

# 多帧迭代盲解卷积在激光反射断层成像的应用

林 放<sup>1,2</sup>, 王金诚<sup>1,2</sup>, 张 华<sup>1,2</sup>, 雷武虎<sup>1,2</sup>, 胡以华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 电子工程学院脉冲功率激光国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;

<sup>2</sup> 电子工程学院电子制约技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 激光反射断层成像是一种新型的远距离高分辨率成像手段。反射回波可以近似视作发射脉冲和目标反射系数投影分布的加噪卷积,因此发射脉冲的展宽将显著影响重建图像的分辨率。现有的滤波反投影方法不能有效解决这个问题,而脉冲压缩和解卷积可以从回波中还原目标反射率分布投影,进而提高重建图像质量。基于多角度测量的相似性,提出了一种多帧迭代盲解卷积逼近方法,对一维回波信号进行解卷积,并在实际激光雷达上进行了实验,重建结果表明,此算法能显著提高成像的分辨率和细节,并能对发射脉冲给出参考。

**关键词** 成像系统; 反射断层; 盲解卷积; 脉冲压缩; 成像分辨率

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0911001

## Application of Multi-Frame Iterative Blind Deconvolution Method in Laser Reflective Tomography Imaging

Lin Fang<sup>1,2</sup>, Wang Jincheng<sup>1,2</sup>, Zhang Hua<sup>1,2</sup>, Lei Wuhu<sup>1,2</sup>, Hu Yihua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute,  
Hefei, Anhui 230037, China;

<sup>2</sup> Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction, Electronic Engineering Institute, Hefei,  
Anhui 230037, China

**Abstract** Laser reflective tomography imaging is a new approach of long-range and high-resolution imaging. Reflective echo can be approximately considered as the adding noise convolution of transmitted pulse and target reflectance projection distribution. Hence, the broadening of transmitted pulse has significantly effect on resolution of reconstruction image. The existing filtering back-projection algorithm is insufficient to solve this problem effectively, while the pulse compression and deconvolution method can extract target reflectance distribution projection from echo, which will enhance the quality of reconstruction images. Based on the similarity of multi-angle detection, the blind deconvolution of one-dimensional echo signal is proposed based on multi-frame iterative approximation. Experiments are conducted on real laser radar, the reconstructed results show that the proposed method can significantly enhance the resolution and details of imaging, and give reference for the transmitted pulse.

**Key words** imaging systems; reflective tomography; blind deconvolution; pulse compression; imaging resolution

**OCIS codes** 110.6955; 110.3010; 100.3010

## 1 引 言

激光反射断层成像(LRT)是近年发展起来的一种新型激光成像方式。传统光学镜头由于存在衍射极限,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,实现远距离的高分辨率成像,而且受外界环境影响较小<sup>[1]</sup>。按成像体制划分,目前此类激光成像技术主要包括合成孔径成像激光雷达

收稿日期: 2017-04-06; 收到修改稿日期: 2017-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(61271353)

作者简介: 林 放(1995—),男,硕士研究生,主要从事激光断层成像方面的研究。E-mail: linfang\_613@163.com

导师简介: 胡以华(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光电信息处理方面的研究。

E-mail: skl\_hyh@163.com(通信联系人)

(SAIL)<sup>[2-6]</sup> 和 LRT 雷达, 后者的优势在于实现简单, 且分辨率与成像距离无关, 因此特别适合高空及太空搭载, 对远距离暗目标进行全天候成像。1988 年, 麻省理工学院林肯实验室的 Parker 等<sup>[7-9]</sup> 率先把计算机断层成像(CT)引入激光反射层析, 并进行了实验验证, 美国空军实验室的 Jefferies 等<sup>[10-16]</sup> 进一步研究了 LRT 的理论和应用, 并从地基雷达系统得到了在轨卫星的重建图像。国内研究者也提出了特征点跟踪、二维成像、有限角度成像等算法, 并进行了实验研究<sup>[17-26]</sup>。

用仪器观测物理现象时得到的结果不仅反映了物理现象本身, 还反映了仪器和观测手段等因素的特性, 这种特性会使观测结果降质, 在数学上用卷积表示, 从观测结果逆推出原本不失真的物理量称为解卷积, 如果仪器特性未知则称为盲解卷积。在图像重建中, 目标对脉冲波形的调制是一种典型的卷积过程, 会造成重建的目标图像分辨率降低, 图像细节模糊不清。一种直接的方法就是利用解卷积过程, 而 LRT 的特点就是多个角度多次测量, 每个角度上目标的反射率分布存在很大区别, 但发射脉冲基本一致, 利用这一特点, 多帧迭代盲解卷积可以得到精确预测的发射脉冲波形和目标反射率分布。另外, 此种方法还可以压缩脉冲宽度, 在其他信号处理领域已经证明了基于维纳滤波的解卷积方法能有效满足实验需求, 基于上述背景, 本文提出了多帧迭代盲解卷积方法。

## 2 LRT 基本原理

与 CT 相同, LRT 的基本重建算法是滤波反投影(FBP)法, 其数学原理是傅里叶切片定理。如图 1 所示, 目标在角度  $\phi$  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, 方程是  $r = x \cos \phi + y \sin \phi$ 。  $f(x, y)$  是目标的反射系数。

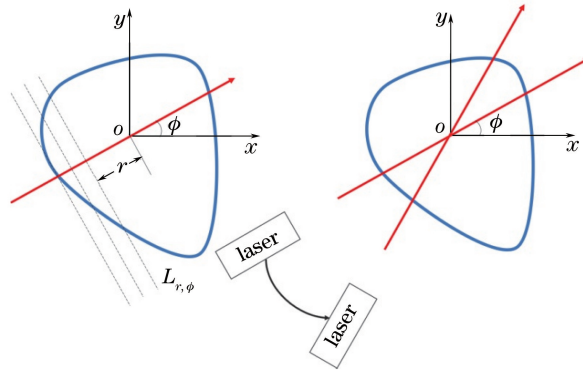


图 1 LRT 示意图

Fig. 1 Schematic of LRT

把不同的投影按角度反涂并叠加称为直接反投影, 但这种方法会产生伪影, 影响图像分辨率, 因此通常使用滤波反投影算法, 重建的目标反射系数图像表示为

$$g_{\text{FB}}(x, y) = \sum_{i=1}^m \mathcal{F}_1^{-1} \{ |\omega| \mathcal{F}_1[p(r, \phi)] \} \Delta\phi, \quad (2)$$

式中  $\mathcal{F}_1$  和  $\mathcal{F}_1^{-1}$  分别代表一维快速傅里叶变换(FFT)和快速傅里叶逆变换(IFFT)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, 因此改进的滤波器如 Shepp-Logon 滤波器、Hanning 窗函数等也得以使用<sup>[27]</sup>。收集到回波之后, 由于目标本身和实验系统存在随机抖动误差, 因此需要对回波投影进行配准, 常用的配准方法有参考屏法、特征点跟踪法<sup>[19]</sup>、相位恢复法<sup>[28]</sup>等。

当采样周期小于激光脉宽时, 不考虑系统及环境影响, 可以认为回波是发射脉冲和目标反射系数投影分布的卷积, 表示为

$$w(r, \phi) = p(r, \phi) \otimes g + \xi(r, \phi) = \int_{-\infty}^{\infty} p(s, \phi) \cdot g(r - s) ds + \xi(r, \phi), \quad (3)$$

式中  $w(r, \phi)$  是角度  $\phi$  的回波,  $p(r, \phi)$  是角度  $\phi$  的反射系数投影分布,  $g$  是入射脉冲波形, 通常是高斯或指数波形,  $\xi(r, \phi)$  是加性噪声。从回波信号中提取目标反射率分布信息是一维解卷积问题, 其数学本质是解第一类弗雷德霍姆积分方程, 而此类求解是一个病态问题, 即观测值的微动会引起解的巨大变动, 导致解卷积变得困难, 但是通过利用先验知识、增加求解约束等, 可以减轻病态, 得到相对稳定的解<sup>[10,25]</sup>。

### 3 多帧迭代盲解卷积算法

#### 3.1 离散非因果维纳滤波器

给定回波观测数据  $w(r)$ , 根据(3)式, 离散形式的卷积方程为

$$w(r_n) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} p(r_i)g(r_n - r_i) + \xi(r_n), \quad (4)$$

式中各物理量定义同(3)式。维纳滤波的思想是找到一个估计  $\hat{p}$ , 使得均方误差度量  $e_{\text{MSE}}$  最小:

$$e_{\text{MSE}} = E[|p(r_n) - \hat{p}(r_n)|^2]. \quad (5)$$

利用卷积定理, 可以得到待估计数据的估计:

$$\hat{P}(\omega) = \frac{G^*(\omega)W(\omega)}{|G(\omega)|^2 + [S_{\xi\xi}(\omega)/S_{pp}(\omega)]}, \quad (6)$$

式中  $\hat{P}(\omega)$ 、 $G(\omega)$ 、 $W(\omega)$  分别是  $\hat{p}(r_n)$ 、 $g(r_n)$ 、 $w(r_n)$  的频率谱,  $*$  表示复共轭,  $S_{\xi\xi}(\omega)$ 、 $S_{pp}(\omega)$  分别是  $\xi(r_n)$ 、 $p(r_n)$  的自功率谱, 由于实际探测中  $S_{\xi\xi}(\omega)$ 、 $S_{pp}(\omega)$  较难获得, 因此有一种近似的估计, 表示为

$$\hat{P}(\omega) = \frac{G^*(\omega)W(\omega)}{|G(\omega)|^2 + \gamma}, \quad (7)$$

式中正常数  $\gamma$  是待估计信号数字形式的信噪比倒数。非因果维纳滤波器是一种规整化的逆滤波器, 它的优点是计算简单、有效, 缺点是为了抑制噪声而损失了一部分高频信息。

#### 3.2 增量维纳滤波器

普通的维纳滤波器没有迭代的步骤, 因此不能加入外部的约束对解进行限制, Zou 等<sup>[29]</sup> 提出了一种迭代的增量维纳滤波器(IWF), 定义频域解卷积误差为

$$S(\omega) = W(\omega) - P(\omega)G(\omega), \quad (8)$$

利用维纳滤波器的估计, 即(6)式, 则上一步的误差  $S_1(\omega)$  可以写为  $S_1(\omega) = W(\omega) - P_1(\omega)G(\omega)$ , 由此得到估计:

$$\hat{P}(\omega) = \frac{G^*(\omega)S_1(\omega)}{|G(\omega)|^2 + [S_{mn}(\omega)/S_{xx}(\omega)]} + \frac{|G(\omega)|^2}{|G(\omega)|^2 + [S_{mn}(\omega)/S_{xx}(\omega)]}P_1(\omega), \quad (9)$$

类似可以用常数  $\gamma_p$  代替功率谱, (9)式的一个近似为

$$P_2(\omega) = P_1(\omega) + \frac{G^*(\omega)S_1(\omega)}{|G(\omega)|^2 + \gamma_p}, \quad (10)$$

令  $S_2(\omega) = W(\omega) - P_2(\omega)G(\omega)$  表示下一步的误差, 则  $S_1(\omega)$ 、 $S_2(\omega)$  的关系为

$$S_2(\omega) = \frac{\gamma}{|G(\omega)|^2 + \gamma}S_1(\omega), \quad (11)$$

又因为  $\gamma_p > 0$  且  $|G(\omega)|^2 \geq 0$ , 所以:

$$\|S_2(\omega)\|^2 \leq \|S_1(\omega)\|^2, \quad (12)$$

这意味着每一步迭代都能保证误差不变或减小。类似的, 对于发射脉冲  $g$  也可以作相同的频谱优化, 即:

$$G_2(\omega) = G_1(\omega) + \frac{P^*(\omega)S_1(\omega)}{|P(\omega)|^2 + \gamma_g}, \quad (13)$$

式中  $\gamma_g$  表示发射脉冲的信噪比倒数。增量盲维纳滤波(IBWF)算法流程如图 2 所示。

#### 3.3 多帧迭代盲解卷积

在非因果维纳滤波器和增量维纳滤波器的基础上, 提出了多帧迭代盲解卷积方法, 通过 LRT 系统的先验知识, 同时估计目标反射系数投影分布和入射脉冲波形信息, 并通过多角度测量的公约数性质, 对估计结

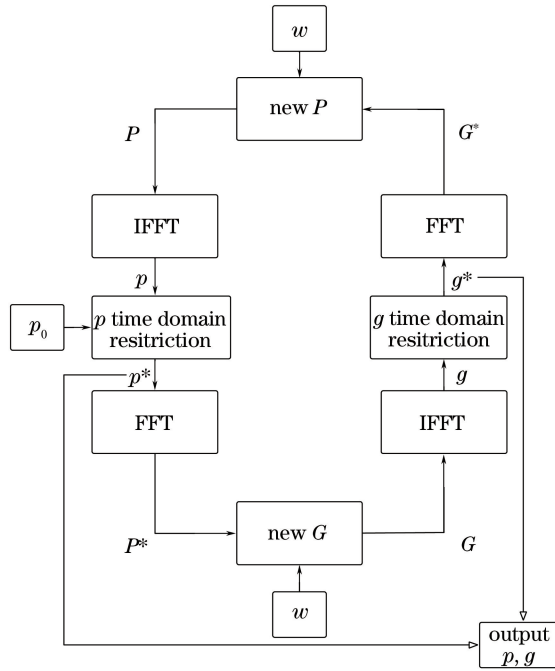


图 2 IBWF 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of IBWF algorithm

果进行迭代优化。通过回波观测数据, 给出一个近似的发射波形估计, 经过离散非因果维纳滤波器(NCWF)之后, 得到的估计  $\hat{p}$  作为初始预测进入增量维纳滤波器, 在其中类似地对发射波形频谱  $G$  有一个渐进估计:

$$G_2(\omega) = G_1(\omega) + \frac{P^*(\omega)S_1(\omega)}{|P(\omega)|^2 + \gamma_g}, \quad (13)$$

式中  $\gamma_g$  是发射脉冲的数字形式的信噪比的倒数, 是一个需要估计的常量。通过这样得到的  $\hat{p}$  估计再经过 NCWF 滤波, 最后得到相对精确的  $g$  估计  $\hat{g}(\phi)$ , 在对每个角度的回波数据都作上述处理之后, 利用最小二乘估计得到  $\hat{g}_l$  的相对精确估计, 再把  $\hat{g}_l$  作为估计对每个回波数据作 NCWF 滤波, 最后得到相对精确的  $\hat{p}_l(\phi)$ 。

该算法中用到的目标时域限制有: 回波观测数据的支持域, 即目标可能存在的区间; 发射波形的支持域, 一般不会超过目标存在区间的一半, 如果超过, 则解卷积失去了意义。该算法的流程如图 3 所示。

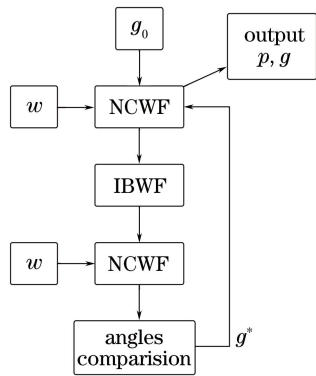


图 3 多帧迭代盲解卷积算法流程图

Fig. 3 Flow chart of multi-frame iterative blind deconvolution algorithm

#### 4 仿真实验

基于 3 节算法设计, 进行仿真实验验证, 对各种形状的目标进行投影解卷积, 设定的发射脉冲为

$$g(r) = A \exp\left[-\frac{(r-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (14)$$

对理论的投影作卷积后再加上白高斯噪声,模拟实际探测到的回波,最后经过滤波反投影得到重建图像。另一方面,将投影作解卷积处理后得到的目标反射率投影分布估计经过滤波反投影得到重建图像,二者对比如图 4 所示,图 4 中卷积核序列长度为 12,成像尺幅长度为  $256 \times 256$ ,信噪比设定为 20 dB,采样角度间隔为  $3^\circ$ 。

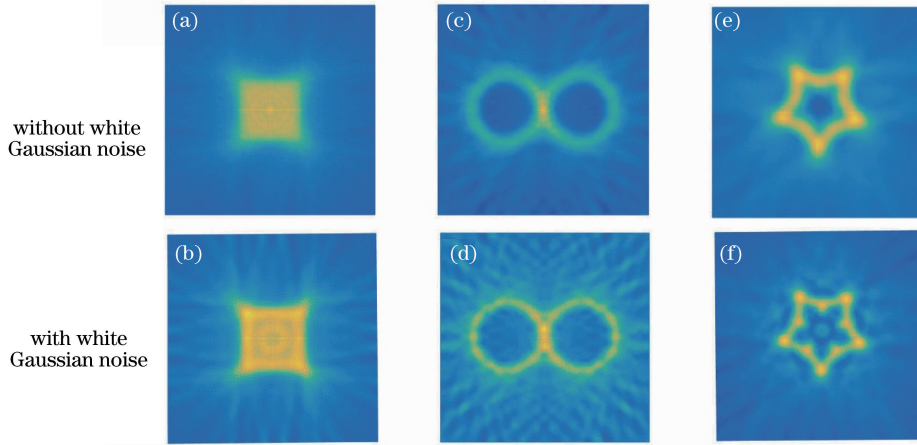


图 4 多帧迭代解卷积仿真实验结果。(a)(b)方块;(c)(d)双环;(e)(f)五角星

Fig. 4 Simulation experiment results of multi-frame iterative deconvolution algorithm. (a)(b) Square; (c)(d) double circle; (e)(f) five-pointed star

图 5 所示为不同信噪比条件下的解卷积仿真实验结果,该算法对于信噪比较低的探测情形也具有较好的复原效果。为了定量表示重建图像与原图像之间的差异,定义误差测度函数为

$$e = 10 \lg \frac{\sum \sum [P(u,v)]^2}{\sum \sum [P_{\text{est}}(u,v)]^2}, \quad (15)$$

式中  $P(u,v)$  和  $P_{\text{est}}(u,v)$  分别是原始图像和重建图像的对应点。不同信噪比条件下的重建误差测度如图 6 所示,随着信噪比的增加,重建误差明显降低。

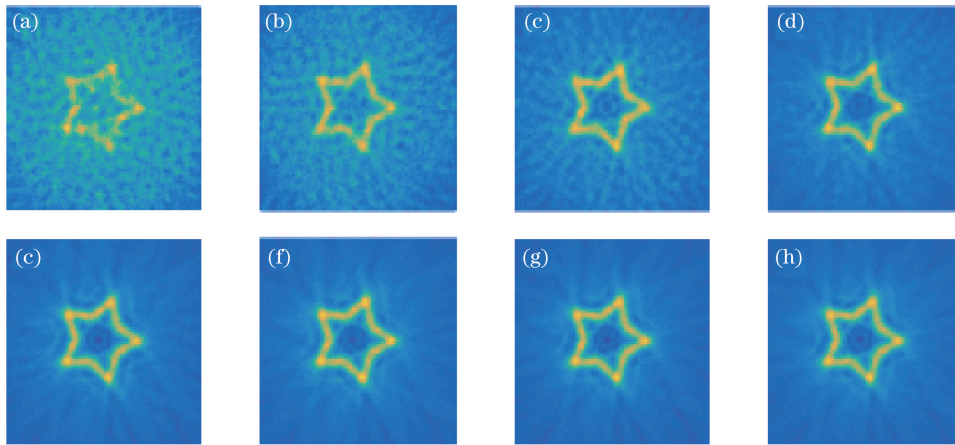


图 5 不同信噪比的解卷积效果对比。(a)~(h)信噪比分别为 1 dB,6 dB,11 dB,16 dB,21 dB,26 dB,31 dB,36 dB,

Fig. 5 Comprision of deconvolution results with differentsignal to noise ratio. (a)-(h) Signal to noise ratio of 1 dB, 6 dB, 11 dB, 16 dB, 21 dB, 26 dB, 31 dB, 36 dB, respectively

为了更直观地表示解卷积能力,可以利用瑞利判据的思想对相邻两脉冲作解卷积处理,举例如图 7 所示。用衬比度定义脉冲分辨率为

$$C = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{min}}}, \quad (15)$$

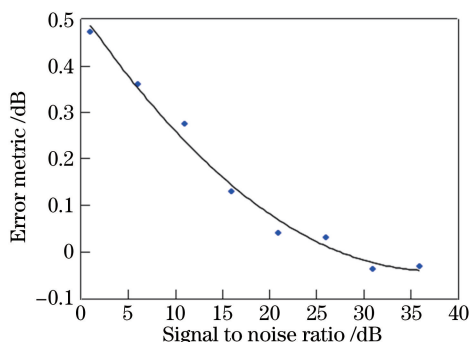


图 6 重建图像误差测度随信噪比的变化曲线

Fig. 6 Variation of reconstructed image error metric with signal to noise ratio

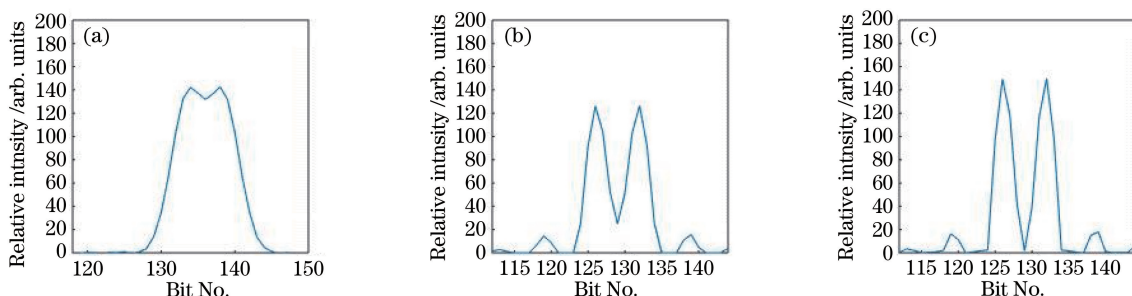


图 7 多帧迭代解卷积算法的脉冲分辨率。(a)解卷积前;(b) NCWF 之后;(c) IBWF 之后

Fig. 7 Pulse resolution of multi-frame iterative deconvolution algorithm. (a) Before deconvolution; (b) after NCWF; (c) after IBWF

经过不同的 IBWF 迭代次数后的衬比度变化如图 8 所示,经 30 次迭代得到最大的衬比度,此时两个脉冲被分辨得最清晰。30 次之后衬比度下降是因为多帧迭代解卷积不具有收敛性质,所以在有限迭代次数中已经达到很接近的估计,但会在进一步的迭代中丧失<sup>[29]</sup>。

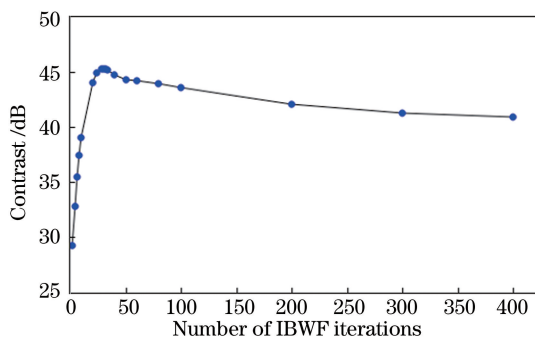


图 8 衬比度随 IBWF 迭代次数的变化曲线

Fig. 8 Variation of contrast with number of IBWF iterations

## 5 激光雷达实验结果及讨论

实验采用的 LRT 系统如图 9 所示,使用 1064 nm 波长的调 Q 倍频 Nd:YAG 激光器,发射脉冲为高斯波形,脉冲宽度 1 ns,发射光束经扩束镜扩束后覆盖目标,接收镜头采用工业标准 C 型口光圈可变焦的光学镜头,后面接高带宽高灵敏 Si 型雪崩光电探测器(APD),带宽响应为 400~1100 nm,光敏面积为 0.04 mm<sup>2</sup>,截止频率为 3 GHz。考虑到物体为漫反射模型,因此激光器与探测器并不同轴。

目标是一个长为 54 cm,宽为 30 cm 的长方形模型,放置于转台上,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。探测距离为 2.38 m,回波采样率为 2 GHz。回波配准后作标准的滤波反投影处理,滤波算子采用 Ram-Lak 滤波器,原始重建图像,阈值化处理后的图像和多帧迭代盲解卷积处理后的图像的对比如图 10 所示,可见细节分辨率有明显提高。

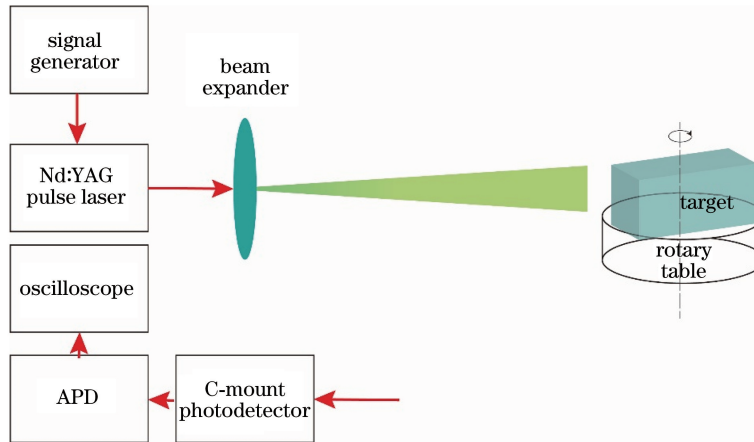


图 9 LRT 实验系统示意图

Fig. 9 Schematic of LRT experimental system

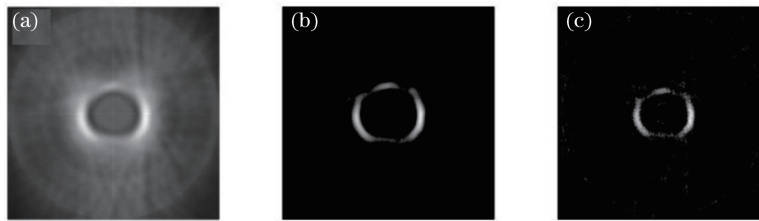


图 10 解卷积效果示意图。(a)原始重建图像;(b)阈值化处理后;(c)解卷积后

Fig. 10 Schematic of deconvolution effect. (a) Original reconstructed image; (b) after threshold processing; (c) after deconvolution

## 6 结 论

研究了 LRT 的基本原理,讨论了回波处理中解卷积的问题,将维纳滤波引入回波的处理中,并使用先验信息代入迭代过程,寻找最佳衬比度情形,得到分辨率更高的目标反射率分布投影。传统的滤波反投影方法是涵盖在重建算法中的,要想进一步提高重建图像质量,必须寻找降噪和滤波之间的平衡,本文方法就是从多次迭代中定量寻找最小误差重建。在实际激光雷达实验中,利用多角度反射率分布投影数据反投影重建目标廓像,结果表明,多帧迭代盲解卷积方法可以显著提高 LRT 成像质量,压缩脉冲波形。

## 参 考 文 献

- [1] Jin Xiaofeng, Zhang Peng, Liu Chunhua, *et al.* Techniques on long-range and high-resolution imaging lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 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(5): 050002.
- [2] Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Yanan, *et al.* A large-aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900112.  
刘立人, 周 煜, 职亚楠, 等. 大口径合成孔径激光成像雷达演示样机及其实验室验证[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900112.
- [3] Liu Liren. Incoherently synthetic aperture imaging lidar: architecture and algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 109-116.  
刘立人. 非相干合成孔径激光成像雷达:体系结构和算法[J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 109-116.
- [4] Sun Zhiwei, Hou Peipei, Zhi Yanan, *et al.* Two-dimensional matched filtering imaging algorithm for synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1228003.  
孙志伟, 侯培培, 职亚楠, 等. 合成孔径激光成像雷达的二维匹配滤波成像算法[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1228003.
- [5] Krause B, Buck J, Ryan C, *et al.* Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]. *CLEO: Science and Innovations*. Optical Society of America, 2011: PDPB7.

- [6] Green T J, Marcus S, Colella B D. Synthetic-aperture-radar imaging with a solid-state laser[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(30): 6941-6949.
- [7] Parker J K, Craig E B, Klick D I, *et al.* Reflective tomography: images from range-resolved laser radar measurements [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(13): 2642-2643.
- [8] 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): 2196-2198.
- [9] Marino R M, Capes R N, Keicher W E, *et al.* Tomographic image reconstruction from laser radar reflective projections [C]. *International Society for Optics and Photonics*, 1989: 248-268.
- [10] Jefferies S M, Schulze K J, Matson C L, *et al.* Blind deconvolution in optical diffusion tomography [J]. *Optics Express*, 2002, 10(1): 46-53.
- [11] Matson C L, Holland D E, Pierrottet D F, *et al.* Satellite feature reconstruction using reflective tomography: field results[C]. *SPIE*, 1998, 3219: 65-72.
- [12] Holland D E. Reflective tomography using a short-pulse length laser: system analysis for artificial satellite imaging[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(9): 2811-2820.
- [13] Matson C L, Mosley D E. Reflective tomography reconstruction of satellite features—field results[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(14): 2290-2296.
- [14] Matson C L, Magee E P, Stone D. Reflective tomography for space object imaging using a short-pulselength laser[C]. *International Symposium on Optics, Imaging, and Instrumentation*. *International Society for Optics and Photonics*, 1994: 73-82.
- [15] Lasche J B, Matson C L, Ford S D, *et al.* Reflective tomography for imaging satellites: experimental results [C]. *SPIE*, 1999, 3815: 178-188.
- [16] Matson C L. Deconvolution-based spatial resolution in optical diffusion tomography[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(31): 5791-5801.
- [17] Jin Xiaofeng, Yan Yi, Sun Jianfeng, *et al.* Angle-doppler resolved reflective tomography laser imaging radar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0828001.  
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): 0828001.
- [18] Yan Y, Sun J, Jin X, *et al.* Two-dimension image construction for range-resolved reflective tomography Laser radar [C]. *SPIE*, 2011, 8162: 81620Y.
- [19] Jin X, Sun J, Yan Y, *et al.* Feature tracking for projection in laboratory-scale reflective tomography laser radar imaging [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(18): 3475-3480.
- [20] Jin X, Sun J, Yan Y, *et al.* Application of phase retrieval algorithm in reflective tomography laser radar imaging[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(1): 012801.
- [21] Jin X, Yan Y, Zhang P, *et al.* Angle-Doppler resolved reflective tomography imaging lidar[C]. *SPIE*, 2013, 8868: 88680U.
- [22] Zhou Deli, Huang Genghua, Shi Liang, *et al.* Laser reflective tomography projection registration method of non-cooperative target[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(21): 104-107.  
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): 104-107.
- [23] 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.  
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.
- [24] Gu Y, Hu Y, Hao S, *et al.* Study on feasibility of laser reflective tomography with satellite-accompany[C]. *SPIE*, 2015, 9674: 96742T.
- [25] Wang J, Zhou S, Shi L, *et al.* Image quality analysis and improvement of Ladar reflective tomography for space object recognition[J]. *Optics Communications*, 2016, 359: 177-183.
- [26] Jin X, Sun J, Yan Y, *et al.* Imaging resolution analysis in limited-view laser radar reflective tomography[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(10): 2575-2579.
- [27] Gu Yu, Hu Yihua, Hao Shiqi, *et al.* Study on influence of filter back-projection on laser reflective tomography[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(12): 1500-1504.  
谷雨, 胡以华, 郝士琦, 等. 激光反射层析成像中滤波反投影算法特性研究[J]. *激光与红外*, 2015, 45(12): 1500-1504.
- [28] Ford S D, Matson C L. Projection registration in reflective tomography[C]. *SPIE*, 1999, 3815: 189-198.
- [29] Zou M, Unbehauen R. New algorithms of two-dimensional blind deconvolution[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(10): 2945-2956.