图像的直方图和中间一行的横截线 上的分布,图4(a)为反衍射重建结果,图4(b)为第 一层图像的直方图,图4(c)为第一层图像一横截线 归一化分布,图4(d)为压缩传感层析重建结果,图4(e) 为第一层图像的直方图,图4(f)第一层图像一横截 线归一化分布。从重建图像、图像直方图和横截线 图对比可知,压缩传感重建中两幅图像C较清晰地 分离,表明点源放大全息压缩传感重建具有比传统 反衍射重建更好的重建质量,能够较好的消除离焦 噪声。



图 3 (a)点源放大全息图:(b)指数分布减采样模式 Fig.3 (a) Point source magnified hologram; (b) Exponential distribution downsampling mode





图 4 点源放大同轴全息图重建结果

Fig.4 Reconstruction results of point-source magnified in-line hologram

2.2 显微物镜放大记录系统的实验分析

显微物镜放大全息记录系统如图 5(a)所示,光 源照射待测样本,再由显微物镜放大并通过 CCD 记 录同轴全息图。激光器的波长为 632.8 nm;CCD 像 素数为 960 pixel×960 pixel、像素尺寸为 4.65 µm× 4.65 µm。显微物镜的焦距 *f*=10 mm。两层样本的间 距为 1.5 mm。

文中实验中,样本距显微物镜的距离大约为 15 mm,位于显微物镜1倍焦距之外,即经显微物镜 后成实像,横向放大2倍左右,相当于点光源距离样 本为30 mm,记录平面距离点光源的距离为40 mm、 离像面10 mm,所以总的横向放大倍率约为2.7倍,样 本像的层间距扩展为约6 mm。图5(b)为所记录的同 轴全息图。同样采用指数分布变密度减采样模式对全 息图的傅里叶频谱进行减采样处理,采样率为50%。 图6所示为显微物镜放大同轴全息图重建。图中分









Fig.6 Reconstruction results of microscope objective magnified in-line hologram

别是被测物体通过反衍射重建以及压缩传感重建在 对应位置的重建结果,并画出了第一层图像的直方 图分布。从重建图像、图像直方图和横截线图对比可 知,压缩传感重建中两幅图像方框较清晰地分离,表 明显微物镜放大全息压缩传感重建具有比传统发衍 射重建更好的质量,能够很好的消除离焦噪声。

3 结 论

显微物镜放大方式本质上也是点源放大方式, 只是前者像方点源照射的是物体像方成像,CCD 记录的此像衍射所形成的全息图,两者的同轴全息压 缩传感重建算法是一致的。因此显微放大方式的两种 记录系统——点源放大全息记录以及显微物镜放大 全息记录所获得的全息图都能通过压缩传感实现物 体的层析重建。从显微全息压缩传感重建实验可以看 出,点源放大压缩全息层析重建以及显微物镜放大压 缩全息层析重建都具有比传统反向衍射传播获得更 高的重建质量,突显了压缩传感重建的优势和能力。

参考文献:

- David J B, Choi K, Daniel L M, et al. Compressive holography [J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 13040-13049.
- [2] Marks D L, Brady D J, Choi K, et al. Experimental demonstrations of compressive holography [C]// Computational Optical Sensing & Imaging, 2009: CThA6.
- [3] Choi K, Horisaki R, Hahn J, et al. Compressive holography of diffuse objects [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(34): 1-10.
- [4] Lim S, Marks D L, Brady D J. Sampling and processing for compressive holography [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(34):75-86.
- [5] Hahn J, Lim S, Choi K, et al. Compressive holographic microscopy [C]// Biomedical Optics, 2010:JMA1.
- [6] Hahn J, Lim S, Choi K, et al. Video-rate compressive holographic microscopic tomography [J]. Optics Express, 2011, 19(8):72-89.
- [7] Fernandezcull C, Brady D, Wikner D A, et al. Sparse Fourier sampling in millimeter -wave compressive holography [J]. *Digital Holography and Three – Dimensional Imaging*, 2010, 49(19): 14–19.

- [8] Cull C F, Wikner D A, Mait J N, et al. Millimeter-wave compressive holography [J]. *Applied Optics*, 2010, 49 (19): 67-82.
- [9] Rivenson Y, Stern A. Compressive sensing techniques in holography[C]// Workshop on Information Optics, 2011: 1-2.
- [10] Rivenson Y, Stern A, Rosen J. Reconstruction guarantees for compressive tomographic holography [J].
 Optics Letters, 2013, 38(14): 2509-2511.
- [11] Rivenson Y, Stern A, Javidi B. Overview of compressive sensing techniques applied in holography
 [J]. Applied Optics, 2013, 52(1): 423-432.
- [12] Rivenson Y, Stern A. What is the reconstruction range for compressive fresnel holography [C]//Computational Optical Sensing & Imaging, 2011: CWB6.
- [13] Rivenson Y, Rot A, Balber S, et al. Compressive fresnel holography for object reconstruction through an occluding plane [C]//Digital Holography & Three – dimensional Imaging, 2012: DW4C7.
- [14] Rivenson Y, Stern A, Rosen J. Compressive multiple view projection incoherent holography [J]. Optics Express, 2011, 19(7): 6109-6118.
- [15] Marim M M, Angelini E, Olivo-Marin J C, et al. Offaxis compressed holographic microscopy in low-light conditions [J]. Optics Letters, 2011, 36(1):79-81.
- [16] Clemente P, Durán V, Tajahuerce E, et al. Compressive holography with a single -pixel detector [J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2524.
- [17] Weng J, Clark D C, Kim M K. Compressive sensing sectional imaging for single -shot in -line self interference incoherent holography [J]. Optics Communications, 2016, 366: 88-93.
- [18] Zhang W H, Cao L C, Brady D J, et al. Twin-imagefree holography: A compressive sensing approach [J].
 Physical Review Letter, 2018, 121(9): 093902.
- [19] Jianshe M A, Feipeng X, Ping S U. Study on compressive sensing phase-shifting digital holography
 [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(1): 130– 133.
- [20] Wu Yingchun, Wu Xuecheng, Wang Zhihua, et al. Reconstruction of digital inline hologram with compressed sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31 (11): 76-81.
- [21] Candes E J, Tao T. Decoding by linear programming

[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(12): 4203–4215.

- [22] Sun Xikang, Yu Yingjie, Wu Xiaoyan, et al. Reconstruction of multilayer samples by in-line compressive holography
 [J]. Acta Metrologica Sinica, 2017, 38(6):686-689.
- [23] Wu Xiaoyan, Bai Yuewei, Nie Li, et al. The improvement of in -line compressive holographic reconstruction quality based on the method of focusing
 [J]. Shanghai Polytechnic University, 2016, 33 (4): 320-325.
- [24] Xiao X W, Yu Y J, Zhou W J. Solving inverse problems for off-axis holography using Twist [C]//Proc of SPIE, 2013, 8769: 87690.
- [25] Weng Jiawen, Li Hai, Yang Chuping, et al. Reconstruction of off -axis fresnel hologram by compressive sensing [J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(1): 32-38. (in Chinese)
- [26] Yang Chanxia, Zhong Ting, Li Yuying, et al. The compression application research of phase-shift digital hologram image based on compressed sensing [J]. Laser Journal, 2016, 37(3): 42-45
- [27] Wan Y, Man T, Wu F, et al. Parallel phase-shifting self -interference digital holography with faithful reconstruction using compressive sensing[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 86(1): 38-43.
- [28] Clemente P, Durán V. Compressive holography with a single-pixel detector[J]. Optics Letters, 2013, 7: 14-18.
- [29] Hu Youjun, Zhou Xin, Yue Jianming, et al. Single pixel fourier hologram imaging system based on compressive sensing [J]. *Laser Journal*, 2016, 37(7): 7–10.
- [30] Weng J, Clark D C, Kim M K. Compressive sensing sectional imaging for single -shot in -line self interference incoherent holography [J]. Optics Communications, 2016, 366(1): 88-93.
- [31] Weng Jiawen, Qin Yi, Yang Chuping, et al. Reconstruction of single low-coherence digital hologram by compressive sensing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 100901. (in Chinese)
- [32] Weng Jiawen, Yang Chuping, Li Hai. Self-interference incoherent digital holography by compressive sensing
 [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0209001.

- [33] Zhang Cheng, Shen Chuan, Cheng Hong, et al. Compressed reconstruction of color holography[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(2): 419-427.
- [34] Fan W, Wan Y H, Man T L, et al. Compressive holographic imaging by self -interference digital holography [J]. *Digital Holography and 3D Imaging*, 2015, 70: 22-2F5.
- [35] Sun Aqian, Zhou Dingfu, Yuan Sheng, et al. Optical scanning holography based on compressive sensing using a digital micro -mirror device [J]. Optics Communications, 2016, 385(15): 19-24.
- [36] Joonku H, Schoon L, Kerkil C, et al. Video –rate compressive holographic microscopic tomography [J]. *Optics Express*, 2011, 19(8), 7289–7298.
- [37] Logan W, Georges N, Partha P B. Digital tomographic compressive holographic reconstruction of three – dimensional objects in transmissive and reflective geometries [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(8): 1702–1710.
- [38] Li Jun, Pan Yangyang, Li Jiaosheng, et al. Compressive holographic imaging based on single in-line hologram and superconducting nanowire single -photon detector [J]. Optics Communications, 2015, 355: 326-330.
- [39] Clément R, Brenden S N, Hans J K. Tomography by point source digital holographic microscopy [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(16): 3520-3527.
- [40] Joonku H, Sehoon L, Kerkil C, et al. Holographic microscopy[J]. Optical Society of America, 2009, 17(6): 90-93.
- [41] Xiao X W, Yu Y J, Zhou W J, et al. 4f amplified inline compressive holography [J]. Optics Express, 2014, 22(17): 19860–19872.
- [42] Bioucas J M, Figueiredo M A T. A new TwIST: Twostep iterative shrinkage/thresholding algorithms for imaging restoration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16: 2992-3004.
- [43] Wang Z, Arce G R. Variable density compressed image sampling [J]. *IEEE Trans Image Process*, 2010, 19(1): 264-270.
- [44] Wu Xiaoyan. Study of digital holographic tomography based on compressive sensing [D]. Shanghai: Shanghai University, 2015. (in Chinese)