

基于波形分解的激光反射层析成像优化方法

刘一凡^{1,2,3}, 胡以华^{1,2,3*}, 徐世龙^{1,2,3**}, 王一程^{1,2,3}, 韩飞^{1,2,3}, 石亮^{1,2,3}, 张鑫源^{1,2,3***}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国防科技大学先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;³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 激光反射层析成像技术作为一种新型远距离、高精度的空间目标探测方法,在信噪比足够时具有成像分辨率与探测距离、接收口径相对无关的优势,在远距离空间探测领域的应用前景非常广阔,使得作为激光反射层析成像核心的成像优化方法更是成为了众多研究者关注的焦点。本文提出了一种基于波形分解方法的激光反射层析成像优化方法,该方法旨在通过波形分解方法抑制激光反射层析成像重构图像中的伪影和噪声,实现对激光反射层析成像结果的优化。实验结果表明,在使用同一组投影数据的情况下,优化前后的峰值信噪比分别为 16.5 和 17.8,基于波形分解的激光反射层析成像优化方法能够有效提升重构图像的质量,并能够较好地消除重构图像中绝大部分环状伪影和噪声所带来的影响。

关键词 遥感与传感器; 反射层析; 激光雷达; 波形分解; 图像优化

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222044

1 引言

近年来,为了突破传统光学成像技术在远距离高分辨率探测中的局限性,各种超分辨激光雷达成像技术发展迅速^[1-3]。激光反射层析成像(LRTI)技术作为一种可实现远距离、高精度探测的新型激光雷达成像技术^[4],在一定程度上克服了传统光学成像远距离探测时成像精度不足的缺陷。该技术起源于计算机层析(CT)成像技术,其概念最早由美国 Parker 等^[5-6]于 1988 年提出,最大的特点是其成像分辨率主要取决于发射激光脉冲宽度、探测器带宽等因素,在信噪比足够的情况下与探测距离、接收口径相对无关。这一特性也使得 LRTI 技术非常适用于执行空间目标的远距离、高精度探测任务,在未来具有非常广阔的应用前景和实用价值。目前,随着有关 LRTI 技术研究的不断深入,更多与 LRTI 相关的数据处理方法也被国内外的研究者们发掘出来,例如: Parker 等在提出 LRTI 概念的同时,利用滤波反投影算法重构目标图像; Jin 等^[7]提出了特征点跟踪法,利用合作目标上的特征点对旋转中心进行配准;中国科学院上海光学精密机械研究所依据 Gerchberg^[8]提出的迭代算法原理,提出了基于 LRTI 技术的相位恢复算法^[9]; 胡以华课题组^[10]提出了

基于啁啾脉冲的反射层析激光雷达成像方法、基于最大似然估计的解卷积方法^[11]等,同时也针对多帧迭代盲卷积方法在 LRTI 技术中的应用^[12]做了相应的研究。

以上方法都在一定程度上提升了目标重构图像的成像质量,但是在面对复杂探测环境时,其针对由大气湍流、实验设备噪声等因素引起的波形畸变、噪声杂波等消极影响的抑制作用不够明显,间接导致上述方法对目标重构图像信噪比的提升程度受到了限制。此外,由于在执行远距离探测任务时的回波信号能量本身较小,加之 LRTI 技术的高速探测电路带宽较大、等效噪声功率较高,这就使得目标重构图像中极易产生大量较强的伪影,这些伪影的存在也极大地降低了重构图像的成像质量,甚至可能与重构出的目标轮廓相叠加导致其形状发生畸变,最终影响 LRTI 的探测精度或出现无法准确识别目标轮廓的情况。本文提出了一种基于激光雷达回波波形分解的 LRTI 优化方法,旨在通过对激光回波波形进行规整,尽可能从回波波形上消除不必要的杂波,抑制由波形畸变、杂波等引起的伪影的影响,在环境较为复杂时进一步提高目标重构图像的成像质量。

收稿日期: 2022-11-23; 修回日期: 2022-12-25; 录用日期: 2023-01-06; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(61871389)、国防科技大学科研计划项目重大项目(ZK18-01-02)、国防科技大学自主创新科学基金(22-ZZCX-07)、湖南省研究生科研创新项目重点项目(CX20220007)

通信作者: *skl_hyh@163.com; **xushi1988@yeah.net; ***skl_zxy@163.com

2 LRTI原理

CT成像是通过X射线对目标物体进行不同角度下的透射式扫描,获取目标物体不同角度的投影信息,并利用重构算法将这些信息重构为可显示目标物体内部结构的二维断层图像的成像技术^[13]。LRTI原理与之类似,通过发射激光脉冲照射目标物体,获得目标物体在各个角度下的深度信息后,以此利用重构算法重建目标的二维轮廓图像。LRTI原理如图1所示。

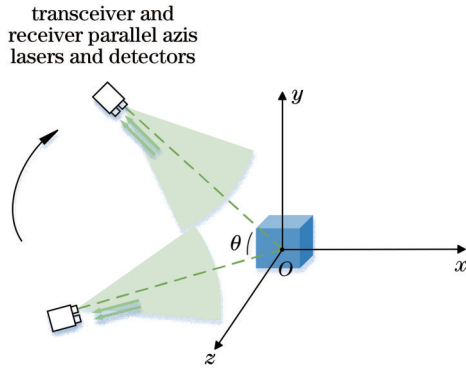


图1 LRTI原理
Fig. 1 Principle of LRTI

LRTI技术是一种新型激光成像方式,能够克服衍射极限,且受外界环境影响较小^[14]。探测时,须发射激光脉冲并使其能够完全覆盖目标才能获取完整的目标深度信息。三维目标物体在 θ 角度下的投影分布^[15]可表示为

$$p(r, \theta) = \iint_{S_{r, \theta} \cap M} f(x, y, z) ds, \quad (1)$$

式中: $S_{r, \theta}$ 为垂直于激光入射方向的平面; $f(x, y, z)$ 代表目标表面反射率分布系数; r 为距离; M 为目标轮廓。在激光束无法穿过目标的情况下,除目标表面外,其他位置的 $f(x, y, z)$ 值均为零。

由于探测距离较远且发射的激光脉冲通常经过准直处理,照射在目标物体上的激光光束可视为平行光。目标表面对发射激光脉冲进行调制,产生能够涵盖目标深度信息的回波信号,该信号理论上可表示为照射在目标表面的激光脉冲信号与投影分布的卷积结果,当探测到的波形数据为离散型数据时,其离散形式的表达式^[12]为

$$w(r_n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} p(r_n) g(r_n - r_k) + \xi(r_n), \quad (2)$$

式中: w 为回波信号; g 为激光脉冲; ξ 为加性噪声。

在获得目标的激光回波信号后,通过重构算法即可得到目标的二维轮廓图像。重构算法的应用至关重要,它关系到最终成像结果的质量。常见的重构算法包括直接反投影、滤波反投影、代数迭代法等。

3 基于波形分解的LRTI优化方法

波形分解方法是多种激光雷达成像技术为获取高精度目标信息时采用的方法之一,也是提高探测精度的重要手段之一。

理想情况下,应用于LRTI技术的激光器发射的脉冲为高斯型。向目标发射激光脉冲后,目标表面反射率和深度信息对激光脉冲进行调制,反射回带有目标信息的一维回波信号,并由探测器接收。实际应用中,虽然LRTI系统本身各元件可能会对发射的激光脉冲产生一定影响,但出射光仍可近似为高斯型脉冲。因此,探测器接收到的激光回波信号可视为多个高斯函数的累加:

$$y(t) = \sum_{k=1}^n A_k \cdot e^{-\frac{(t-b_k)^2}{2c_k^2}} + N_k(t), \quad (3)$$

式中: n 表示分解出的波形分量的总数; A_k 代表第 k 个波形分量的峰值幅值; b_k 代表第 k 个波形分量的峰值位置; c_k 代表第 k 个波形分量的半峰全宽; $N_k(t)$ 为噪声。通过将滤波后的信号进行波形分解并对各初始参数进行优化处理后,叠加得到优化后的激光回波信号,该信号即可视为目标的真实回波信号,最后依据该信号通过滤波反投影算法得到目标重构图像。优化方法如图2所示。

3.1 激光回波信号分解

探测器接收到的回波信号中,除了包含目标物体

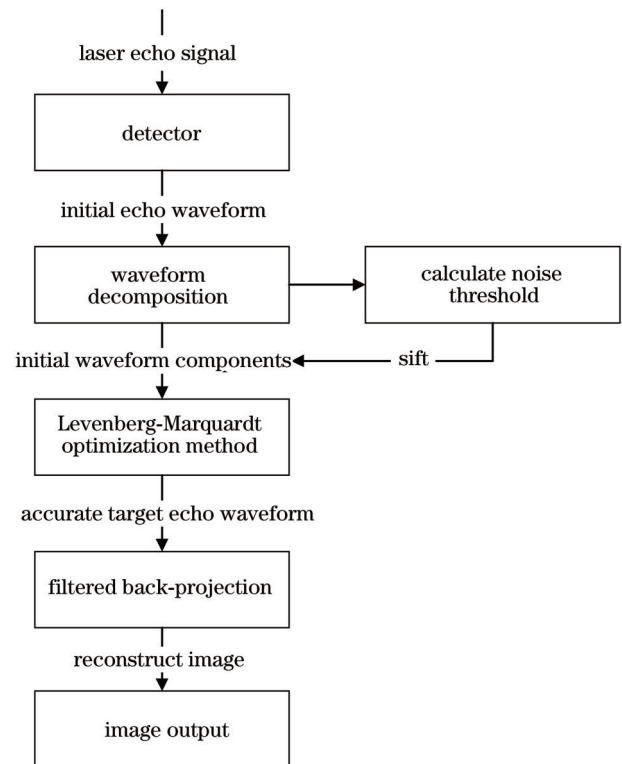


图2 基于波形分解的LRTI优化方法
Fig. 2 Optimization method of LRTI based on waveform decomposition

深度信息的信号外,还夹杂了许多诸如电路噪声等引起的干扰信号,因此需要对探测到的回波信号进行滤波处理。

本文中采取的滤波方法为小波去噪方法,该方法实现较为简单,且在去除噪声的同时能够尽可能地保留激光回波信号的尖峰、边缘特征,这将有利于提取激光回波信号中的峰值信息,在进行激光回波波形分解时,更准确地检测到波峰的所在位置和数值。

但是,仅靠滤波算法是不能够将激光回波信号中的所有杂波清除掉的,如果无限将激光回波信号分解下去,势必会在处理过后的波形中引入大量不正确的波形分量,影响最终的成像结果。所以在对每一个角度下的激光回波信号进行分解时,需设定一个噪声阈值来对波形分解的数量进行限制,在最大限度保留目标回波信号的情况下去除不必要的杂波。在实际应用中,由于探测电路带宽有限,激光回波信号宽度必然小于探测器探测到的回波波形的宽度,因此可截取其两端不包含目标物体信息的噪声波形,由此计算每个激光回波信号的噪声阈值。噪声阈值的计算公式^[16]为

$$T_k = \mu_k + 3\sigma_n, \quad (4)$$

式中, T_k 、 μ_k 、 $3\sigma_n$ 分别为第 k 个激光回波信号的噪声阈值、噪声的均值、噪声的标准差。当检测到分解出的波形分量的峰值小于该噪声阈值时,则认为其不能够作为重构波形的一部分并将其剔除,以此得到更为准确的重构波形。图 3 为噪声阈值计算的示意图。

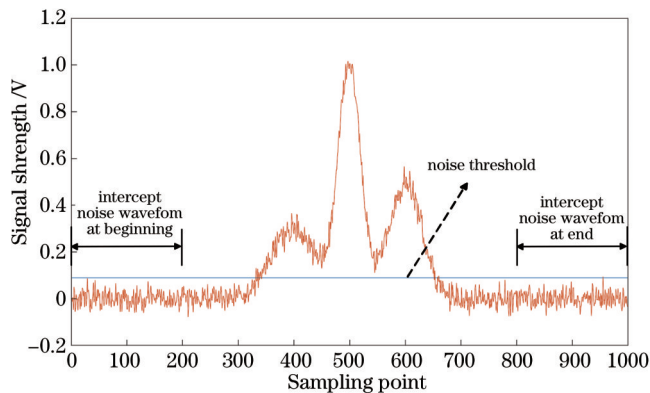


图 3 噪声阈值计算

Fig. 3 Noise threshold calculation

3.2 回波信号初始特征参数提取

需要提取的初始特征参数主要包括分解出波形分量的数量、每个波形分量的峰值数值、峰值位置以及半峰全宽,分解时采取层层剥离的方法^[17-19],按照峰值大小的顺序依次将每个波形分量从滤波后的激光回波信号中分离出来,同时确定各个分量的初始特征参数值与数量。

在 LRTI 中,通常探测到的信号较为微弱,且由于其探测带宽极窄,在滤波时极易发生回波信号略微失真的情况。传统波形分解方法中所采用的拐点法在处

理此类信号时受到弱波、滤波等的影响较大,这对求解各波形分量的初始特征参数极为不利,可能导致分解出的波形并不准确。而层层剥离方法受这些弱波、滤波等的影响较小,可以有效地克服传统拐点法这一缺陷,在应用于 LRTI 中分解这些微弱的窄带宽信号时更具优势,能够更准确地从原始波形中分离出目标的激光回波信号。

采用层层剥离策略的波形分解方法流程如图 4 所示。

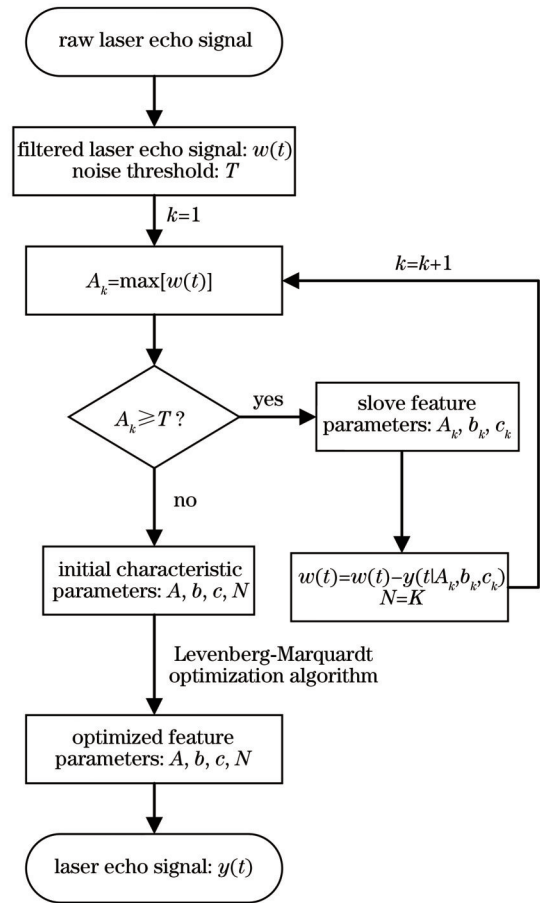


图 4 波形分解方法流程图

Fig. 4 Flow chart of waveform decomposition method

首先检测波形数据 $y(t)$ 中的最大值作为此次循环中所要分离的波形分量的峰值 A ,若该波峰值大于噪声阈值 T ,则该波形分量将得到保留并记录下该峰值点的位置坐标 b 。

在求取波形分量的半峰全宽 c 时,为了方便计算,通常通过波峰的半峰全宽来求解。确定峰值点位置 b 后,分别向两边延伸坐标以获得该波形分量中函数值为 $A/2$ 处的点,该点位置即为半峰全宽位置。如果已知波形分量中某一点数值为峰值的一半,则该点位置坐标与半峰全宽位置坐标存在如下关系:

$$c = \frac{|t_g - b|}{\sqrt{2 \ln 2}}, \quad (5)$$

式中, t_g 为波形分量半峰全宽的位置坐标。由于探测

器采集到的激光回波信号是离散数据,可能出现无法直接确定代表波形分量半峰全宽位置 t_g 的情况,因此需要设立循环寻找 t_g 的近似值。同时,在激光回波信号宽度过窄、采样点较少的情况下,应适当细化采样点之间的间隔,以此确保该近似值与真实值之间仅存在较微小的误差。具体方法为:分别判断 b 左右两侧的点,当第 i 个点对应的数值大于 $A/2$ 且第 $i+1$ 个点对应的数值小于 $A/2$ 时,则将第 i 个点近似为 t_g ,并通过式(6)计算出该波形分量的半峰全宽 c 。

在确定波形分量的峰值幅值 A 、峰值位置 b 以及半峰全宽 c 后,在原波形的基础上减去这个波形分量,所得到余下的数据即为将该波形分量从原始波形中“剥离”后的波形,在此波形数据中重复上述过程,循环至第 $N+1$ 个波形分量的峰值幅值无法满足小于噪声阈值的条件时随即停止,记录分离出的波形分量的数量 N 。将得到的波形分量累加,得到的叠加后的新波形数据即为更接近目标物体真实激光回波信号的数据。

3.3 参数优化与图像重构

本文采用 Levenberg-Marquardt(LM)方法对各个波形分量的参数进行优化处理。LM方法是一种迭代算法,最早由 Levenberg 提出并由 Marquardt 进行了深入分析,在目前非线性最小二乘问题中应用广泛,也是较为成熟的激光雷达回波数据参数优化方法之一。LM方法可视为 Gauss-Newton 方法和最速下降法的结合方法,当设置的阻尼值较小时,该方法的优化效果类似 Gauss-Newton 方法,反之阻尼值较大时,其优化效果类似最速下降法。在输入初始参量后,通过反复迭代自动调整更新阻尼值 μ 的大小,以实现寻找各分解波形特征参数最优解的目的。LM优化方法的公式^[20]为

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + d_k \\ d_k = -J_k^T F_k (J_k^T J_k + \mu_k I)^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: F 为目标函数,可视为多个高斯函数的叠加; J 为 F 的雅可比矩阵。优化后得到的目标函数与初始波形

之差达到设定阈值要求或迭代次数突破上限后,该优化过程便会停止,并输出优化后更接近目标回波信号的高斯函数表达式。

LM方法在应用中综合了 Gauss-Newton 方法和最速下降法这两个方法的优势,同时它还避免了由于海森矩阵可能奇异所带来的各种问题,且具备收敛速度较快等优点,可使得优化后的各波形分量的特征参数更加接近真实值,从而使结合后的波形获得更加准确的拟合效果。

3.4 滤波反投影算法

由波形分解方法得到优化的激光回波信号后,通过重构算法即可对目标图像进行重构。本文采用的重构算法为滤波反投影算法(FBP),该算法基于傅里叶切片原理,重构出的目标轮廓图像^[15]可表示为

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^n P_{\theta_i}(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) \Delta \theta, \quad (7)$$

式中: $\Delta \theta$ 为采样角度间隔; P_{θ_i} 为 θ_i 角度时的回波投影数据。滤波反投影算法在采样角度间隔小、采样角度完全的情况下,其重构图像较为清晰,是目前较为成熟的重构算法之一。

4 实验结果与分析

4.1 目标模型

本文实验采用的 LRTI 目标模型为立方体结构,边长为 8 cm,其表面均涂有逆反射材料以增强探测方向上的激光回波信号。将该目标放置于水平转台上,水平高度与探测系统高度保持一致,目标轴线与转台中心重合,该轴线即为目标的旋转中心,探测过程中目标将跟随转台绕旋转中心转动。在目标的后方约 20 cm 处设置有一参考屏,在示波器显示的波形中,该参考屏反射的回波信号将被作为参考信号,用于方便地寻找目标表面反射的激光回波信号。

4.2 实验系统设计

图 5 为实验系统装置示意图,主要包含发射、探测、数据采集 3 个子系统,探测距离约为 200 m。

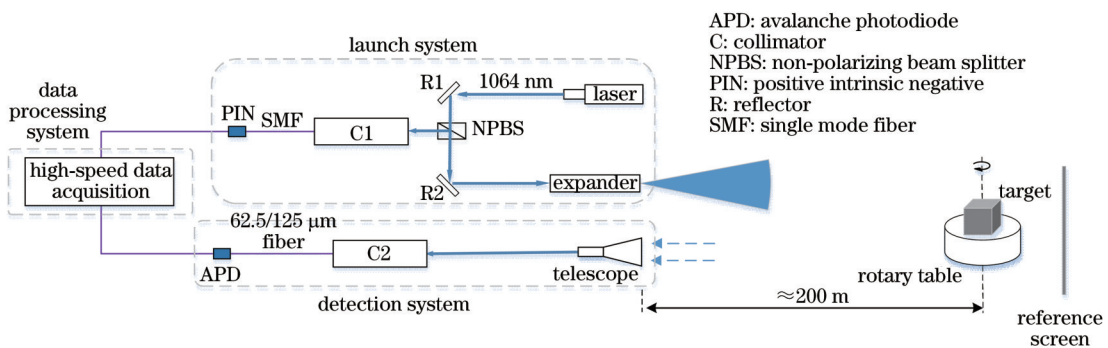


图 5 实验系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental system

发射系统采用了波长为 1064 nm 的短脉冲激光器,脉冲宽度仅为 93 ps,在理论上 LRTI 的距离分辨率与脉冲宽度存在如下关系^[21]:

$$\Delta R = \frac{\Delta \tau \cdot c}{2}, \quad (8)$$

式中: ΔR 表示距离分辨率; $\Delta \tau$ 表示激光脉冲宽度; c 表示光速。从该关系式可看出,该系统具备较高的距离分辨率,极限距离分辨率可达厘米量级。该激光器发射的单个激光脉冲能量可达 10 μ J,这使得激光脉冲信号在大气环境中传播 200 m 后仍然具有较强的能量并可能引起探测器饱和现象的发生。因此,在实验过程中如果出现此类情况,须在激光器出光口处放置滤波片以确保探测器在接收激光回波信号时不会因能量饱和而失真。

除激光器外,发射系统还包括 2 个反射镜、1 个分束棱镜和扩束系统组成,其中:反射镜主要用于调整远场光斑位置;分束棱镜用于向数据采集系统输出参考信号;扩束系统则用于确保远场光斑能够完全覆盖目标。

探测系统采用雪崩光电二极管(APD)作为探测器,其前部装有类似望远镜的光学系统,两者通过一根多模光纤连接,望远系统的接收视场不宜过大,其大小约为目标处的光斑大小并能够完全覆盖目标即可。激光回波信号经过 APD 后,转换为电信号输入到数据采集系统中。

数据采集系统通过 PIN (positive intrinsic negative) 二极管接收来自发射系统分束棱镜的另一路光束作为该系统的延时触发信号,当该光束触发开关后,激光脉冲高速采集器开始采集数据并输出相应波形。

在输出的波形中,可通过参考屏的回波信号波形确定目标信号的位置,最终得到目标在某一角度的激光回波信号,然后按照 1° 的角度间隔旋转转台,探测下一个角度的激光回波信号,循环该过程直至采集到目

标的完全角度波形。

4.3 实验结果与分析

按照上述流程,通过实验得到在各个角度下的目标激光回波信号波形,并采用小波变换对其进行滤波处理。由于该实验采用的模型为对称模型,因此为了在不影响最终成像结果的情况下简化实验流程,实验中共采集了 180 组目标模型的激光回波信号。各个角度滤波后的激光回波信号(可称为正弦图)如图 6 所示。

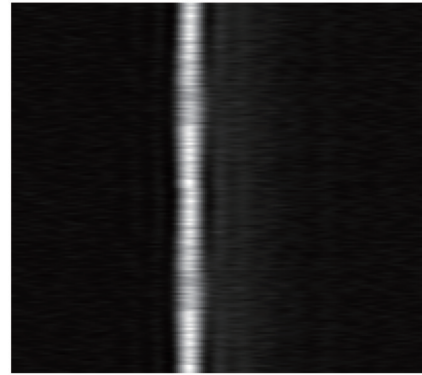


图 6 激光回波信号正弦图

Fig. 6 Sinogram of laser echo signal

图 6 即能反映出目标的深度信息:图中纵轴每一个像素点表示一个采样间隔;横轴每一个像素点表示该像素点对应的深度,即目标深度;每个像素的灰度值表示在该角度和时间下激光回波能量的大小,即在该角度下所有相同深度的目标表面反射回的激光回波信号强度。

对所有角度下的激光回波信号进行分解,采用层层剥离的方法将峰值大于噪声阈值的波形分量依次剥离出来并进行拟合,分解出的波形分量示例如图 7 所示,图 7(a)、7(b)分别表示采样角度为 45°、90° 下分解出的初始波形分量与分解前的离散型数据相对比。

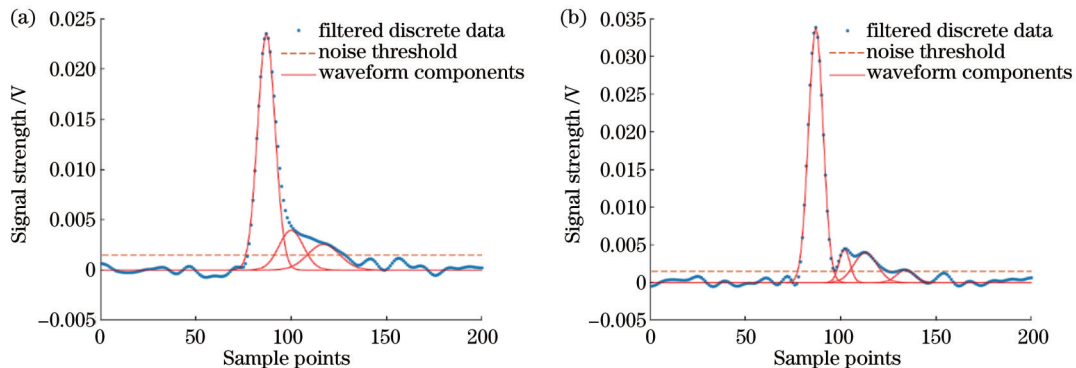


图 7 分解后的波形分量。(a) 采样角度为 45° 时的波形分量;(b) 采样角度为 90° 时的波形分量

Fig. 7 Decomposed waveform components. (a) Waveform components when sampling angle is 45°; (b) waveform components when sampling angle is 90°

在得到各波形分量的初始特征参数 A 、 b 、 c 后, 将其带入到 LM 算法中进行优化处理, 以寻找最接近于目标真实回波信号的特征参数最优解, 并将各个波形分量相叠加得到新的激光回波信号如图 8 所示,

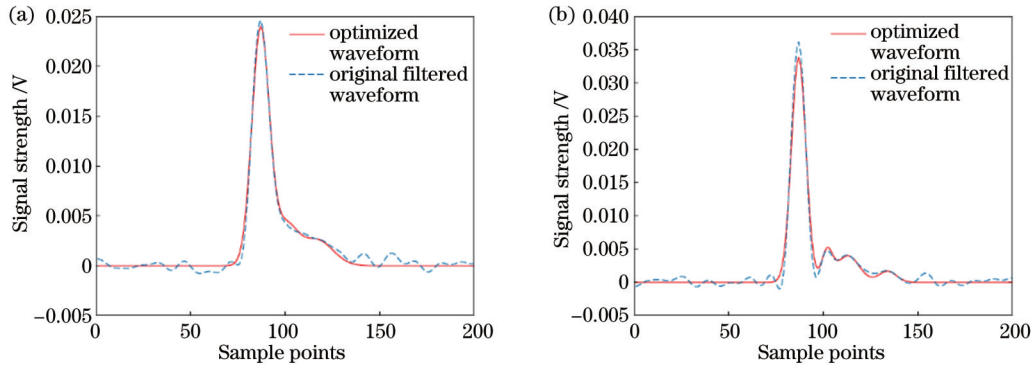


图 8 优化后的激光回波信号。(a) 采样角度为 45° 时的优化波形; (b) 采样角度为 90° 时的优化波形

Fig. 8 Optimized laser echo signals. (a) Optimized waveform when sampling angle is 45° ; (b) optimized waveform when sampling angle is 90°

在图 8 中可以清楚地看到, 经过波形分解处理过的激光回波信号里的杂波要明显少于只经过滤波处理的激光回波信号, 且其波形形状相对而言更加均匀。

分别依据滤波后的激光回波信号数据和处理过后的激光回波信号数据, 直接通过滤波反投影算法分别重构出目标的二维轮廓图像, 成像结果如图 9 所示。

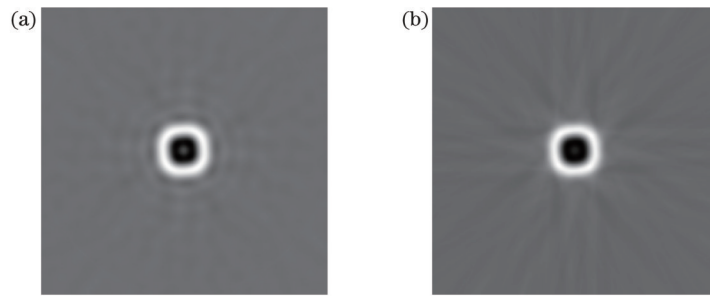


图 9 重构图像。(a) 未经处理的重构图像; (b) 经过波形分解处理的重构图像

Fig. 9 Reconstructed images. (a) Unprocessed reconstructed image; (b) reconstructed image after waveform decomposition

从成像结果中可看出, 直接通过滤波后的投影数据所得到的目标重构图像中出现了很多环状伪影, 而由于在波形分解时去除了原始激光回波信号中的许多杂波, 在经过波形分解处理后的目标重构图像相比之下几乎将这些环状伪影全部消除了。同时, 该方法还有效地消除了原始图像中存在的白噪声, 从而使重构图像的信噪比得到了提升。

为了客观地体现本文方法的优化效果, 在此引入图像质量评价方法中常用的峰值信噪比 (PSNR) 来对两幅图像进行客观评价。峰值信噪比的计算表达式为

$$R_{\text{PSNR}} = 10 \lg \left(\frac{255^2}{E_{\text{MSE}}} \right), \quad (9)$$

式中, E_{MSE} 为均方差, 表示为

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g(i, j) - h(i, j)]^2}{M \cdot N}, \quad (10)$$

式中: g 为理想图像; h 为重构图像; M 、 N 分别表示图

片的长、宽。由此求解得到优化前重构图像的 PSNR 为 16.5, 优化后重构图像的 PSNR 为 17.8, 这也验证了本文方法的优化效果。

为进一步证明激光回波波形分解在 LRTI 技术中的应用效果, 本文比较了在多个采样角度间隔下的重构图像。图 10(a)、10(b) 分别表示采样角度间隔为 3° 、 5° 时的原始重构图像, 图 10(c)、10(d) 分别表示采样角度间隔为 3° 、 5° 时经过波形分解处理后的重构图像。可以看到, 在不同采样角度间隔下, 激光回波波形分解在 LRTI 技术中的应用效果仍然较佳, 其能够较好地消除环状伪影和噪声带来的影响, 有利于重构图像质量的提升。

5 结 论

本文提出了一种基于激光回波波形分解的 LRTI 方法, 该方法通过将波形分解的处理方法应用到 LRTI 技术中, 实现了对激光回波信号中的杂波消除

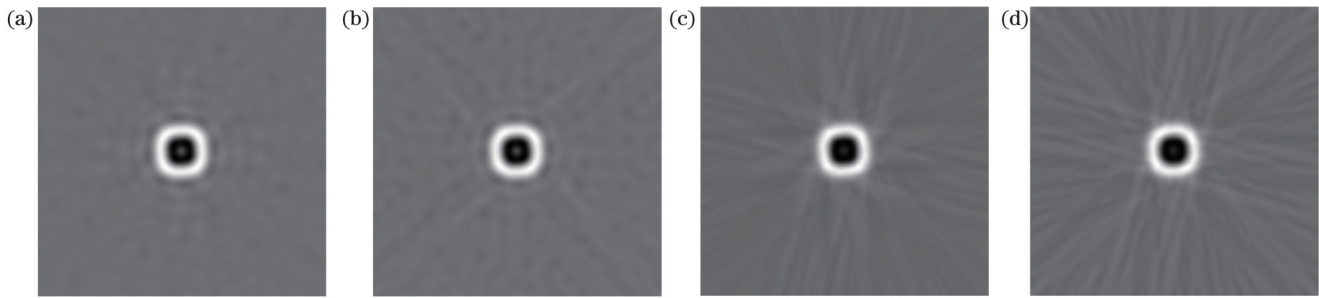


图 10 重构图像。(a)、(b)采样角度间隔为 3° 、 5° 时的原始重构图像；(c)、(d)采样角度间隔为 3° 、 5° 时经过波形分解处理后的重构图像

Fig. 10 Reconstructed images. (a), (b) Original reconstructed images when sampling angle intervals are 3° and 5° , respectively; (c), (d) reconstructed images after waveform decomposition when sampling angle intervals are 3° and 5° , respectively

与波形矫正。此外,还开展了探测距离约为 200 m 的 LRTI 验证实验,利用实验数据验证了激光回波波形分解方法在 LRTI 中的应用效果。实验结果表明,在应用于较复杂环境下的 LRTI 技术中,引入波形分解方法能够较好地消除由杂波带来的环状伪影和大部分噪声,且在不同的采样角度间隔下均具有良好的应用效果,这将有助于提升 LRTI 技术的重构图像质量。

参 考 文 献

- [1] 龚文林, 孙建锋, 邓陈进, 等. 基于相干探测的单像素激光成像雷达研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011003.
Gong W L, Sun J F, Deng C J, et al. Research progress on single-pixel imaging lidar via coherent detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011003.
- [2] 刘东, 陈斯婕, 刘群, 等. 星载环境探测激光雷达及其关键技术[J]. 光学学报, 2022, 42(17): 1701001.
Liu D, Chen S J, Liu Q, et al. Spaceborne environmental detection lidar and its key techniques[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(17): 1701001.
- [3] 徐国权, 张一帆, 万建伟, 等. 高分辨率三维成像激光雷达的应用[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1628002.
Xu G Q, Zhang Y F, Wan J W, et al. Application of high-resolution three-dimensional imaging lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1628002.
- [4] 胡以华, 张鑫源, 徐世龙, 等. 激光反射层析成像技术的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401002.
Hu Y H, Zhang X Y, Xu S L, et al. Research progress of laser reflective tomography techniques[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401002.
- [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(13): 2642-2643.
- [6] 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.
- [7] Jin X F, Sun J F, Yan Y, et al. Feature tracking for projection registration in laboratory-scale reflective tomography laser radar imaging[J]. Optics Communications, 2010, 283(18): 3475-3480.
- [8] Gerchberg R W, Saxton W O, Laboratory C, et al. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. Optik, 1972, 35: 237-246.
- [9] Jin X F, Sun J F, Yan Y, et al. Application of phase retrieval algorithm in reflective tomography laser radar imaging[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(1): 012801.
- [10] 翟福琪, 胡以华, 冷蛟峰. 基于啁啾脉冲的反射层析激光雷达成像[J]. 光电工程, 2012, 39(4): 55-59.
Qu F Q, Hu Y H, Leng J F. Reflective tomography lidar imaging based on chirped pulse signal[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(4): 55-59.
- [11] Wang J C, Zhou S W, Shi L, et al. Image quality analysis and improvement of Lidar reflective tomography for space object recognition[J]. Optics Communications, 2016, 359: 177-183.
- [12] 林放, 王金诚, 张华, 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.
Lin F, Wang J C, Zhang H, et al. Application of multi-frame iterative blind deconvolution method in laser reflective tomography imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0911001.
- [13] 闫斌, 李磊. CT 图像重建算法[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Yan B, Li L. CT image reconstruction algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [14] 杨彪, 胡以华, 李敏乐, 等. 激光反射断层成像目标的重构建模仿真[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1128002.
Yang B, Hu Y H, Li M L, et al. Modeling and simulation of target reconstruction by laser reflection tomography[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1128002.
- [15] 张鑫源, 胡以华, 谌诗洋, 等. 公里级激光反射层析实验和碎片质心估计[J]. 物理学报, 2022, 71(11): 114205.
Zhang X Y, Hu Y H, Chen S Y, et al. Kilometer-level laser reflective tomography experiment and debris barycenter estimation[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(11): 114205.
- [16] 王滨辉, 宋沙磊, 龚威, 等. 全波形激光雷达的波形优化分解算法[J]. 测绘学报, 2017, 46(11): 1859-1867.
Wang B H, Song S L, Gong W, et al. Optimization decomposition method of full-waveform LiDAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(11): 1859-1867.
- [17] 王俊宏. LIDAR 数据处理关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
Wang J H. Research on the key techniques of the airborne LIDAR data processing[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [18] 赖旭东, 秦楠楠, 韩晓爽, 等. 一种迭代的小光斑 LiDAR 波形分解方法[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(4): 319-324.
Lai X D, Qin N N, Han X S, et al. Iterative decomposition method for small foot-print LiDAR waveform[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(4): 319-324.
- [19] Song S L, Wang B H, Gong W, et al. A new waveform decomposition method for multispectral LiDAR[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 149: 40-49.
- [20] 李洪鹏, 李国元, 蔡志坚, 等. 全波形激光雷达回波分解方法[J]. 遥感学报, 2019, 23(1): 89-98.
Li H P, Li G Y, Cai Z J, et al. Full-waveform LiDAR echo decomposition method[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23

- (1): 89-98.
[21] 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: 93-105.
Zhou D L. Study on key technologies of spaceborne laser

reflection tomography imaging[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 93-105.

Optimization Method for Laser Reflective Tomography Imaging Based on Waveform Decomposition

Liu Yifan^{1,2,3}, Hu Yihua^{1,2,3*}, Xu Shilong^{1,2,3**}, Wang Yicheng^{1,2,3}, Han Fei^{1,2,3}, Shi Liang^{1,2,3},
Zhang Xinyuan^{1,2,3***}

¹State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei
230037, Anhui, China;

²Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, National University of Defense Technology, Hefei
230037, Anhui, China;

³Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction, National University of Defense Technology, Hefei
230037, Anhui, China

Abstract

Objective With the deepening research on space exploration, the photoelectric reconnaissance technology of various space targets has made great progress. Although this technology has been gradually improved, the problem of high-precision reconnaissance for long-range space targets has not been well solved. At present, the mainstream space photoelectric detection system is still based on the traditional optical system, which is limited by its diffraction limit, effective aperture, and other factors. This space photoelectric reconnaissance technology based on the traditional optical imaging theory is usually unable to perform in the field of remote accurate detection and imaging. Laser reflective tomography imaging (LRTI), as a new remote and high-precision space target detection method, has more advantages in high-precision imaging of remote targets. 1) LRTI is easy to implement in principle and easy to construct system structure. 2) The imaging resolution of LRTI is mainly related to the pulse width of the emitted light, the performance of the detector, and the signal-to-noise ratio, but is relatively unrelated to the detection distance and receiving aperture. 3) LRTI adopts the method of direct detection. It mainly receives the energy information from the laser echo signal reflected by the target, which is relatively less interfered with by atmospheric turbulence and other factors. Thus, LRTI has better applicability and practicability, and better application prospect in remote detection. Additionally, the imaging optimization method as the core of LRTI becomes the focus of many researchers. At present, the optimization schemes for LRTI quality usually start from the reconstruction algorithm, rotation center registration, subsequent image processing, and so on, but cannot eliminate the influence of image artifacts caused by noise and waveform distortion caused by turbulence. The noise and distortion doped in the laser echo signal greatly reduce the image quality optimization effect of the above schemes, and result in more complicated algorithm processing. Therefore, it is of great significance to develop a LRTI optimization method that can start from the echo signals.

Methods We study the related problems of LRTI quality optimization, apply the echo decomposition method to the LRTI optimization method, and propose a LRTI quality optimization method based on echo decomposition. This method aims to suppress the influence of waveform distortion and noise by adjusting and optimizing the waveform of laser echo signals. The proposed method employs layer by layer stripping method to decompose the laser echo signal into several waveform components and filter the waveform components containing target information through a preset noise threshold. After obtaining the wave components that meet the conditions, these wave components are combined to obtain a more real laser echo signal, and then the target image is reconstructed through the reconstruction algorithm.

Results and Discussions We build an experimental platform for LRTI and collect the projection data of the cube at a distance of 200 m (Fig. 6). The method put forward in our study is adopted to optimize the laser echo signal, and then the target image is reconstructed through the filtered back projection (FBP) algorithm (Fig. 9). The results show that when the same set of projection data is utilized, the peak signal to noise ratio (PSNR) before and after optimization by the proposed method is 16.5 and 17.8 respectively, with improved quality of the reconstructed image. At the same time, in terms of

subjective visual perception, the artifact and noise of the optimized image are significantly less than those of the original image. This shows that the optimization method of LRTI based on waveform decomposition can effectively improve the quality of the reconstructed image, and better eliminate the influence of most ring artifacts and noise in the reconstructed image. This conclusion is still applicable under different sampling angle intervals (Fig. 10).

Conclusions We propose a method of LRTI based on laser echo waveform decomposition. By applying the waveform decomposition processing method to the LRTI technology, this method realizes the clutter elimination and waveform correction in the laser echo signal. In addition, a LRTI verification experiment with a detection distance of about 200 m is carried out to verify the application effect of the laser echo waveform decomposition method in LRTI. The experimental results indicate that in the LRTI technology applied in more complex environments, the introduction of the waveform decomposition method can better eliminate the influence of ring artifacts and most of the noise caused by clutter, and has sound application effects at different sampling angle intervals. This will help to improve the quality of the reconstructed images of LRTI technology.

Key words remote sensing and sensors; reflective tomography; lidar; waveform decomposition; image optimization