

## 激光反射层析成像相位恢复算法研究

赵楠翔<sup>1,2</sup>, 胡以华<sup>1,2</sup>

- (1. 国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;
2. 国防科技大学 电子制约技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037)

**摘要:** 针对激光反射层析成像中目标随机抖动与径向运动造成的投影中心失配问题, 提出采用相位恢复算法对重构图像进行相位恢复重建, 通过反复光强迭代消除目标随机运动造成的相位误差, 达到减少重构误差、恢复目标图像的目的。为改进 G-S 算法收敛速度与恢复精度, 提出频域模值加权方法进行投影数据相位迭代恢复, 仿真实验表明, 将算法收敛速度与收敛精度提高了 1.2 倍以上。通过对三组仿真实验处理, 重构图像的平均相对均方误差由 2.487 5 下降到 0.792 7, 有效地恢复了目标图像轮廓。外场实验表明, 该算法能够有效消除重构图像伪迹, 改善激光反射层析成像系统成像质量。

**关键词:** 激光成像; 反射层析; 相位恢复; 成像质量

**中图分类号:** TN249   **文献标志码:** A   **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1005005

## Research of phase retrieval algorithm in laser reflective tomography imaging

Zhao Nanxiang<sup>1,2</sup>, Hu Yihua<sup>1,2</sup>

- (1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;
2. Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The random moving and jitter of the target rotation center will lead to the projection center mismatch in the process of laser reflection tomography. The phase retrieval algorithm was employed to reconstruct the fault image. The phase errors caused by random motion by repeated intensity iteration was eliminated to reduce reconstruction error and restore target image. Aiming at the slow convergence speed and poor accuracy of G-S algorithm, the modulus weighting algorithm was provided to restore projection data. The simulation experiments show that the convergence speed and convergence accuracy of the algorithm are increased by more than 1.2 times. The mean square error of the three sets of reconstructed images in the simulation experiments is reduced from 2.487 5 to 0.792 7. The target image contour also be sharper by the method. The field experiments show that the image reconstruction artifact can be effectively eliminated and the imaging quality of the laser reflective tomography system is improved.

**Key words:** laser imaging; reflective tomography; phase retrieval; imaging quality

收稿日期: 2019-05-11; 修订日期: 2019-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(61871389)

作者简介: 赵楠翔(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光成像、空间光电信息处理方面的研究。Email: southfly@163.com

## 0 引言

激光反射层析成像(Laser Reflective Tomography, LRT)是一种新型的激光成像方法,其概念最早由 D. Munson 提出<sup>[1]</sup>。区别于传统的光学透镜成像方法和扫描成像方法,该方法只需单个探测器对目标进行多角度探测,获取与目标结构有关的时间流回波信号积分,通过重构方法获得目标二维图像,具有成像空间分辨率与作用距离无关的优势,且受外界环境影响较小,在空间目标探测等领域具有特有优势。2001 年,美国空军研究所利用地基激光雷达对在轨卫星 LACE 进行了激光反射层析成像实验,实现了 0.2 m 的成像分辨率<sup>[2-3]</sup>。中国科学院上海光学精密机械研究所、国防科技大学胡以华课题组等也在激光反射层析图像重构、特征点匹配跟踪、回波解卷积、滤波反投影等方面开展了研究<sup>[4-8]</sup>。

由于非合作目标与激光成像系统之间存在相对运动、平台随机振动等情况,造成各角度目标回波数据与投影中心之间存在相对位移,造成反投影重建精度下降。因此必须针对投影中心配准进行数据恢复处理。

周德力等提出通过特征点跟踪方法进行投影中心配准<sup>[9]</sup>。对于目标表面不存在明显结构或反射率差异情况,难以有效找出明显回波峰值或谷值特征点进行跟踪匹配。由于某角度上目标距离变化造成的回波时间改变只会引起投影数据的频域相位变化,不影响频域模值,因此可通过相位恢复方法对回波投影数据进行处理,提高重构精度。Gerchberg 和 Saxton 最早提出 G-S 相位恢复算法<sup>[10]</sup>,通过已知衍射强度分布与目标振幅分布函数,在频域和空间进行反复傅里叶正逆变换,逐步恢复目标的相位信息。再此基础上,顾-杨算法<sup>[11]</sup>、最速下降法/混合输入-输出算法<sup>[12]</sup>、随机振幅调制算法<sup>[13]</sup>等改进算法相继被提出。

文中采用相位恢复算法对激光反射层析重构图像进行处理,针对 G-S 算法收敛速度慢、恢复精度差的问题,提出模值加权方法进行投影数据相位迭代恢复,提高了恢复效果与算法收敛速度。

## 1 激光反射层析成像原理

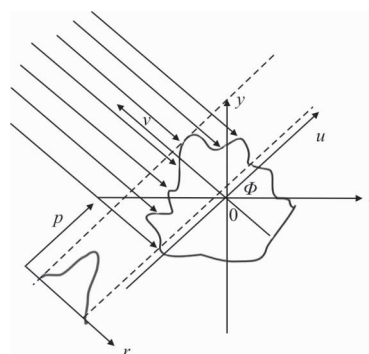
激光反射层析成像的核心是滤波反投影算法(Filtered Back-Projection,FBP),原理如图 1 所示,激光光束沿  $\phi+90^\circ$ 角照射目标,固定坐标系  $x-y$  旋转  $\phi$  角度得到旋转坐标系  $u-v$ 。目标的反射率分布用  $g(x, y)$  表示,目标回波表现为对应角度的一维反射投影:

$$p(r, \phi+90^\circ) = \int_L g(x, y) ds = \int_L g(x_r, y_r) ds = \int_L g(u \cos \phi + v \sin \phi, -u \sin \phi + v \cos \phi) ds \quad (1)$$

式中:积分路径  $L$  为与激光光束垂直的直线。

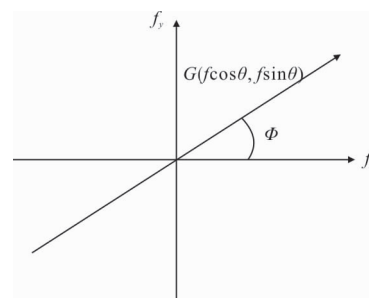
根据中心切片定理,  $p(u)$  的二维傅里叶变换  $P(f)$  为  $g(x, y)$  二维傅里叶变换在二维频谱平面上与  $f_x$  轴成  $\phi$  角的频率分量切片,如图 1(b)所示。由此可以得到  $P(f)$  为:

$$P(f) = G(f \cos \phi, f \sin \phi) = F^{-1} [p(r, \phi+90^\circ)] \quad (2)$$



(a) 时域投影

(a) Projection in time domain



(b) 频域投影

(b) Projection in frequency domain

图 1 激光反射层析投影示意图

Fig.1 Schematic of laser reflection tomography projection

根据公式(2),对投影数据进行滤波反投影则可以恢复出目标图像:

$$g(x, y) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^\infty P(f) \times \exp[i2\pi f(x\cos\phi + y\sin\phi)] |f| df d\theta \quad (3)$$

式中:  $|f|$  为坐标变换过程中产生的滤波函数。

## 2 相位恢复算法

激光反射层析成像通过成像系统与目标之间的相对转动,获取目标各角度的反射回波投影数据,通过滤波反投影恢复目标图像。但在实际情况下,目标

与成像系统之间除了相对转动外,还存在平台抖动和目标随机运动等情况,造成回波投影数据不能对准,即各次投影中心位置不配准,从而造成恢复出的目标图像质量下降。由于旋转中心相对距离的变化反映在各次回波数据上表现为时延改变,对应傅里叶变换只引起线性相位变化,不影响其傅里叶变换后的模值分布,因此可以采用相位恢复算法,利用图像的频域模值进行图像相位恢复,达到消除投影中心配准误差的目的。文中采用模值加权的相位恢复算法进行激光反射层析成像的图像复原,基本流程见图 2。

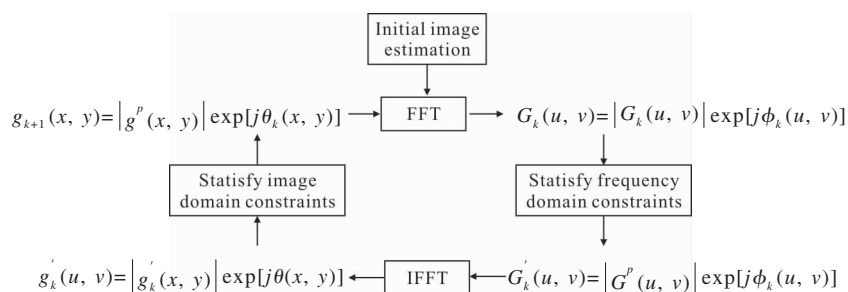


图 2 相位恢复算法流程图

Fig.2 Flow chart of phase retrieval algorithm

算法初始条件为原始的反射层析重构目标图像,按照以下四个基本步骤进行迭代:

$$G_k(u, v) = |G_k(u, v)| \exp[j\phi_k(u, v)] \quad (4)$$

$$G'_k(u, v) = |G^p(u, v)| \exp[j\phi_k(u, v)] \quad (5)$$

$$g'_k(x, y) = |g'_k(x, y)| \exp[j\theta_k(x, y)] \quad (6)$$

$$g_{k+1}(x, y) = |g^p(x, y)| \exp[j\theta_k(x, y)] \quad (7)$$

式中:  $k$  为迭代次数;  $g_k(x, y)$  为第  $k$  次循环矩阵。  $G^p(u, v)$  和  $g^p(x, y)$  分别为经过频域和空域限制后的替换矩阵。

文中  $g_0(x, y)$  为原始目标图像。频域约束条件主要为频域模值约束。采用模值加权方法,将目标原始待复原图像频域模值与本次迭代产生的模值进行混合加权,得到约束后的替换矩阵  $G^p(u, v)$ :

$$|G^p(u, v)| = \alpha |G_0(u, v)| + (1-\alpha) |G_k(u, v)| \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  为混合加权参数,用于提高迭代精度,加速算法收敛速度。当  $\alpha=1$  时,算法退化为经典 G-S 迭代。

空域约束条件主要是正性限制与支持域限制,

采用混合输入-输出法得到替换矩阵  $g^p(x, y)$ :

$$g^p(x, y) = \begin{cases} g_k(x, y) & (x, y) \in S \\ g_k(x, y) - \beta(k)g_k(x, y) & (x, y) \notin S \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\beta(k)$  为控制参数,取值范围为  $[0, 1]$ 。  $S$  为空域约束条件,对于重建图像,一般应满足正性限制,即  $|g_k(x, y)| > 0$ 。此外,还应满足支持域限制,根据原始目标图像傅里叶频谱强度  $|G_0(u, v)|^2$ ,进行傅里叶逆变换得到目标的自相关函数,取自相关函数分布范围作为支持域的限制范围。

每次循环得到的傅里叶频谱模值与目标原始待复原图像傅里叶振幅求方差,作为迭代误差的评价函数:

$$M_{se} = \frac{\sum_{u, v} [ |G_k(u, v) - G_0(u, v)| ]^2}{\sum_{u, v} |G_0(u, v)|^2} \quad (10)$$

## 3 仿真实验分析

取三种典型目标(圆形、矩形、三角形,目标原图

见图 3), 对目标情况进行激光反射层析成像仿真实验, 验证算法重构效果。在仿真中, 将激光成像系统按照  $1^\circ$  角度间隔围绕目标进行探测。为了模拟目标与成像系统相对运动造成的投影中心偏离, 在各角度仿真探测时将目标中心与成像系统距离加上区间 0~10 个像素随机抖动。

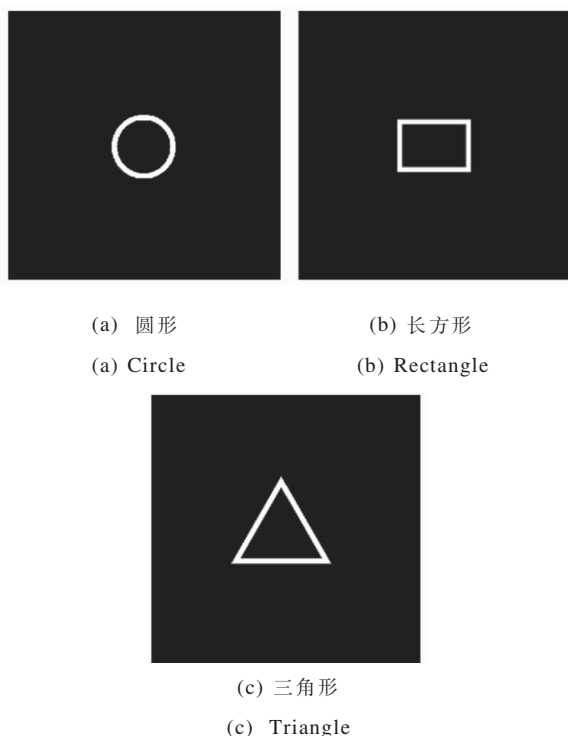


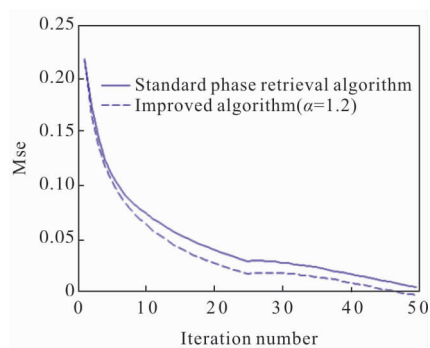
图 3 仿真目标原图

Fig.3 Original image of the simulation targets

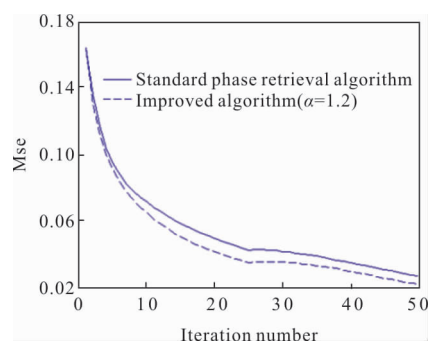
对上述仿真探测数据按照取混合加权系数  $\alpha=1.2$  进行相位重构, 迭代 50 次。迭代中, 前 25 次迭代, 采用混合输入-输出法,  $\beta(k)$  取 0.5, 后 25 次采用误差消除算法, 当  $(x, y) \notin S$  时,  $g^p(x, y)=0$ 。将迭代误差评价函数值随迭代次数变化情况与经典 G-S 比较, 如图 4 所示。

由图 4 可见, 采用混合加权法时算法迭代速度和迭代误差有了明显改善。以图 4(a) 为例, 迭代误差 Mse 下降到 0.03 时, 混合加权法和经典 G-S 算法所需迭代步数分别为 32 和 39 步。到 50 步时, 混合加权法和经典 G-S 算法迭代误差分别为 0.016 6 和 0.021 3。图 4(b) 中, 到 50 步时混合加权法和经典 G-S 算法迭代误差分别为 0.021 6 和 0.026 1; 图 4(c) 中, 到 50 步时混合加权法和经典 G-S 算法迭代误差分别为 0.029 9 和 0.037 1; 改进算法从收敛速度

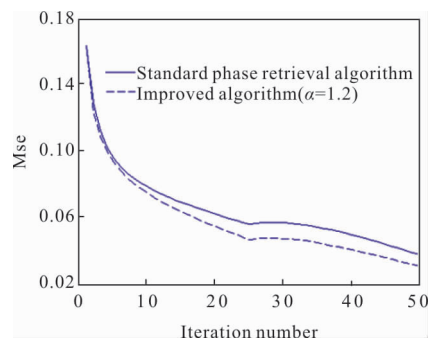
和迭代误差上都有 1.2 倍以上的改善。



(a) 圆形  
(a) Circle



(b) 长方形  
(b) Rectangle

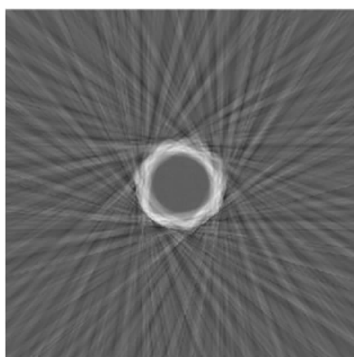


(c) 三角形  
(c) Triangle

图 4 迭代误差值随迭代次数变化曲线

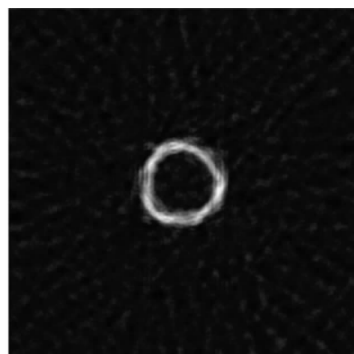
Fig.4 Iteration error vs iteration number

用上述算法对目标进行反射投影重构, 得到的相位恢复图像与未进行相位恢复的原始图像对比如图 5 所示。从图 5 可见, 未进行相位恢复前, 由于各角度数据投影中心未对准, 造成重构后的目标图像存在明显的重构误差。采用相位恢复算法后, 图像质量有了明显改善, 恢复出的目标轮廓也更加清晰。



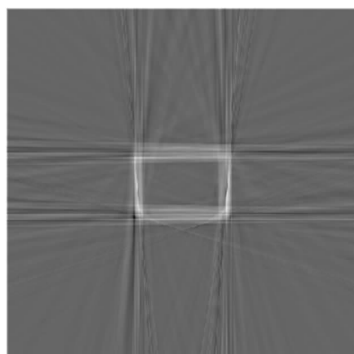
(a) 圆形目标的直接滤波反投影结果

(a) FBP of circle



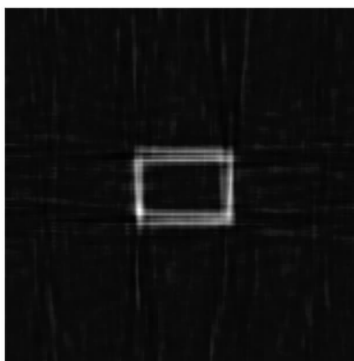
(b) 圆形目标的相位恢复重构结果

(b) Phase retrieval of circle



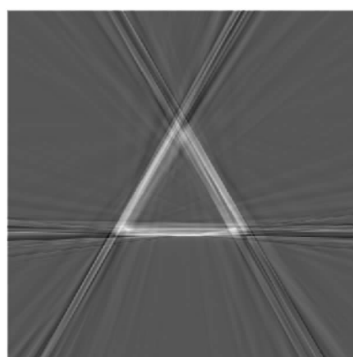
(c) 矩形目标的直接滤波反投影结果

(c) FBP of rectangle



(d) 矩形目标的相位恢复重构结果

(d) Phase retrieval of rectangle



(e) 三角形目标的直接滤波反投影结果

(e) FBP of triangle



(f) 三角形目标的相位恢复重构结果

(f) Phase retrieval of triangle

图 5 相位恢复算法重构效果对比

Fig.5 Reconstruction results of phase retrieval algorithm

为了定量表示重构后的目标图像质量，将重构图像与仿真目标原图进行比较，以相对均方误差作为重构质量评价标准，定义为：

$$ERMS = \sqrt{\frac{\sum_{x,y} [g_{true}(x,y) - g_h(x,y)]^2}{\sum_{x,y} |g_{true}(x,y)|^2}} \quad (11)$$

式中： $g_{true}(x,y)$  为仿真目标原图； $g_h(x,y)$  为恢复后的重构目标图像。

计算得到三种目标直接反投影重构图像误差和经过相位恢复后的重构误差如表 1 所示。通过相位

表 1 相位恢复前后图像重构误差

Tab.1 Image reconstruction error before and after phase restoration

ERMS	Inverse projection reconstruction	Phase retrieval
Circle	3.365 2	0.764 1
Rectangle	1.919 0	0.742 0
Triangle	2.178 3	0.871 9

恢复算法,图像重构误差有了明显下降,减少了重构过程中的伪迹影响,提高了成像精度。

### 4 激光反射层析成像实验

利用笔者研制的激光反射层析成像系统开展外场实验,实验基本组成如图 6 所示。发射激光波长为 532 nm,脉宽 1 ns,通过可调节衰减片和扩束镜扩束后对目标探测。接收探测器为 Si-APD,响应波长为 400~1 100 nm。实验所使用的目标为一个高 1.0 m,底边长为 0.8、1.0、1.0 m 的三棱柱模型,放置于二维转台上。设置电机的步进角度为 1°,进行 360°环绕目标一周的全角度探测,共收集了 360 组激光反射的回波数据,信号接收装置与目标旋转中心距离为 39.7 m。

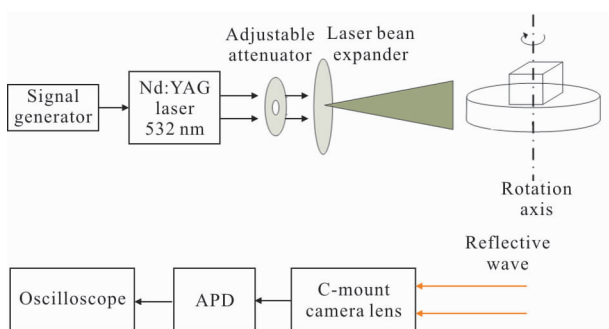
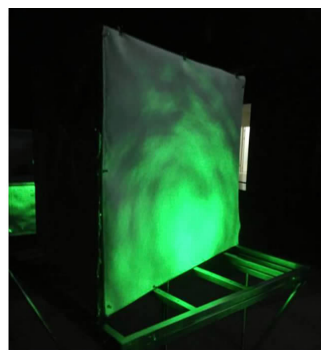


图 6 激光反射层析成像实验原理图  
Fig.6 Schematic diagram of laser reflection tomography imaging experiment

图 7(a)为直接滤波反投影目标重构结果,图 7(b)为进行相位恢复算法处理后的结果。可以看出,经过算法处理后,图像消除了大部分伪迹,取得了比较好的目标复原效果,复原图像外形及尺寸与目标较为吻合。



(a) 外场实验  
(a) Field experiment

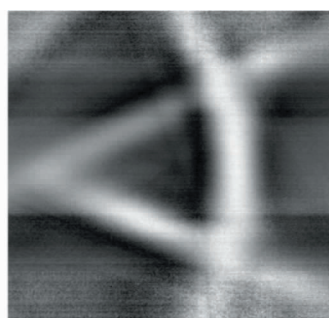


(b) 实验目标  
(b) Experimental target

图 7 外场实验现场及目标照片

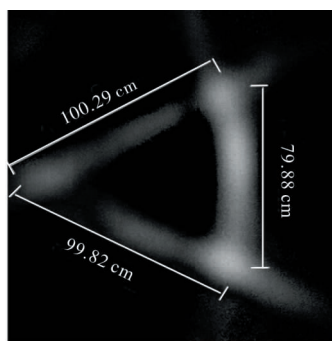
Fig.7 Photos of the field experiment and the target

对采集到的 360 组回波数据采用直接滤波反投影重构,滤波算子采用 Shepp-Logan 滤波器,再对图像进行相位恢复处理,得到目标成像结果如图 8 所示。



(a) FBP 重构

(a) FBP reconstruction



(b) 相位恢复

(b) Phase retrieval

图 8 目标重构图像相位恢复效果

Fig.8 Phase retrieval results of target reconstruction target

### 5 结论

文中针对激光反射层析成像中投影数据配准问题,提出一种模值混合加权相位恢复算法进行反射

层析图像恢复,提高了算法收敛速度和精度,有效地消除了重构图像伪迹,改善了图像质量,更好地恢复目标轮廓图像。与传统基于特征点跟踪的投影中心配准方法相比,该方法不需要目标回波具有明显峰特征,具有更好的实用性。在研究中,只考虑目标与成像系统在距离上的随机变化情况,如何处理目标相对姿态变化对算法造成的影响,将是下一步工作需要研究的内容。

#### 参考文献:

- [1] Jenkins D. A tomographic formulation of spotlightmode synthetic aperture radar [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1983, 71(8): 917-925.
- [2] Jefferies S M, Schulze K J, Matson C L, et al. Blind deconvolution in optical diffusion tomography [J]. *Optical Express*, 2002, 10(1): 46-53.
- [3] James Murray, Joseph Triscari, Gregory Fetzter, et al. Tomographic lidar[C]//OSA/ASSP/LACSEA, 2010.
- [4] Jin Xiaofeng, Zhang Peng, Liu Chunhua, et al. Techniques on long-range and high-resolution imaging lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(7): 050002. (in Chinese)  
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.
- [5] Jin Xiaofeng, Sun Jianfeng, Yan Yi, et al. Small system imaging simulation for reflective tomography laser radar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 747-752. (in Chinese)  
金晓峰, 孙建锋, 严毅, 等. 反射层析激光雷达小系统成像模拟[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 747-752.
- [6] Shi L, Hu Y, Zhao N, et al. Research on effect of reconstructed image quality in laser reflective tomography imaging [C]//Society of Photo -Optical Instrumentation Engineers. Society of Photo -Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2016, 10155: 10155P.
- [7] Gu Yu, Hu Yihua, Hao Shiqi, et al. Application of variational bayesian deconvolution method in laser reflective tomography imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0611003. (in Chinese)  
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): 0611003.
- [8] Lin Fang, Hu Yihua, Wang Jincheng, et al. Application of multi-frame iterative blind deconvolution method in laser reflective tomography imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0911001. (in Chinese)  
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): 0911001.
- [9] Zhou Deli, Huang Genghua, Shi Liang, et al. Unconformity method of laser reflection tomography projection registration [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(21): 104-112. (in Chinese)  
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.
- [10] Gerchberg R W. A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, 35: 237-246.
- [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]. *International Journal of Modern Physics B*, 1993, 7(18): 3153.
- [12] Fienup J R. Phase retrieval algorithms :a comparison[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [13] Fienup J R, Wackerman C C. Phase-retrieval stagnation problems and solutions [J]. *The Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3(11): 1897-1907.