

doi:10.3788/gzxb20184704.0407001

激光反射断层成像相位恢复方法

杨彪^{1,2}, 胡以华^{1,2}, 林放^{1,2}

(1 电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

(2 电子工程学院 电子制约技术安徽省重点实验室, 合肥 230037)

摘 要:针对激光反射断层成像过程中存在目标的平动和抖动所产生的旋转中心偏移导致重建图像错位形成伪影的问题,提出基于相位恢复技术的改进误差下降算法.该方法通过光强反复迭代得到相位分布,获得重构目标丢失的相位信息,通过增加初始约束条件以及空间域和频域的限制有效改善算法的收敛性.运用改进的误差下降算法,有效改善了相位恢复方法容易陷入局部极小解的问题,获得了优化的重构图像.仿真实验表明,三组投影数据重建图像的平均相对均方误差由 0.774 下降为 0.551,能够有效消除图像重建伪影.外场实验结果表明此方法使激光反射断层成像系统分辨率得到有效改善.

关键词:成像系统;反射层析;相位恢复;误差下降法;成像分辨率

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)04-0407001-7

Research of Phase Retrieval Method in Laser Reflective Tomography Imaging

YANG Biao^{1,2}, HU Yi-hua^{1,2}, LIN Fang^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

(2 Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: The moving and jitter of the target will lead to the rotation of the center of rotation in the process of laser reflection tomography. This will lead to reconstruction image dislocation and artifact, a modified error reduction algorithm based on phase recovery technology was proposed. Firstly, the phase information of reconstructed target was obtained through iterative iteration of light intensity. In addition, the convergence of algorithm was also effectively improved by increasing the initial constraints and the constraints in the spatial and frequency domains. This method can effectively improve the easy to fall into the local minima problem and phase recovery method for image reconstruction optimization is obtained. The simulation experiments show that the mean square error of the three sets of reconstructed images is reduced from 0.774 to 0.551, and the image reconstruction artifact can be effectively eliminated. The experimental results also show that the resolution of the laser reflective tomography system is improved.

Key words: Imaging system; Reflective tomography; Phase retrieval; Error reduction method; imaging resolution

OCIS Codes: 070.1170; 070.2580; 280.3640; 100.3010; 100.5070

0 引言

激光反射断层成像(Laser Reflective Tomography, LRT)是近年来发展起来的一种新型激光成像方式.

基金项目:国家自然科学基金(No.61271353)资助

第一作者:杨彪(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为激光反射断层成像.Email:yangbiao135@163.com

导师(通讯作者):胡以华(1962—),男,教授,博士,主要研究方向为光电信息处理.Email:skl_hyh@163.com

收稿日期:2017-10-23;录用日期:2018-01-03

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

传统光学镜头由于存在衍射极限因此不适用于远距离目标成像,而激光成像雷达则能克服分辨率的困难,且受外界环境影响较小^[1].1988年,MIT 林肯实验室的 Parker, Knight 等率先在计算机断层成像(Computed Tomography, CT)中引入激光反射层析,并进行了实验验证^[2-3],美国空军实验室的 Matson 等研究了 LRT 的理论和应用^[4-5].中科院上海光机研究所和胡以华课题组也在特征点跟踪、二维成像、图像配准、脉冲压缩解卷积^[6]等方面进行了实验研究^[7-8].

相位恢复方法由 Gherberg 等^[9]首先提出,该方法从傅里叶数据恢复一个一维的波函数,在频域与空域间进行快速傅里叶变换及逆变换,根据已知的衍射强度分布与目标振幅分布函数,逐步迭代恢复目标相位信息. Gherberg-Saxton (GS) 算法是最基本的相位恢复迭代算法^[9-10],杨-顾算法^[11]、混合输入输出算法(HIO)、随机二元振幅调制恢复算法^[12]、加速角谱迭代算法^[13]等是在此基础上的改进算法.Stephen^[14]首次将相位恢复算法应用到基于距离分辨的反射层析投影图配准中,但其研究的是透射而非反射问题,获取的是吸收衰减信号而不是反射信号.周德力^[15]等运用特征点跟踪算法提出了一种非合目标的激光反射层析投影配准方法^[16].但在实际探测过程中,非合目标上很难找到具有明显峰值或波谷的特征靶点.由于单个投影距离上的延迟只会引起傅里叶域的线性相位变化,而不影响其傅里叶域模值分布,因此,本文提出根据图像频域模值进行图像相位恢复的方法,并针对实际运算中,GS 算法收敛速度慢、恢复精度差的问题,结合改进的误差下降(Error Reduction, ER)算法^[17]利用前后两次迭代信息使算法具有更好的恢复效果和收敛速度.

1 激光反射断层成像原理

LRT 的基本重建算法是滤波反投影(Filtered Back-projection, FBP)算法,其数学原理是傅里叶切片定理.如图 1(a)所示,平行激光光束照射一个二维目标,照射角度记为 ϕ ,目标在角度 ϕ 的投影定义为

$$p(r, \phi) = \int_{L_{r, \phi}} f(x, y) ds \quad (1)$$

式中积分路径 $L_{r, \phi}$ 是垂直于光照方向的直线, $r = x \cos \phi + y \sin \phi$, $f(x, y)$ 是目标的反射系数分布.图 1(b) 是一个角度投影图,平行箭头展开区域为激光照射区域,投影的距离范围取决于被激光照射区域的距离范围.需要注意的是,由于激光无法穿透目标,所以实际上反射系数只在表面不为零,即

$$f(x, y) = 0 \quad (x, y) \notin D \quad (2)$$

式中 D 是目标表面点集.因此实际上的投影可表示为

$$p(r, \phi) = \int_{L_{r, \phi} \cap D} f(x, y) ds \quad (3)$$

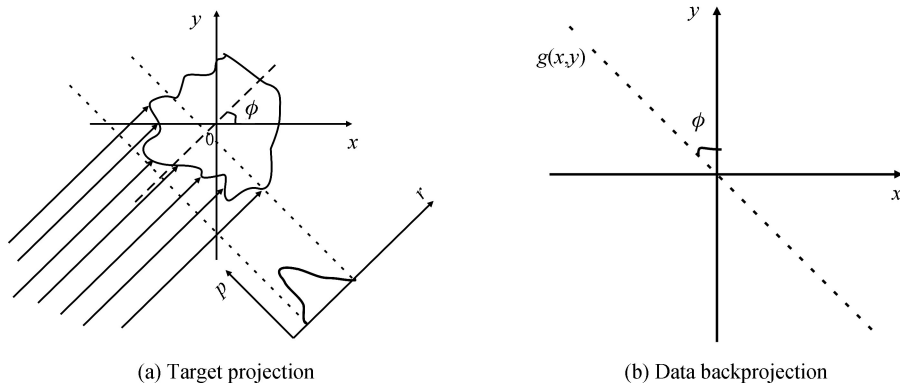


图 1 激光反射断层成像投影
Fig.1 Schematic of LRT

把各个角度的投影按角度 ϕ 反涂并叠加称为直接反投影,但会产生伪影,影响图像分辨,因此通常使用滤波反投影算法,重建的目标反射系数分布图像表示为

$$g_{FB}(x, y) = \sum_{i=1}^m F^{-1}[|\omega| F_1[p(r, \phi)]] \quad (4)$$

式中, m 是投影数量, F_1 、 F^{-1} 分别代表一维傅里叶变换和傅里叶逆变换算符, $|\omega|$ 是由直角坐标系转到极

坐标系产生的雅可比因子,实际上起到了斜坡滤波器的效果.考虑到理想的斜坡滤波器并不存在,因此一些改进的滤波器也常被使用.

2 相位恢复算法原理及流程

为了获取靶标整周期的投影回波信息,靶标和激光器之间要存在相对转动,而实际星载平台或者实验平台在旋转取投影时,引入的随机运动或抖动会导致投影回波不能对准在同一直线上,导致不同角度投影的旋转中心位置难以确定,未对准的投影数据进行直接成像结果会发生错位和几何畸变,难以对目标识别.因此反投影处理前,必须从每个投影中提取目标的旋转中心.相位恢复算法基于单个投影距离上的延迟只会引入在傅里叶域的线性相位变化,而不影响其傅里叶域模值分布的理论,根据图像频域模值进行图像相位恢复.由于GS算法存在收敛速度缓慢,算法实现条件单一等问题,本文在GS算法基础上,用改进后的误差下降(Error reduction,ER)算法^[18]作为激光反射断层成像相位恢复的基础(见图2).

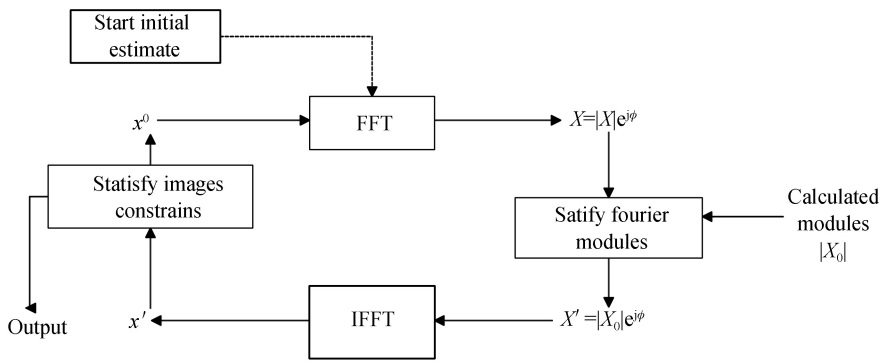


图2 ER算法原理

Fig.2 ER algorithm Flowchart

该算法由一个初始猜测开始,按照四步进行迭代

$$X_k(u, v) = |X_k(u, v)| \exp(j\varphi_k(u, v)) = \text{DFT}[x_k(m, n)] \quad (5)$$

$$X'_k(u, v) = |X_0(u, v)| \exp(j\varphi_k(u, v)) \quad (6)$$

$$x'_k(m, n) = \text{IDFT}[X'_k(u, v)] \quad (7)$$

$$x_{k+1} = \begin{cases} x'_k(m, n) & (m, n) \notin \gamma \\ 0 & (m, n) \in \gamma \end{cases} \quad (8)$$

式中, γ 表示 $x'_k(m, n)$ 不满足目标域(空间域)限制的那些点的集合.迭代过程中包括有空间域限制和频域限制.空间域限制主要是正性限制和支持域限制,而频域限制主要是用给定的傅里叶变换幅度替换计算产生的傅里叶变换幅度.

3 仿真实验与分析

用仿真实验对三种典型形状的目标进行滤波反射投影重建图像的相位恢复重构验证.图3(a)是目标不存在振荡运动的理想情况下收集到的投影数据.将激光反射断层成像的滤波反投影方法应用于投影数据可以重构出目标的理想二维轮廓图像.

在实际数据收集过程中,假设在距离分辨的相邻视图中激光脉冲入射的方向存在近似振荡运动.为了模拟实际投影过程中由于实际目标的振动而导致目标偏离旋转中心的情况,将模拟位移认为是许多低频的组合.目标偏离旋转中心的投影数据可以通过从标准投影数据移动一定距离得到,用Matlab自带的rand函数生成一个1~15的随机数组,并将其作为投影偏离标准投影的像素点距离,如图3(b)所示.

根据维纳-辛钦定理可知宽平稳随机过程的功率谱密度是其自相关函数的傅里叶变换,对探测目标估计的傅里叶域模值矩阵 $|X_0(u, v)|$ 的频谱强度 $|X_0(u, v)|^2$ 进行傅里叶逆变换,得到探测目标的自相关矩阵为

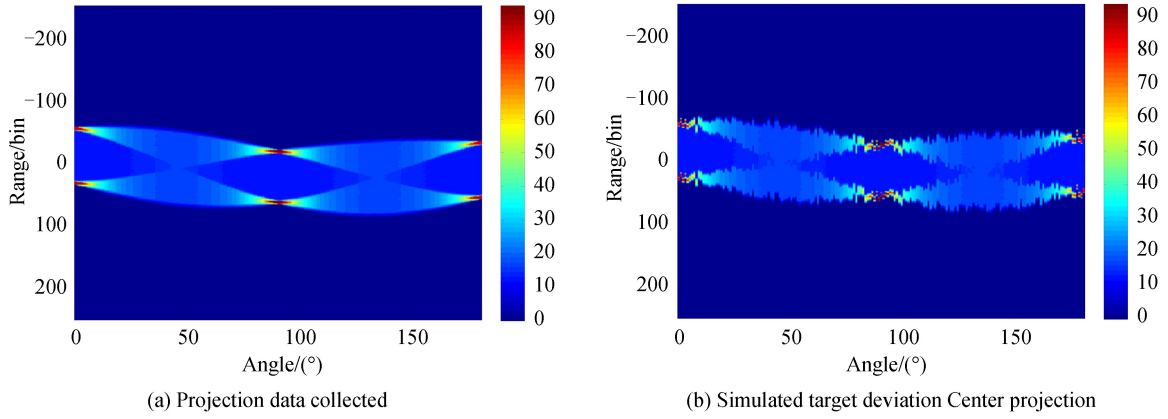


图3 不同角度收集的投影数据
Fig.3 Projection data collected from different angles

$$x(m, n) \otimes x(m, n) = F_2^{-1} [|X_0(u, v)|^2] \quad (9)$$

根据自相关函数矩阵的分布范围,即包含所有非零元素值的最小矩形范围,确定所需探测目标迭代矩阵的范围 γ . 式中 \otimes 表示相关操作, F_2^{-1} 表示二维逆傅里叶算子. 另一个对象空间域的约束可以通过定义 $x(m, n)$ 为非负实数这一探测目标本身固有的限制条件来实现.

将目标偏离旋转中心的数据进行滤波反投影重构后用 0.45 的门限阈值处理得到的目标图像见图 4, 目标退化处理后的图像可以作为原始猜想, 其可以当做相位恢复算法的初始迭代条件, 经过阈值处理后的图像在对象域上起初始约束作用.

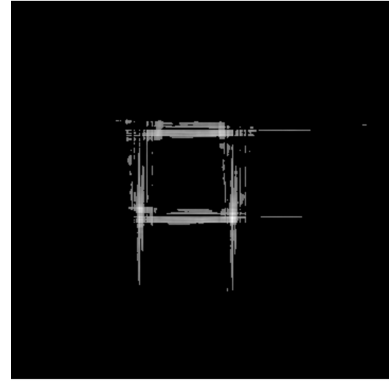


图4 阈值处理后图像
Fig.4 Image after threshold processing

为了定量表示重建图像和原始图像之间的差异, 相位恢复精度可用相对均方根误差 (Error of Relative Mean Square Root, ERMS) 来评估

$$ERMS = \left[\frac{\sum \sum |x_{est}(m, n)|^2}{\sum \sum |x_{true}(m, n)|^2} \right]^{1/2} \quad (10)$$

式中 $|x_{true}(m, n)|$ 为相应某个像元 (m, n) 的实际幅值, 其对应位置具体数值可以从图 5 目标原图中得到, $|x_{est}(m, n)|$ 为使用相位恢复算法得到的同一个位置处像元 (m, n) 的重构后的幅值.

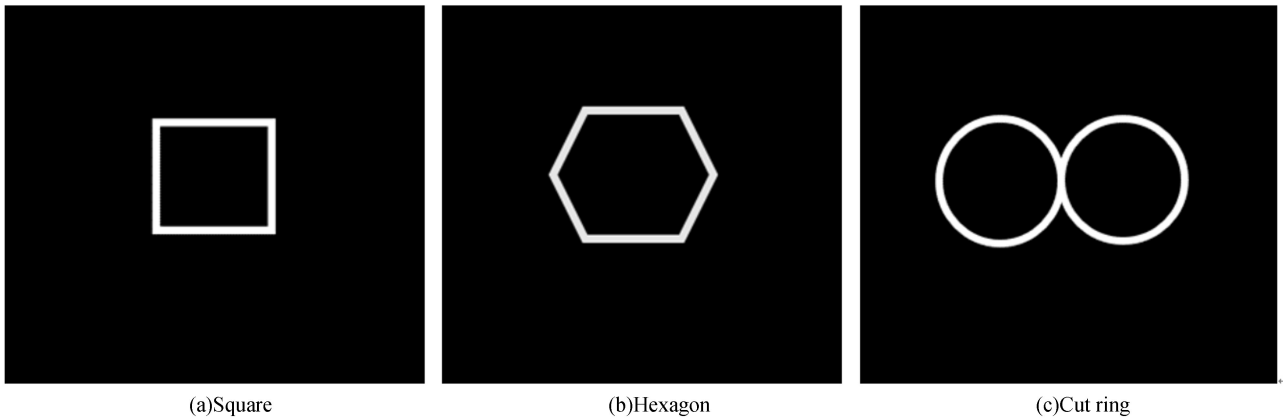


图5 方形、六边形、外切圆环目标原图
Fig.5 Square, hexagon, cut ring target original image

由表 1 中的相对均方根误差评估数据可知, 相位恢复得到的重构图像误差精度比滤波反投影重构得到

的结果明显提高.当将阈值处理后的退化图像作为初始猜想时,可以获得目标稳定的图像恢复结果,如图 6 (a)所示;与单一的投影重构图像 $ERMS=0.777\ 1$ 相比,单相位恢复后图像的目标轮廓已经十分清晰,如图 6 (d)所示,而且 $ERMS=0.550\ 9$ 的数值也反映了其恢复效果.因此,在图像重构过程中由于对目标的多次迭代以及不断进行正性和支持域限制,改进的相位恢复算法虽然导致图像亮度不断变小,但是从所得到的图像可以看出,相比较滤波反投影重构而言,该方法减少了重建过程中伪影的影响,目标整体强度虽然降低但是目标轮廓更加清晰.仿真实验采用四边形、六边形和外切圆环形状,六边形和外切圆环的恢复结果也表明,与单纯阈值处理等传统图像处理方法相比,该方法在图像恢复过程中能够得到更好的目标轮廓图像.

表 1 反投影重构和相位恢复误差数值

Table 1 Inverse projection reconstruction and phase retrieval error values

ERMS	Back projection reconstruction	Phase retrieval
Square	0.771	0.550 9
Hexagon	0.781 1	0.556
Cut ring	0.769	0.563 4

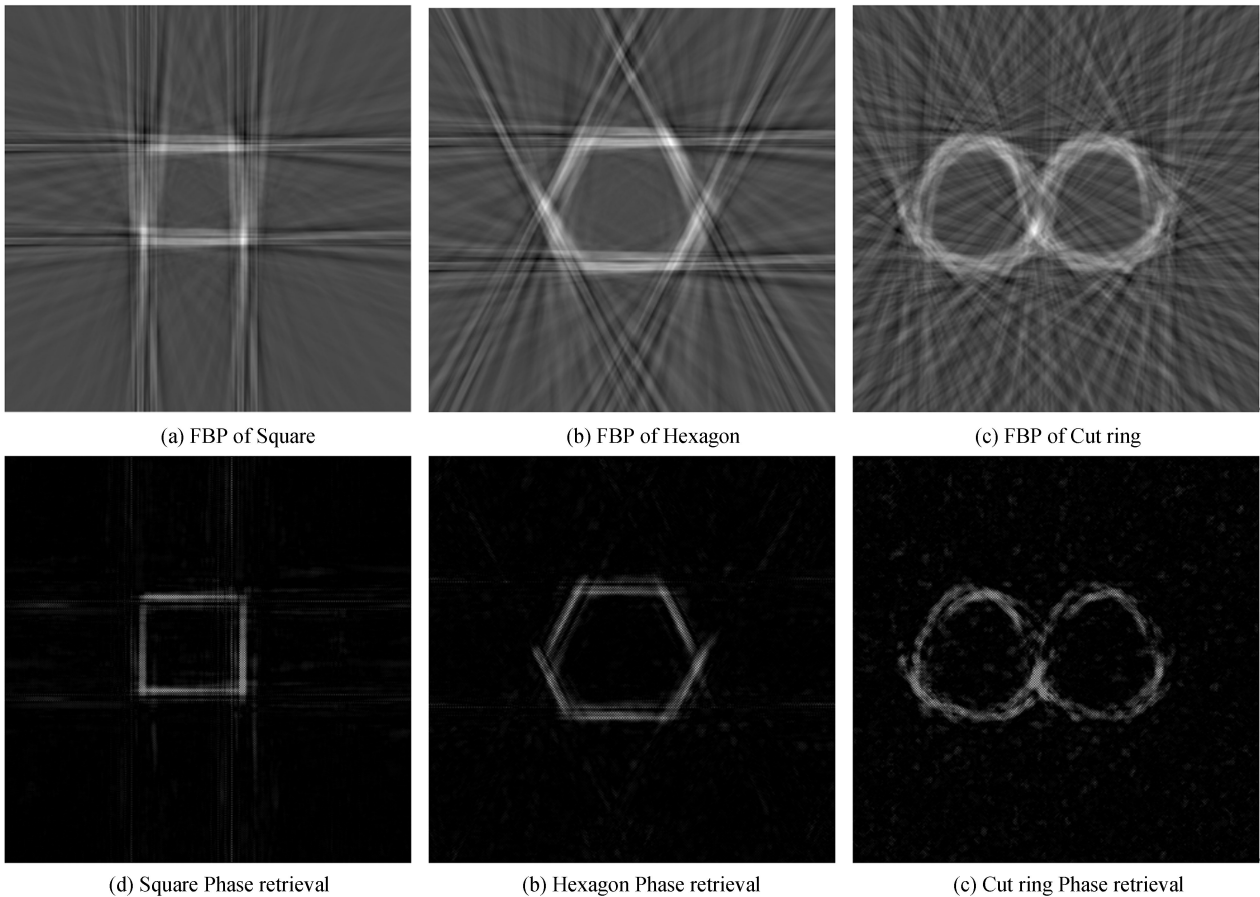


图 6 方形、六边形、外切圆环不同方法处理效果对比

Fig.6 Different methods for treatment of square, hexagonal and circumscribed rings

4 激光雷达实验结果及讨论

实验采用的激光反射断层成像系统如图 7 所示,系统采用 532 nm 波长的调 Q 激光器,脉冲调制样式为高斯脉冲,脉冲宽度为 6.5 ns.发射光束经过一个可调节的衰减片后,经扩束镜扩束后指向目标.接受镜头采用工业标准 C 型口光圈可变焦的光学镜头,后面接 Si-APD 探测器,响应带宽为 400~1 100 nm,光敏面为 0.04 mm²,截止频率达 3 GHz,可响应脉宽 1 ns 的信号;系统本身是非相干探测体制且目标对激光产生漫反射,所以光路并未设计为收发同轴模式.

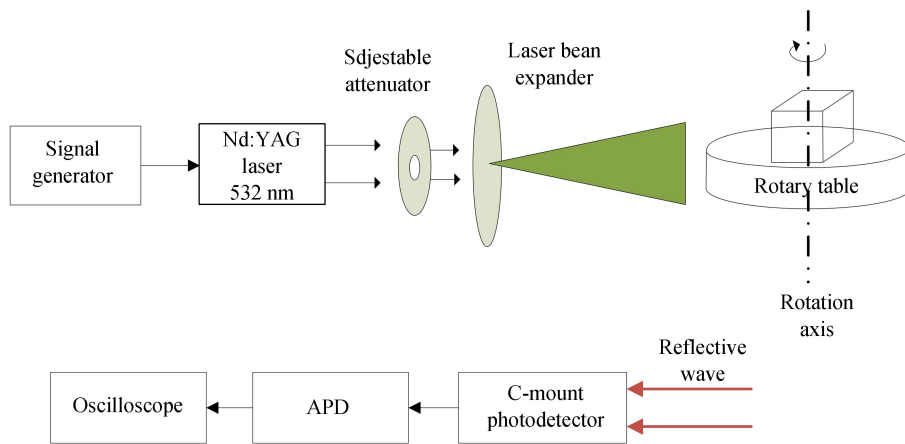


图 7 激光反射断层实验

Fig.7 Schematic diagram of Laser reflective fault experiment system

实验一为内场实验,目标是一个长 54 cm、宽 30 cm 的长方体模型,放置于电动转台上,设置步进角度为 2° ,进行 360° 全角度探测,共收集了 180 组投影回波.探测距离 2.38 m,回波采样率设为 25 GHz.实验二为外场实验,目标为一个高 1.0 m、底边长为 0.8 m、1.0 m、1.0 m 的三棱柱模型,设置步进角度为 1° ,进行 360° 全角度探测,共收集了 360 组投影回波,探测距离 39.7 m.回波配准后作标准的滤波反投影处理,滤波算子采用 R-L 滤波器,反投影重建图像和相位恢复算法处理后的图像如图 8 所示.

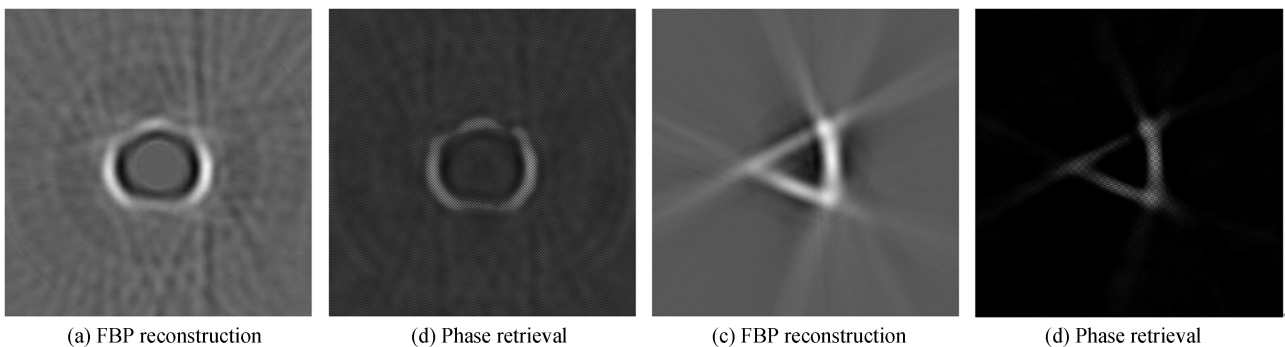


图 8 相位恢复效果示意

Fig.8 Phase retrieval effect schematic

图 8(a)、(c)为采用滤波反投影后所得的图像,图 8(b)、(d)为在滤波反投影的基础之上进行相位恢复算法所得到的图像,由两幅图像对比能够看出在去除伪影方面得到了一定的效果.相位恢复算法重构图像的时间与算法的迭代次数成正比,实验中迭代 100 次,消耗时间约为 210 s 左右.在运用实验数据重构目标轮廓时,为了更好地重建图像,可以在相位恢复过程中改变对象的支持约束.首先,在前几个迭代中,将阈值处理门限设置为较小的退化图像频域模值,并将其作为迭代的支持限制,以约束对象;这有助于在迭代次数较少的情况下迫使图像的大部分能量进入受限区域.之后,将阈值处理门限设置为较大的退化图像频域模值,并将其作为迭代的支持限制;对于以后的迭代,应使用更大的支持约束,以确保目标重构的图像部分没有被约束截断,生成不完整的目标轮廓像.虽然重建图像中仍然存在伪影影响,但能够清晰地识别各目标的总体轮廓形状,图像重建结果与真实目标轮廓近似一致.

5 结论

本文给出了激光反射断层成像的基本原理,提出了一种基于相位恢复技术的误差下降算法用于解决激光反射断层成像过程中的投影配准问题,通过在光强迭代过程中增加频域和时域的约束,有效解决了图像重构伪影,使目标边界轮廓更加清晰.由于只利用获取的目标光强信息,相比于传统的特征点跟踪算法该方法具有更好的实用性.实验结果表明,在增加了相位恢复算法后与单一进行滤波反投影算法进行目标轮廓重构

相比,重建图像平均相对均方误差由 0.774 降为 0.551,重建图像的分辨率得到明显提高.在目标为一个理想漫反射目标时该方法较为理想,如何在目标表面特性是漫反射和镜面反射结合情况下取得较好结果是下一步需要研究的内容.

参考文献

- [1] JIN Xiao-feng, ZHANG Peng, LIU Chun-hua, *et al.* Techniques on long-range and high-resolution imaging lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, **50**(7): 050002.
金晓峰,张鹏,刘春华,等.远距离高分辨激光成像雷达技术[J].激光与光电子学进展,2013, **50**(7): 050002.
- [2] PARKER J K, CRAIG E B, KLICK D I, *et al.* Reflective tomography: images from range-resolved laser radar measurements[J]. *Applied Optics*, 1988, **23**(13): 2642-2643.
- [3] KNIGHT F K, KLICK D, RYAN-HOWARD D P, *et al.* Laser radar reflective tomography utilizing a streak camera for precise range resolution[J]. *Applied Optics*, 1989, **28**(12): 2196.
- [4] MATSON C L, MAGEE E P, STONE D. Reflective tomography for space object imaging using a short-pulselength laser [C]. SPIE, 1994, **2302**: 73-82.
- [5] MATSON C L. Deconvolution-based spatial resolution in optical diffusion tomography[J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(5): 5791-5801.
- [6] LIN Fang, HU Yi-hua, WANG Jin-cheng, *et al.* Application of multi-frame iterative blind deconvolution method in laser reflective tomography imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(9): 136-145.
林放,胡以华,王金诚,等.多帧迭代盲解卷积在激光反射断层成像的应用[J].光学学报,2017, **37**(9): 136-145.
- [7] JIN Xiao-feng, YAN Yi, WU Ya-peng, *et al.* Angle-doppler resolved reflective tomography laser imaging radar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 244-240.
金晓峰,严毅,孙建锋,等.基于角度-多普勒分辨的反射层析激光成像雷达研究[J].光学学报,2012, **32**(8): 244-250.
- [8] GU Yu, HU Yi-hua, HAO Shi-qi, *et al.* Application of variational bayesian deconvolution method in laser reflective tomography imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(6): 116-122.
谷雨,胡以华,郝士琦,等.变分贝叶斯解卷积法在激光反射层析成像中的应用[J].光学学报,2016, **36**(6): 116-122.
- [9] GEREHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, **35**(2): 237-246.
- [10] 郭俊虎.相干光光强恢复相位的方法研究[D].武汉:华中科技大学, **2011**: 34-40.
- [11] YANG G Z, GU B Y, DONG B Z. Theory of the amplitude-phase retrieval in an any linear transform system and its application[J]. *Internatioanal Journal of Modern Physics B*, 1993, **7**(18): 3153.
- [12] XU Ning-han, TAN Qiao-feng, JIN Guo-fan. Reconstruction of complex wave-front by random binary phase modulation[J].*Chinese Journal of Laser*, 2010, **37**(7): 1800-1806.
徐宁汉,谭峭峰,金国藩.利用随机二元纯相位调制重构复杂光场波前[J].中国激光,2010, **37**(7): 1800-1806.
- [13] HUANG Li-xin, YAO Xin, CAI Dongmei, *et al.* A high accuracy and fast iterative algorithm for phase retrieval[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2010, **37**(5): 1218-1221.
黄利新,姚新,蔡冬梅,等.一种快速高精度的相位恢复迭代[J].中国激光,2010, **37**(5): 1218-1221.
- [14] STEPHEN D F, MATSON C L. Projection registration in reflective tomography[C]. SPIE, 1999, **2580**:188-192..
- [15] 周德力.星载激光反射层析成像关键技术研究[D].上海,中国科学院上海技术物理研究所, **2014**:78-83.
- [16] ZHOU De-li, HUANG Geng-hua, SHI Liang, *et al.* . Unconformity method of laser reflection tomography projection registration[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, **14**(21): 104-112.
周德力,黄庚华,石亮等.非合目标的激光反射层析投影配准方法[J].科学技术与工程,2014, **14**(21): 104-112.
- [17] GERCHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, **35**(2): 237-246.
- [18] SHECHTMAN Y, YONINA C E, COHEN O, *et al.* Phase retrieval with application to optical imaging[J]. *IEEE Singal Processing Magazine*, 2015, **32**(5): 88-109.