

变分贝叶斯解卷积法在激光反射层析成像中的应用

谷 雨^{1,2} 胡以华^{1,2} 郝士琦^{1,2} 王金诚^{1,2} 王 迪^{1,2}

¹电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

²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 基于距离分辨的激光反射层析成像是一种兼顾远距离和高分辨率成像特点的新型激光成像系统。激光发射脉冲宽度大于采样周期时,接收回波被视作反射率分布与发射脉冲的卷积。在重构目标反射率分布轮廓时成像分辨率降低。运用变分贝叶斯方法对1维探测回波信号进行非盲解卷积处理,对探测回波进行脉冲压缩,有效解决了由卷积效应带来的图像降质。设计了激光反射层析实验,并对实测数据进行了处理。重构图像表明此方法有效提高了系统成像分辨率。

关键词 成像系统; 反射层析; 解卷积; 变分贝叶斯法; 脉冲压缩; 成像分辨率

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0611003

Application of Variational Bayesian Deconvolution Method in Laser Reflective Tomography Imaging

Gu Yu^{1,2} Hu Yihua^{1,2} Hao Shiqi^{1,2} Wang Jincheng^{1,2} Wang Di^{1,2}

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

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

Abstract Range-resolving laser reflective tomography imaging is a new type of laser imaging system which takes both long-range and high-resolution imaging characteristics into account. When the pulse width of laser emission is larger than the sampling period, the received echo is regarded as the convolution of reflectance distribution and emission pulses. Imaging resolution can be reduced when the target reflectance distribution profile is reconstructed. Non-blind deconvolution of one-dimensional detected echo signal is carried out with variational Bayesian method. Pulse compression of the detected echo signal is done, and the issue of image degradation caused by the convolution effect is solved effectively. The laser reflective tomography experiment is designed and the measured data are processed. Reconstructed images show that the proposed method can effectively improve image resolution of the system.

Key words imaging systems; reflective tomography; deconvolution; variational Bayesian method; pulse compression; imaging resolution

OCIS codes 110.6960; 110.1455; 320.5520

1 引 言

激光反射层析(LRT)成像是一种基于多角度1维信息获取并由计算机重构图像的新型成像方式^[1]。为解决光学系统孔径衍射受限的远距离目标成像问题,目前采用的技术主要有:基于“点发射、面照射、点接收”工作模式的远距离高分辨激光成像雷达技术、合成孔径激光成像雷达(SAIL)技术^[2-3]和LRT成像雷达技术^[4],其中LRT技术的优势在于成像分辨率与探测距离无关,系统可以采用非相干体制探测,在机载、星载

收稿日期: 2015-12-28; 收到修改稿日期: 2016-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(61271353)、安徽省自然科学基金(1308085QF123)、脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金

作者简介: 谷 雨(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光探测方面的研究。E-mail: terryguyu@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)

等平台上可以做到大功率、远距离目标探测。美国林肯实验室 Parker 等^[5-8]最早将医学领域层析成像(CT)算法应用于激光反射层析成像,并对航天器等远距离目标进行探测。在目标探测中,当发射激光脉冲宽度大于采样周期时,物体表面有效反射部分的邻近距离采样有重叠,这意味着产生的回波是反射率分布的投影值与发射高斯脉冲的卷积。为解决卷积效应引起的反射断层重构图像分辨率降低的问题,本文提出了变分贝叶斯解卷积方法。

2 激光反射断层成像基本原理

LRT 成像的原理是将物体的一个切平面轮廓在多角度下进行反射投影,将收集的探测回波进行图像重构,如图 1 所示。完整的成像过程可以分为回波探测和图像重构 2 个部分,这 2 部分共同完成从物到像的再现。

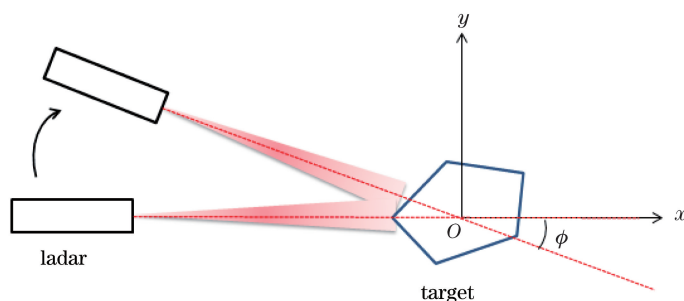


图 1 LRT 多角度探测原理

Fig. 1 LRT multi-angle detection principle

分析探测回波时,一般认为接收到的回波经历了如图 2 所示的几个过程。实际轮廓 $f(x, y)$ 的投影过程是数学上的 Radon 变换

$$p_{\phi}(r) = \int_L f(x, y) ds, \quad (1)$$

式中 $r = x \cos \phi + y \sin \phi$ 表示 x - y 平面内的一条直线,即积分路径 L ; ds 是弧长微分。以点乘的形式重写该式为 $r = (x, y) \cdot (\cos \phi, \sin \phi)^T$ 。直线的法线方向是向量 $\Psi = (\cos \phi, \sin \phi)^T$,与原点的距离为 r ,这样的构造方式以简洁的形式表达了 \mathbf{R}^2 空间中的任意直线。如果限制 $\theta \in [0, \pi]$ 且 $r \in \mathbf{R}$,那么空间 $\mathbf{P} = \mathbf{R} \times [0, \pi]$ 内包含的有序数对 (r, ϕ) 代表了 x - y 平面内的所有直线的集合。二维 Radon 变换利用线积分来构造从 x - y 平面到 \mathbf{P} 空间上的函数映射。

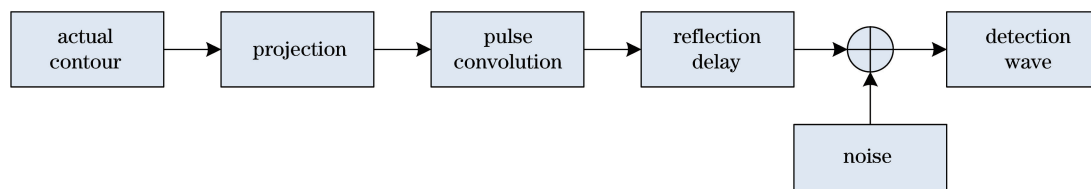


图 2 探测回波形成过程

Fig. 2 Formation process of detected echo

与透射层析不同的是,在特定角度 ϕ 下,发射激光照射物体需要考虑遮挡效应^[9],实际轮廓中参与反射过程的仅有光轴向的可视部分,轮廓被遮挡部分不参与回波反射。图 3 为一个不封闭图形在 360° 完全探测角度下的反射层析重构图像^[9],外部 U 形轮廓清晰,但由于遮挡效应,U 形轮廓内部线段在大部分观测角度下无法反射探测激光,因此无法在重构图像中观察到内部线段。如果内部被测物的法线不在可观测角度范围内,几乎接收不到物体回波,重构像也无法显示该物体的存在。

当发射激光脉冲宽度大于采样周期时,物体表面有效反射部分的邻近距离采样有所重叠,这意味着产生的回波是反射率分布的投影值 $p_{\phi}(r)$ 与发射高斯脉冲 G 的卷积

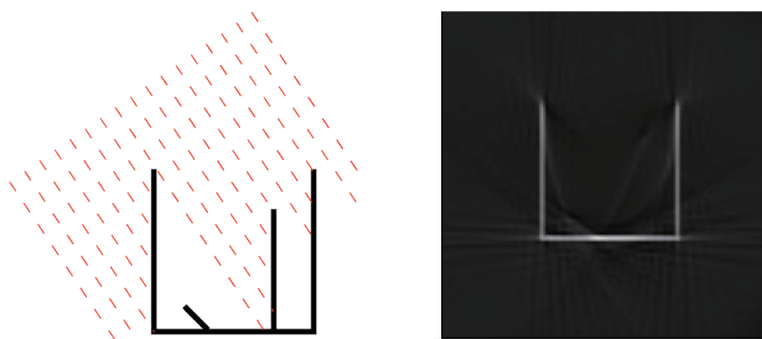


图 3 遮挡目标的重构图像

Fig. 3 Reconstructed image from a sheltered target

$$W_{\phi}(j) = p_{\phi} \otimes G_j \equiv \int_{-\infty}^{\infty} p_{\phi}(m) \cdot G(m - j) dm, \quad (2)$$

式中 G_j 是单个高斯脉冲函数的表达式, \otimes 号表示卷积运算。

因实际回波接收中目标与探测器之间存在微动^[10], 每个角度的回波存在不等量的时延, 混合加性噪声后得到实际探测回波, 表示为

$$W'_{\phi}(j) = W_{\phi}(j + \epsilon) + n, \quad (3)$$

式中 ϵ 是特定角度 ϕ 下的微动时延量, n 是加性高斯白噪声。

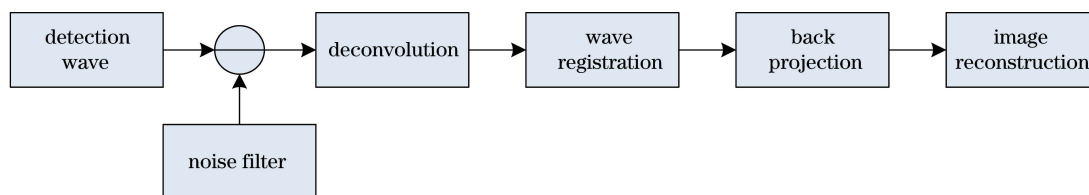


图 4 重构图像的形成过程

Fig. 4 Formation process of the reconstructed image

反演物体轮廓图像时, 与探测回波形成过程相反, 需要按如图 4 所示几个步骤求解, 波形的去噪过程采取滤波方式。回波配准是将接收的多角度回波按照统一的时延排列, 在有参考屏的条件下波形容易精确对准^[5], 如图 5 所示; 无参考屏条件下回波配准方式较难, 国内外专家也对此问题展开过深入研究^[10-13], 并应用相位恢复算法取得了一定的突破。将探测回波和激光脉冲波形进行解卷积运算, 反卷积后的波形是轮廓像在该角度下的反射投影。将全部探测角度下的反射投影波形进行反投影运算, 即得到物体的重建图像, 常见反投影算法有滤波反投影算法^[14]等。

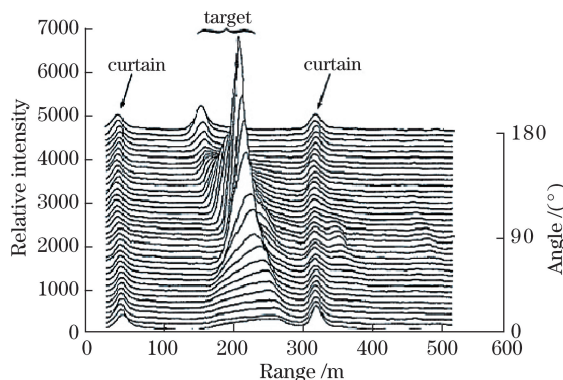


图 5 有参考屏条件下的反射回波配准

Fig. 5 Reflection echo registration with reference screen

需要特别指出的是, 在解卷积过程中, (2) 式是第 1 类 Fredholm 积分方程^[15], 这是一个典型的非适定问

题,噪声 n 的任何微小扰动对反卷积的解 p_ϕ 的变动影响都很大,因此从一系列有限离散数据中重构 p_ϕ 是不可能的。尽管反卷积解 p_ϕ 的解析表达式难以以显式形式给出,但在卷积核 G 已知情况下,利用先验条件对解进行参数估计,仍可得到较好的反卷积结果,以补偿由距离重叠引起的分辨率降低量。

3 变分贝叶斯法解卷积

贝叶斯估计方法常用于解决视觉、语音、机器学习等领域的问题^[16],也常常被用作雷达、声纳、地震波等探测波形的检测、判决、分析和处理^[17-18]。贝叶斯估计的基本思想是将待估计量看作一个已知但不能精确确定的随机变量,所谓已知是指该随机变量的概率分布是先验的。变分贝叶斯法是在经典贝叶斯估计基础上对待估参数的分布作出独立假设,对待估参数的联合概率分布作变分近似。该方法最早由 Beal^[19]在博士论文中提出,并被运用于复杂的统计模型。借鉴此方法并将其运用于解决 LRT 成像的回波脉冲压缩问题,对反射率分布这一不可直接观测变量进行推断。为防止概率密度函数与反射分布投影出现混淆,将反射投影变量名用 $J(\cdot)$ 表示,概率密度函数用 $p(\cdot)$ 表示。

假设反射分布投影 J 是服从高斯分布 $(J_1, J_2, \dots, J_N) \sim \mathbb{N}(\mu, \sigma^2)$ 的一族随机变量,其中 μ 为均值, $\sigma^2 = \tau^{-1}$ 为方差。定义方差的倒数 $\tau = \frac{1}{\sigma^2}$ 为精度,作为待估参数 \hat{J} 分布的先验参数,推断均值和精度的先验(联合)分布 $q(\mu, \tau) = p(\mu, \tau | J_1, J_2, \dots, J_N)$ 是目标。根据贝叶斯全概率公式

$$p(J, \mu, \tau) = p(J | \mu, \tau) p(\mu | \tau) p(\tau), \quad (4)$$

式中各独立因子的解析表达式为

$$p(J | \mu, \tau) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\tau^{-1}}} \exp\left[-\frac{(J_i - \mu)^2}{2\tau^{-1}}\right], \quad (5)$$

$$p(\mu | \tau) = \mathbb{N}(\mu_0, (\lambda_0\tau)^{-1}), \quad (6)$$

$$p(\tau) = \Gamma(\tau | a, b) = \frac{1}{\Gamma(a)} b^a \tau^{a-1} \exp(-b\tau), \quad (7)$$

参数 μ, τ 的先验分布分别被假设为服从超先验参数为 $(\mu_0, \lambda_0), (a, b)$ 的高斯分布和 Gamma 分布。超先验参数是确定的值,作为初始条件给出,一般设置为小的正数,将先验分布的表达式显著化。对先验联合概率分布作变分近似 $q(\mu, \tau) \approx q(\mu)q(\tau)$,使 μ 和 τ 的先验分布独立。

在变分贝叶斯估计方法中表征估计量 \hat{J} 误差的代价函数被设置为 $C(\hat{J} - J) = |\hat{J} - J|^2$ 。对于随机向量 \hat{J} 而言,应理解为随机向量误差的 Euclid 范数,表示为

$$C(\hat{J} - J) = \exp\left[-\sum_{j=1}^M \frac{(W_j - \hat{J}G_j)^2}{\sigma_{\text{noise}}^2}\right] \prod_{j=1}^M \Delta J_j. \quad (8)$$

基于最小均方误差(MSE)准则和 Kullback-Leibler 准则^[20]的最小化,变分分布的潜变量存在一个最优的先验分布,即

$$\ln q_\mu^*(\mu) = -\frac{1}{2} \left\{ (\lambda_0 + N) E_\tau(\tau) \left(\mu - \frac{\lambda_0 \mu_0 + \sum_{i=1}^N J_i}{\lambda_0 + N} \right) \right\}, \quad (9)$$

$$\ln q_\tau^*(\tau) = (a_0 - 1) \ln \tau - b_0 \tau + \frac{\tau}{2} E_\mu \left[\sum_{i=1}^N (J_i - \mu)^2 + \lambda_0 (\mu - \mu_0)^2 \right], \quad (10)$$

式中 * 号表示的是先验最佳分布, E_τ 和 E_μ 分别表示对变量 τ 和 μ 的求均值运算, a_0 和 b_0 分别表示一族超先验参数 a 和 b 的初始值,潜变量存在相互依赖的关系,计算细节过程不再赘述。仅考虑算法思想中类似最大期望(EM)算法的循环过程,需要计算待估量 \hat{J}_i 的 1 阶矩和 2 阶矩,初始化超参数为某些任意值,再循环计算潜变量。待估量 \hat{J}_i 是一族非负值,在最小化代价函数时会带来更多的计算量,循环收敛的计算时间需要考虑实际的采样点数和数据量。

4 实验结果及讨论

基于距离分辨的 LRT 实验系统采用如图 6 所示的非相干探测方案,系统采用 1064 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。卷积核可表示为

$$G(t) = \exp(-1.707t^2), \tag{11}$$

式中 t 为脉冲时域波形的时间参数,单位为 s。如图 6(a)所示,发射端用信号发生器对激光脉冲进行调制,发射光束经过一个可调节衰减镜后,由分光镜对光束分束,其中一束光被探测器检测并记录脉冲波形,另一束光经扩束镜扩束后指向目标。如图 6(b)所示,接收端用单像素探测器直接探测反射回波,探测器采用的是高带宽高灵敏度 Si-APD 探测器,响应带宽为 400~1100 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;镜头采用工业级标准 C 型口光圈可调、可变焦的光学镜头。探测器输出信号经一个射频(RF)高速电信号放大器后,由示波器显示波形并采集回波数据(示波器型号 Agilent-DSO90404A,最大采样率为 20 GHz)。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。

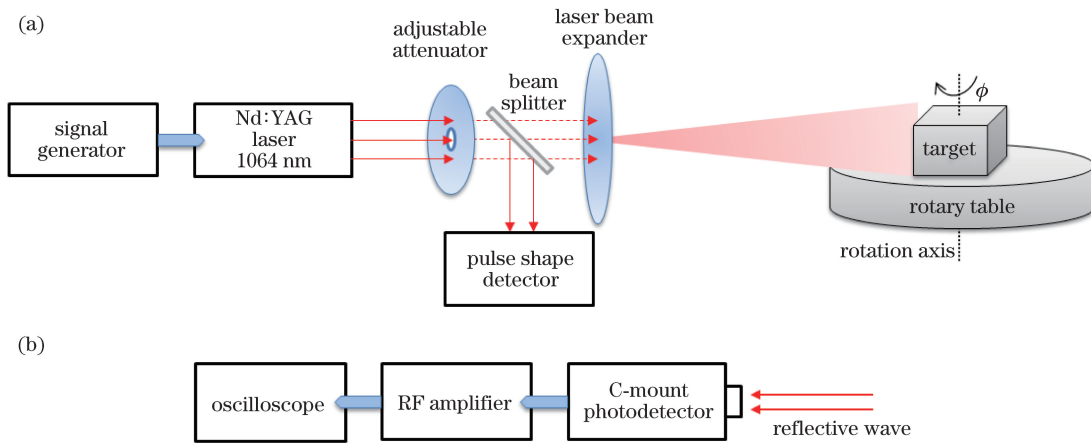


图 6 LRT 系统(a)发射和(b)接收模块示意图

Fig. 6 Schematic diagram of (a) transmitting and (b) receiving modules of LRT system

探测目标为一个多边形模型,中心立方体模拟的是卫星航天器本体,两翼模拟的是太阳能帆板,目标本体尺寸在米级数量级,实物如图 7 所示。目标放置于一个转台上,进行 360°全角度探测,步进角度为 1°,探测距离为 40 m,回波采样率保持 2 GHz。滤波器采用标准 Ram-Lak 滤波,回波配准是在有参考屏条件下实现精确配准。在不对回波数据作反卷积处理的条件下,利用滤波反投影进行层析成像得到图 8(a)所示结果;用解卷积处理后的变分贝叶斯估计量作反投影,得到图 8(b)所示结果,距离分辨率有显著提高。

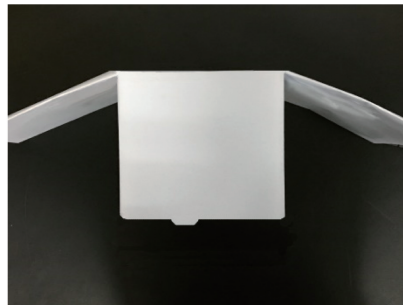


图 7 LRT 系统探测目标实物图

Fig. 7 Photo of LRT system detection target

根据瑞利准则,基于距离分辨的 LRT 系统的探测距离分辨率应满足 $\Delta d = c\Delta t/2$, c 为光速, Δt 为脉冲宽度。选取反射面上位于光轴方向相邻的两点 A 、 B (A 、 B 两点的轴向距离为 D),在回波波形上对应相邻间隔为 Δd , $D = \Delta d$ 、 $D < \Delta d$ 的示意图分别如图 9(a)和(b)所示(图 9 四边形与实验实测目标不同,仅作原理解释)。在解卷积后有明显的脉冲波形压缩,可以认为解卷积后的距离分辨率显著提高。若 A 和 B 两点的

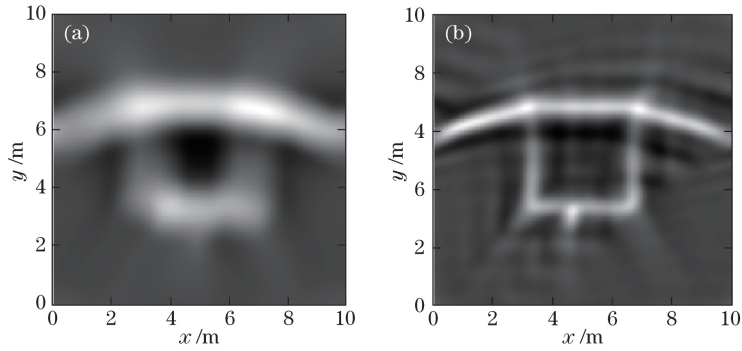


图 8 解卷积(a)前和(b)后的重构图像

Fig. 8 Reconstructed images (a) before and (b) after deconvolution

轴向距离小于 Δd , 脉冲压缩前反射回波呈现单峰值分布, 解卷积后的估计量呈现双峰值分布, 从瑞利准则出发可以认为 A 、 B 两点是可分辨的, 对比效果如图 10 所示。用对比度计算公式 $C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\min}}$ 作为成像质量改善的指标。当 $D = \Delta d$, 解卷积后估计量的对比度为 $C_E = 172.49$, 原始反射回波数据的对比度为 $C_{RW} = 58.59$; 那么脉冲压缩后的分辨率改善程度被认为是 $C_E / C_{RW} = 4.6$ dB。

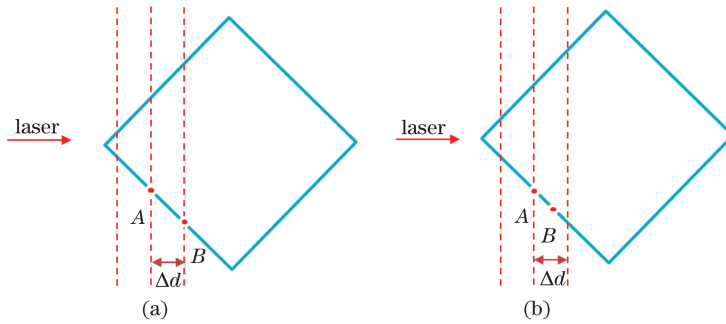


图 9 目标表面最小距离分辨率相邻两点位置示意图。(a) $D = \Delta d$; (b) $D < \Delta d$

Fig. 9 Location of target surface adjacent two points with minimum distance resolution. (a) $D = \Delta d$; (b) $D < \Delta d$

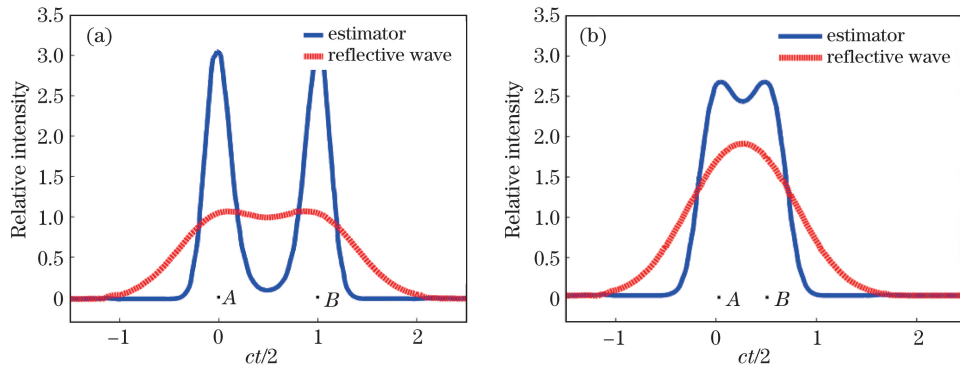


图 10 距离分辨率不同时的波形脉冲压缩。(a) $D = \Delta d$; (b) $D < \Delta d$

Fig. 10 Waveform pulse compression associated with range resolution. (a) $D = \Delta d$; (b) $D < \Delta d$

5 结 论

分析了 LRT 系统探测回波的形成原理, 讨论了回波处理、特别是解卷积问题处理的方法。将变分贝叶斯估计方法运用到 LRT 系统高斯脉冲卷积核已知条件下探测回波的非盲解卷积过程, 得到了目标的反射分布投影。在实测实验中, 利用反射分布投影数据进行反投影成像, 得到的二维图像结果表明变分贝叶斯解卷积方法显著提高了基于距离探测的 LRT 系统的成像分辨率, 与直接探测回波相比有效压缩了脉冲波形, 目标边界信息更加清晰。实验结果表明成像分辨率改善了 4.6 dB。

参 考 文 献

- 1 Gu Yu, Hu Yihua, Hao Shiqi, *et al.*. Study on feasibility of laser reflective tomography with satellite-accompany[C]. SPIE, 2015, 9674: 96742T.
- 2 Liu Liren. 2D Fourier-transform imaging algorithm for synthetic aperture imaging ladars[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0128001.
刘立人. 合成孔径激光成像雷达的二维傅里叶变换成像算法[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0128001.
- 3 Liu Liren. Principle of self-interferometric synthetic aperture lidar for 3D imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0528001.
刘立人. 自干涉合成孔径激光三维成像雷达原理[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0528001.
- 4 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.
- 5 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(27): 2642-2643.
- 6 Knight F K, Kulkarni S R, Marine R M, *et al.*. Tomographic techniques applied to laser radar reflective measurements [J]. Lincoln Laboratory Journal, 1989, 2(2): 1-16.
- 7 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.
- 8 Knight F K, Klick D I, Ryan-Howard D P, *et al.*. Two-dimensional tomographs using range measurements[C]. SPIE, 1989, 999: 269-280.
- 9 Wang J, Zhou S, Shi L, *et al.*. Image quality analysis and improvement of lidar reflective tomography for space object recognition[J]. Optics Communications, 2016, 359: 177-183.
- 10 Ford S D, Matson C L. Projection registration in reflective tomography[C]. SPIE, 1999, 3815: 189-198.
- 11 Jin Xiaofeng, Sun Jianfeng, Yan Yi, *et al.*. Imaging resolution analysis in limited-view laser radar reflective tomography [J]. Optics Communications, 2012, 285(10): 2575-2579.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 Vardhanabhuti V, Ilyas S, Gutteridge C, *et al.*. Comparison of image quality between filtered back-projection and the adaptive statistical and novel model-based iterative reconstruction techniques in abdominal CT for renal calculi[J]. Insights into Imaging, 2013, 4(5): 661-669.
- 15 Zou Mouyan. Deconvolution and signal restoration[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 200.
邹谋炎. 反卷积与信号复原[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 200.
- 16 Zhu Jun, Hu Wenbo. Recent advances in Bayesian machine learning[J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 52(1): 16-26.
朱 军, 胡文波. 贝叶斯机器学习前沿进展综述[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(1): 16-26.
- 17 Kay S M. Fundamentals of statistical signal processing: Volume III: Practical algorithm development[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2013.
- 18 Kay S M. Fundamentals of statistical signal processing: Volume II: Detection theory[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- 19 Beal M J. Variational algorithms for approximate Bayesian inference[D]. London: University of London, 2003.
- 20 Kullback S. Information theory and statistics[M]. New York: Dover, 1959.