

## 基于调制传递函数的激光反射层析成像质量评价方法

刘一凡<sup>1,2</sup>, 胡以华<sup>1,2\*</sup>, 张鑫源<sup>1,2</sup>, 王一程<sup>1,2\*\*</sup>, 韩飞<sup>1,2</sup>, 徐世龙<sup>1,2</sup>, 董骁<sup>1,2</sup><sup>1</sup>国防科技大学电子对抗学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;<sup>2</sup>国防科技大学电子对抗学院电子制约技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 激光反射层析成像技术作为实现空间目标远距离、高精度探测的有效途径之一,其成像质量的优劣对目标的探测精度有着很大的影响。将调制传递函数引入到激光反射层析成像质量评价中,通过求解激光反射层析成像系统的调制传递函数,得到变量为距离分辨率的调制传递函数曲线,在无需先验图像的情况下实现了对激光反射层析成像质量的定量评价,并搭建实验系统进行了验证。实验结果表明,基于调制传递函数曲线得到的距离分辨率与实验系统距离分辨率的理论计算值基本一致,该评价方法能够准确直观地描述激光反射层析成像质量。

**关键词** 遥感; 反射层析成像; 调制传递函数; 成像质量; 激光雷达

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220757

## 1 引言

近年来,随着航天事业的发展,对空间目标进行高精度探测的需求越来越迫切,各种空间探测技术应运而生<sup>[1-3]</sup>。传统光学成像技术的成像分辨率受限于系统本身的衍射极限,而且系统成像孔径不能无限增大,在执行远距离高精度探测任务时缺点十分明显<sup>[4]</sup>。激光反射层析成像(LRT)技术是一种可远距离高分辨率成像的新型激光雷达成像技术,其成像分辨率只取决于激光脉冲宽度和探测电路带宽,与探测距离无关<sup>[5]</sup>,在远距离空间目标探测方面具有很大的优势,因此在未来具有极高的应用价值。

1988年,美国林肯实验室的Parker等<sup>[6-7]</sup>将计算机层析成像(CT)的原理引入到激光雷达成像中,首次提出激光反射层析成像的概念;2001年,美国空军研究实验室的Matson等<sup>[8-9]</sup>搭建了HL-CLASS系统对514 km远的卫星进行探测,验证了激光反射层析成像技术应用于远距离探测的可行性;2010年,中国科学院上海光学精密机械研究所的Jin等<sup>[10]</sup>采用脉宽为8 ps的Nd:YAG激光器照射目标,利用滤波反投影得到目标重构图像,并提出了用于校正旋转中心的特征点跟踪法;2014年,本课题组使用波长为532 nm的激光器对40 m外的正方体目标进行探测<sup>[11]</sup>,并在旋转中心校正、目标提取算法<sup>[12-13]</sup>等方面开展了相关研究。

目前,针对激光反射层析成像技术的研究主要集中在实验系统构建、投影数据处理和重构算法等方面,

而成像质量的优劣往往只能依靠目测或特定数值进行评价。成像质量评价作为成像系统优劣的重要表征,是整个评价体系中极为重要的部分,对研发满足空间目标高分辨率探测要求的激光反射层析成像系统具有重要意义。杨彪等<sup>[14-16]</sup>提出了采用相对均方根误差、归一化均方根距离以及图像相似性系数等数值相结合的方法来定量评估激光反射层析成像质量;Chen等<sup>[17]</sup>提出了通过比较目标重建图像与原始图像的几何尺寸来定量评估成像质量的评价方法。这些方法虽然在一定程度上能够对重构图像的质量进行评价,但是无法将评价结果反馈到成像系统中。同时,这些方法均需要通过对比重构图像与先验图像才能得到重构图像的质量信息;由于采用的是整幅图像与先验图像进行对比,这些方法也极易受到伪影等因素的干扰,在较复杂情况下评价结果存在较大偏差,且空间目标通常为非合作目标,获取目标先验图像也是十分困难的。因此,研究一种无需先验图像便能够准确评价激光反射层析成像质量的方法具有重要意义,这将有助于针对性地对成像系统及算法性能进行改进和提升,便于筛选质量更高的重构图像并节约系统设计成本,对推进激光反射层析成像技术的实际应用具有重要意义。

本文研究了基于调制传递函数(MTF)的激光反射层析成像质量评价方法,通过将传统光学成像质量评价方法中的调制传递函数概念引入到激光反射层析成像质量评价体系中,达到了在没有先验图像作为参考的情况下通过基于距离分辨率的调制传递函数曲线

收稿日期: 2022-04-13; 修回日期: 2022-05-11; 录用日期: 2022-05-24; 网络首发日期: 2022-06-03

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)、湖南省研究生科研创新项目(CX20220007)、脉冲功率激光技术国家重点实验室基金(SK12020ZR09, KY21C604)、电子对抗学院基金(KY21C220)

通信作者: \*skl\_hyh@163.com; \*\*skl\_wyc@163.com

来准确评价激光反射层析成像质量的目的,并通过实验验证了该方法的可行性。

## 2 LRT 原理及质量评价方法

### 2.1 LRT 原理

激光反射层析成像是计算机层析成像的基础上发展而来的<sup>[18]</sup>,利用目标的距离深度信息,通过探测目标反射的激光回波信号进行图像重构并获得目标轮廓信息。激光反射层析成像的原理如图 1 所示。

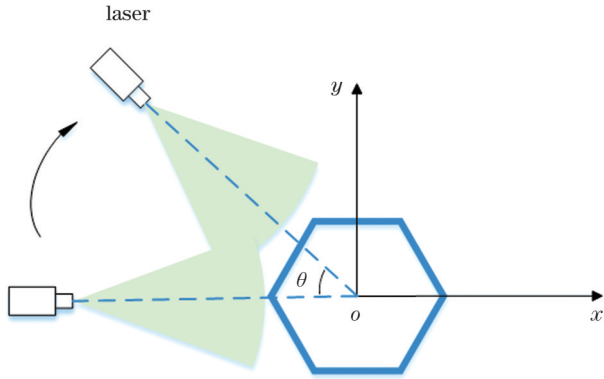


图 1 激光反射层析成像的原理

Fig. 1 Principle of laser reflective tomography

可视为平行光的激光光束照射在目标物体表面,由于激光无法穿透目标,目标表面的反射率分布系数  $r(x, y, z)$  在除目标表面外的其他点处均为零<sup>[19]</sup>。假设照射的角度为  $\theta$ , 其投影分布为

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

式中:  $S_{r, \theta}$  为垂直于激光入射方向的平面;  $M$  为三维目标表面的点集;  $s$  为面元。进行多个角度的回波信号采样, 得到多组一维“时间-强度”回波波形, 再经过回波数据解卷积等处理后, 利用重构算法便能够重建出可反映目标轮廓的二维图像。其中, 回波信号  $w(r, \theta)$  可视为入射的激光脉冲波形  $g$  与目标表面反射率投影分布  $p(r, \theta)$  的卷积<sup>[20]</sup>, 即

$$w(r, \theta) \propto p(r, \theta) \otimes g + \xi(r, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(r, \theta) \cdot g(r-s) ds + \xi(r, \theta), \quad (2)$$

式中:  $\xi(r, \theta)$  为加性噪声。

滤波反投影算法是 LRT 重构算法中最常用的一种方法, 该算法较为成熟且运算速度较快, 在采样角度完全、采样频率较高的情况下, 所得到的重构图像较为清晰准确。

在采集到回波数据后, 根据傅里叶切片定理, 投影数据与重建出的目标横截面图像间的变换关系为

$$F_1[p(r, \theta)] = F_2[f(x, y)], \quad (3)$$

式中:  $F_1$  与  $F_2$  分别表示一维和二维傅里叶变换。根据直角坐标系与极坐标系的对应关系以及傅里叶变换对

的旋转性, 最终可得到目标横截面轮廓的重构图像为

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n P_{\theta_i}(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) \Delta \theta, \quad (4)$$

式中:  $\Delta \theta$  表示采样角度间隔;  $P_{\theta_i}$  表示  $\theta_i$  角度时的回波投影数据;  $n$  表示总采样次数;  $i$  表示第  $i$  次采样。

### 2.2 基于 MTF 的 LRT 质量评价方法

调制传递函数是评价传统光学系统成像质量的重要方法之一, 是调制度随空间频率变化的函数, 可由输出图像调制度与输入图像调制度的比值表征。通常情况下, 调制传递函数越高, 所表示的成像质量就越高。空间频率  $f$  处的调制传递函数表示为

$$F_{MT}(f) = \frac{M'(f)}{M(f)}, \quad (5)$$

式中:  $M(f)$  与  $M'(f)$  分别表示目标物体输入图像与输出图像的调制度。调制度的定义为最大亮度和最小亮度之差与它们之和的比值, 即

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (6)$$

式中:  $I_{\max}$  与  $I_{\min}$  分别为亮度的最大值和最小值。由此可见, 调制度取值范围应为  $(0, 1)$ <sup>[21]</sup>。

调制传递函数通常能够准确评价传统光学系统或光学镜头的成像质量, 但是激光反射层析成像系统与传统光学系统有着很大的差异: 一是激光反射层析成像系统的成像过程更为复杂, 探测端只能接收到目标深度信息与时间的一维回波数据, 需要通过重构算法处理回波数据才能够获得目标的轮廓图像, 并不能直接对目标本身进行成像; 二是影响两者成像质量的参数不同; 三是在激光反射层析成像过程中会产生伪影等干扰因素, 这是传统光学成像系统所不具有的。因此, 本文将引入传统光学系统评价方法中的调制传递函数概念建立如下模型进行讨论。

选取反射率分布均匀的目标, 通过激光反射层析成像系统对该目标进行成像, 得到目标在垂直于探测方向上的投影图像, 并截取部分含有目标边缘信息的重构图像。该标靶可用阶跃函数表示为

$$g(x) = s(x)I(y), \quad (7)$$

式中:  $s(x)$  为系统阶跃响应;  $I(y)$  为输入信号。

在得到标靶图像后便可从中提取边缘扩散函数 (ESF)。边缘扩散函数 ( $F_{ES}(x)$ ) 可视为该成像系统的点扩散函数 (PSF) 与该阶跃函数的卷积<sup>[22]</sup>, 表示为

$$F_{ES}(x) = g(x) * F_{PS}(x), \quad (8)$$

式中:  $F_{PS}(x)$  为点扩散函数。同时, 根据线性叠加原理, 边缘扩散函数与线扩散函数 (LSF) 存在关系, 可将边缘扩散函数视作线扩散函数 ( $F_{LS}(x)$ ) 的积分, 表示为

$$F_{ES}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F_{LS}(x) dx. \quad (9)$$

反之, 便可通过对边缘扩散函数求微分来得到线

扩散函数,即

$$F_{LS}(x) = \frac{d}{dx} F_{ES}(x) \quad (10)$$

获得线扩散函数后,对其进行平滑处理后再作拟合处理,得到较为准确的线扩散函数,对拟合后的线扩散函数进行一维傅里叶变换,得到该激光反射层析成像系统的光学传递函数(OTF)。对光学传递函数( $F_{OT}$ )取模,可得到该系统的MTF曲线,即

$$F_{MT} = |F_{OT}| \quad (11)$$

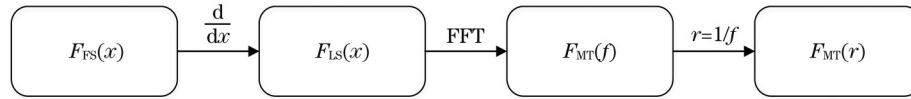


图 2 LRT 质量的求解过程

Fig. 2 Solving process of LRT quality

### 3 实验结果与分析

本实验探测距离为 0.2 km。实验系统的发射端采用波长为 1064 nm 的窄脉冲调 Q 激光器,所发射出的激光脉冲的脉冲宽度为 93 ps,单脉冲能量为 10  $\mu$ J。通过

但是,由此得到的 MTF 值是关于空间频率的函数,为了更好地描述激光反射层析成像质量,可依据空间频率与距离分辨率的关系进行代换,得到基于距离分辨率的 MTF 曲线,以此实现对激光反射层析成像质量的评价。在本文研究的方法中,空间频率和距离分辨率的关系为

$$r' = \frac{1}{f} \quad (12)$$

式中: $r'$ 为距离分辨率。求解过程如图 2 所示。

两个反射镜调整激光脉冲的方向,调节好的激光光束入射到扩束系统后照射并覆盖目标。两个反射镜间有一个消偏振分光棱镜将原激光光束分为两路,一路作为探测光束照射目标,另一路光束入射到系统探测端作为延时触发信号使用。实验系统结构示意图如图 3 所示。

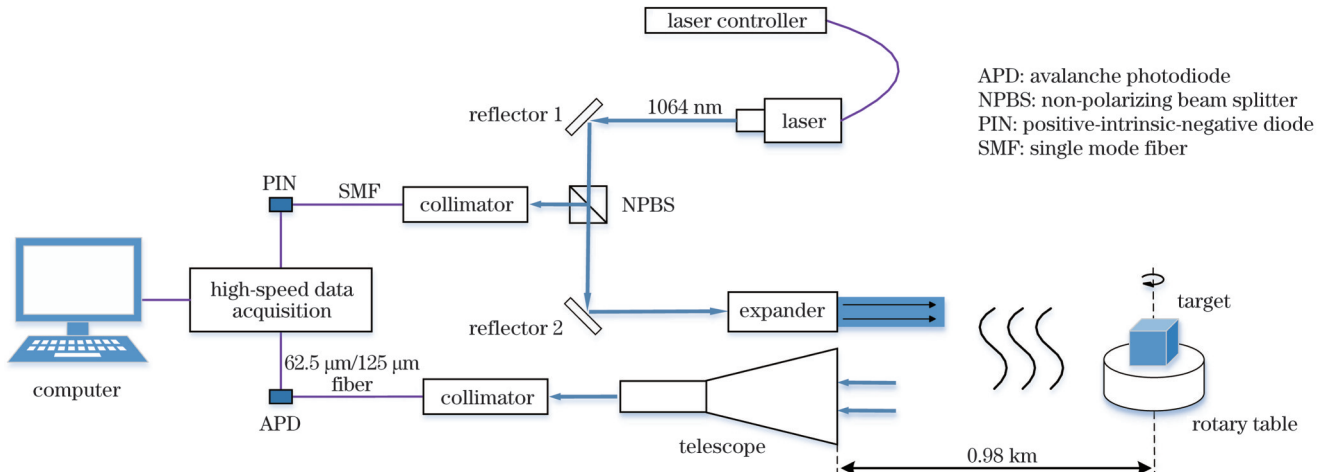


图 3 LRT 系统结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of LRT system

探测端采用的雪崩光电二极管(APD)带宽为 7.5 GHz,灵敏度为 -25.5 dBm;望远系统口径为 10 cm,视场角为 0.3 mrad。两者通过多模光纤相连。激光脉冲经目标表面调制后,反射光被探测端望远系统接收,多模光纤将接收到的反射光信号传输至 APD 探测系统中,然后输入到数据采集系统生成目标的回波信号,最后通过数据处理系统将采集到的所有回波信号进行处理,根据重构算法得到目标的重构图像。

实验选取边长为 8 cm 的正方体模型作为激光反射层析成像目标,将其放置在由控制机操控的转台上,按照 1°的步进角度旋转目标,每旋转一次目标便采集该角度下目标的回波信息,直至采集到 360 组回波数据,实现对目标的 360°完全角度采样。对回波数据进

行配准处理后,选择 Ram-Lak 滤波器作为滤波算子,通过滤波反投影算法对目标物体进行成像,得到目标的二维轮廓图像。

与传统光学成像系统所得的图像不同,激光反射层析成像系统所得到的重构图像只包含目标的轮廓信息,并不是对目标物体直接成像。因此,可从重构图像中提取包含目标轮廓的部分,对该部分进行归一化处理,得到可表征目标轮廓亮度分布的灰度图像。重构图像与截取图像如图 4 所示。

根据该灰度分布矩阵,寻找每一行数据的最大值作为临界点,将该矩阵分割为两部分,并选取靠近背景一侧的图像作为后续处理的矩阵。对该图像沿横轴方向进行差分和平滑处理,使用最大类间方差(OTSU)

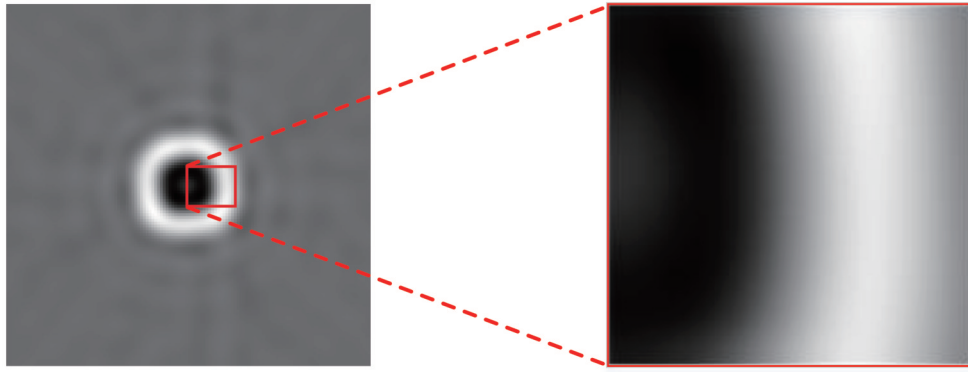


图 4 截取的含有目标边缘信息的图像

Fig. 4 Intercepted image containing target edge information

法得到图像全局阈值,通过 Canny 算子检测和定位边缘位置和方向。确定边缘区域后,通过边缘点附近的灰度值求解 ESF 曲线并作平滑处理,结果如图 5 所示,横轴表示像素点与边缘点的距离,负值表示像素点在边缘点的左侧,正值表示像素点在边缘点的右侧。

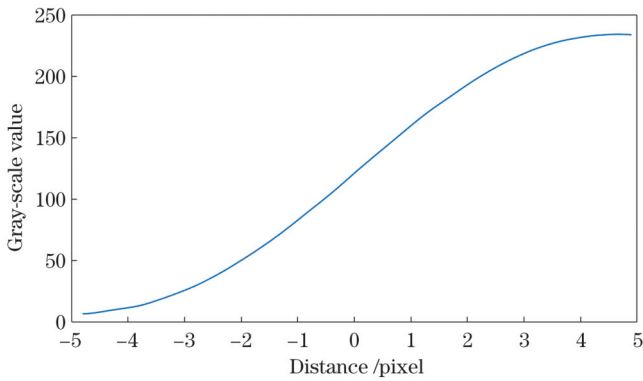


图 5 平滑后的边缘扩散函数曲线

Fig. 5 Smoothed edge spread function curve

求解 ESF 的目的在于绘制 LSF 曲线。LSF 是线光源(宽度趋近于 0)成像后光线的光照度或亮度分布情况的数学描述。但是该线光源的要求十分苛刻,因此在实际应用过程中可通过对 ESF 求导获得 LSF 曲线。对求解的 LSF 曲线进行拟合,所得结果如图 6 所示。

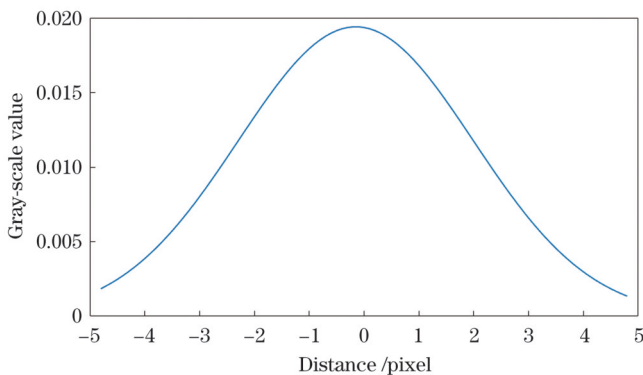


图 6 拟合后的线扩散函数曲线

Fig. 6 Fitted line spread function curve

对 LSF 曲线作傅里叶变换,得到激光反射层析成像系统的 MTF 值,同时通过空间取样间隔与对应频率间隔的关系,绘制激光反射层析成像系统的 MTF 曲线。频率域与对应离散空间变量间隔的关系为

$$\Delta u = \frac{1}{N \cdot \Delta x}, \quad (13)$$

式中: $\Delta u$  为空间频率间隔; $N$  为采样数量; $\Delta x$  为空间间隔。此时该 MTF 曲线是关于空间频率的函数,通过空间频率与距离分辨率的关系,可以求解得到 MTF 值与距离分辨率的关系曲线,再通过高斯拟合的方法得到较为准确的 MTF 曲线,结果如图 7 所示。

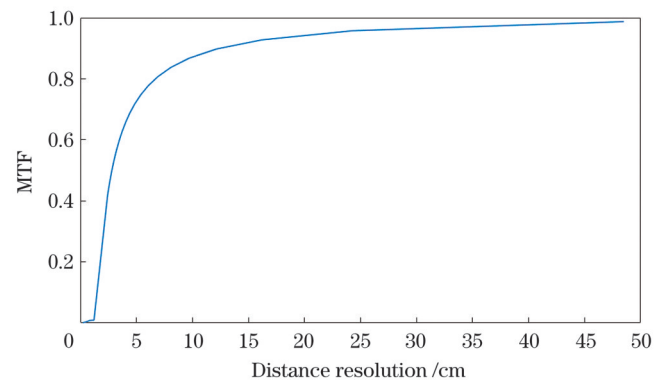


图 7 基于距离分辨率的 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curve based on distance resolution

从图 7 可以看出,随着距离分辨率的增大,MTF 值越来越大,即成像质量越来越好。当 MTF 值接近 1.0 时,表示激光反射层析成像系统在此距离分辨率下可获得目标的绝大部分轮廓信息,能够得到质量较高的目标图像;当 MTF 值趋近 0 时,该成像系统在对应距离分辨率处的成像质量很差,无法满足目标成像的距离分辨率要求。

在理论上,激光反射层析成像系统的距离分辨率计算表达式为

$$\Delta R = \frac{c \cdot \tau}{2}, \quad (14)$$

式中: $c$  为光速; $\tau$  为脉宽。但在实际情况下,激光反射层析成像链路中的每个部分都会对成像质量产生一定

的影响。在探测电路带宽无法满足理想实验要求的情况下,激光脉冲会产生一定程度的展宽<sup>[23]</sup>,此情况下的激光脉冲宽度为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{APD}}^2 + \sigma_{\text{P}}^2 + \sigma_{\text{AD}}^2}, \quad (15)$$

式中: $\sigma_{\text{P}}$ 为激光脉冲引起的误差; $\sigma_{\text{AD}}$ 为高速数据采集引起的时间误差; $\sigma_{\text{APD}}$ 为 APD 探测器的时间响应误差。

本实验中,激光脉冲引起的误差 $\sigma_{\text{P}} = 40.4 \text{ ps}$ ,高速数据采集引起的时间误差 $\sigma_{\text{AD}} = 82.35 \text{ ps}$ ,APD 探测器的时间响应误差 $\sigma_{\text{APD}} = 46.67 \text{ ps}$ 。综合考虑探测器响应时间、数模转换(AD)数据采集模块时间误差等因素后,本实验系统的距离分辨率约为 1.54 cm。

在 MTF 曲线的实际应用中,当 MTF 值低于 5%~10% 时对比度过低,从而观察者无法清晰辨别其差异。因此,过分追求 MTF 为 0 时的距离分辨率是没有意义的,通常以 MTF 值为 5%~10% 时所对应的距离分辨率作为成像系统能够达到的成像分辨率。在图 7 中,MTF 值为 10% 时所对应的距离分辨率为 1.587 cm,这与之前通过计算得到的距离分辨率大致相等。同时,由于重构算法、拟合方式以及计算误差等因素的影响,MTF 值为 10% 时所对应的距离分辨率存在轻微波动的现象,两者之间仍存在些许的误差,但是误差较小,该 MTF 曲线仍能够较准确直观地描述激光反射层析成像系统的成像质量。

为了验证本文方法的准确性,根据式(14)、(15)计算得到系统的距离分辨率和激光脉冲宽度,由此仿真得到的理想重构图像如图 8 所示。



图 8 理想重构图像

Fig. 8 Ideal reconstructed image

利用本文方法绘制的理想重构图像与实验重构图像的 MTF 曲线如图 9 所示。可以看出,通过本文方法求得理想重构图像 MTF 曲线与实验重构图像的 MTF 曲线基本一致,两者对应的距离分辨率与计算值几乎相等,这也验证了本文方法的准确性。

相比于基于不同数值相结合的评价方法,基于 MTF 曲线的 LRT 质量评价方法的优势在于:

1) 数值评价方法需要先验图像作为参考,由于在实际应用中所探测的目标通常为非合作目标,几乎无法获取目标的先验图像,因此应用场景较为有限。本

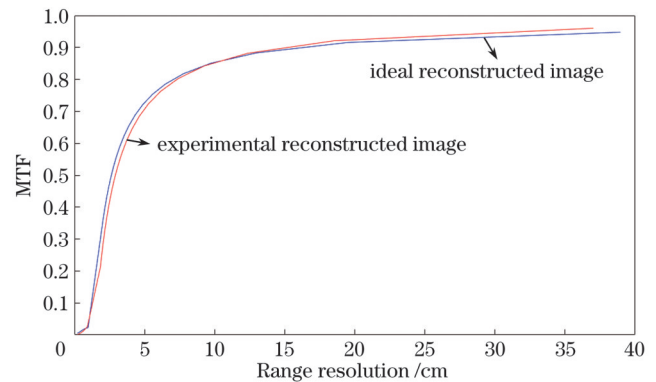


图 9 理想重构图像与实验重构图像的 MTF 曲线

Fig. 9 MTF curves of ideal reconstructed image and experimental reconstructed image

文提出的评价方法无需先验图像,仅靠最终得到的重构图像即可实现对 LRT 质量的评价。

2) 数值评价方法通常以整幅图像作为输入图像,受伪影等因素的影响较大,甚至可能出现质量较差的图像反而数值更大的情况,评价结果误差较大。本文提出的评价方法只截取含有边缘信息的部分图像,几乎不受伪影的影响,所得结果更为准确。

3) 数值评价方法的输出结果为某一数值或多个数值的结合,仅能代表重构图像质量的优劣,所表征的信息有限。而本文提出的评价方法可直观地反映 LRT 系统在不同距离分辨率情况下的成像质量,所含信息更加丰富。

## 4 结 论

研究了一种激光反射层析成像质量的评价方法,通过将调制传递函数引入到激光反射层析成像质量评价体系中,得到了变量为距离分辨率的调制传递函数曲线,建立了基于调制传递函数的激光反射层析成像质量评价模型,达到了在没有任何先验图像的情况下定量评价激光反射层析成像质量的目的。搭建了相关激光反射层析成像实验系统,利用所建立的模型对该实验系统进行评价。实验结果表明:基于调制传递函数曲线得到的距离分辨率为 1.587 cm,这与实验系统距离分辨率的理论计算值 1.54 cm 几乎相等。基于调制传递函数的激光反射层析成像质量评价模型能够准确直观地反映该系统在不同距离分辨率要求下的成像质量。

## 参 考 文 献

- [1] 徐森,史浩东,王超,等.空间目标多维度探测与激光通信一体化技术研究[J].中国激光,2021,48(12):1206002.  
Xu M, Shi H D, Wang C, et al. Technology for integrating space object multidimensional detection and laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1206002.
- [2] 邓诗宇,刘承志,谭勇,等.空间目标多种光谱观测方法的应用研究[J].激光与光电子学进展,2021,58(22):2230001.  
Deng S Y, Liu C Z, Tan Y, et al. Application of multiple spectral observation methods of space targets[J]. Laser & Optoelectronics

- Progress, 2021, 58(22): 2230001.
- [3] 杨晋生, 李天骄. 天基空间目标场景成像仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(8): 0811004.  
Yang J S, Li T J. Simulation of space-based space target scene imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(8): 0811004.
- [4] 刘磊, 曹建峰. 基于天基光学测角的高轨空间目标轨道确定[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1912002.  
Liu L, Cao J F. Orbit determination of high-orbit space targets based on space-based optical angle measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1912002.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [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] Matson C L. Short pulse length heterodyne laser radar reflective tomography: projection generation and signal-to-noise ratios[J]. Optics Communications, 1997, 137(4/5/6): 343-358.
- [9] Matson C L, Mosley D E. Reflective tomography reconstruction of satellite features-field results[J]. Applied Optics, 2001, 40(14): 2290-2296.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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, 112.  
Zhou D L, Huang G H, Shi L, et al. Laser reflective tomography projection registration method of non-cooperative target[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(21): 104-107, 112.
- [13] Zhang X Y, Hu Y H, Xu S L, et al. Application of image fusion algorithm combined with visual saliency in target extraction of reflective tomography lidar image[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 2022: 8247344.
- [14] 杨彪, 胡以华, 林放. 激光反射断层成像相位恢复方法[J]. 光子学报, 2018, 47(4): 0407001.  
Yang B, Hu Y H, Lin F. Research of phase retrieval method in laser reflective tomography imaging[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(4): 0407001.
- [15] 杨彪, 胡以华. 代数迭代法在激光反射断层成像目标重构中的应用[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7): 0726002.  
Yang B, Hu Y H. Laser reflection tomography target reconstruction algorithm based on algebraic iteration[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(7): 0726002.
- [16] 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.  
Gu Y, Hu Y H, Hao S Q, et al. Study on influence of filter back-projection on laser reflective tomography[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(12): 1500-1504.
- [17] Chen J B, Sun H Y, Zhao Y Z, et al. Typical influencing factors analysis of laser reflection tomography imaging[J]. Optik, 2019, 189: 1-8.
- [18] 陈剑彪, 孙华燕, 赵融生, 等. 基于距离分辨的激光雷达技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(8): 0805007.  
Chen J B, Sun H Y, Zhao R S, et al. Research development of range-resolved laser radar technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(8): 0805007.
- [19] 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, Shen S Y, et al. Kilometer-level laser reflective tomography experiment and debris barycenter estimation [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(11): 114205.
- [20] 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.
- [21] 葛莘, 王密, 潘俊, 等. 高分辨率 TDI-CCD 成像数据的自适应 MTF 图像复原处理研究[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(4): 23-28.  
Ge P, Wang M, Pan J, et al. A study of adaptive MTF image restoration of high resolution TDI-CCD image data[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2010, 22(4): 23-28.
- [22] 李航, 颜昌翔, 于平, 等. 红外成像系统的调制传递函数测试[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 698-708.  
Li H, Yan C X, Yu P, et al. Measurement of modulation transfer function for IR imaging system[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(4): 698-708.
- [23] Zhang X Y, Hu Y H, Wang Y C, et al. Determining the limiting conditions of sampling interval and sampling angle for laser reflective tomography imaging in sensing targets with typical shapes [J]. Optics Communications, 2022, 519: 128413.

## Imaging Quality Evaluation Method of Laser Reflective Tomography Based on Modulation Transfer Function

Liu Yifan<sup>1,2</sup>, Hu Yihua<sup>1,2\*</sup>, Zhang Xinyuan<sup>1,2</sup>, Wang Yicheng<sup>1,2\*\*</sup>, Han Fei<sup>1,2</sup>, Xu Shilong<sup>1,2</sup>, Dong Xiao<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction, College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, Anhui, China

### Abstract

**Objective** With the continuous development of space technology, spaceborne long-distance high-precision detection technology has also made great progress. The imaging resolution is greatly limited because of the influence of the diffraction limit, effective aperture,

and other factors of conventional optical imaging technology. Therefore, it is increasingly difficult to meet the needs of high-precision remote detection tasks. As one of the effective ways to realize long-distance and high-precision detection, laser reflective tomography technology has great advantages in the field of long-distance and high-precision detection because its imaging resolution is independent of distance and has high application value in the future. As an important part of the design of a laser reflective tomography system, imaging quality evaluation is of great significance to the application of laser reflective tomography technology. The conventional quality evaluation method of laser reflective tomography usually uses one or more specific values (such as relative root mean square error and image similarity coefficient) as the evaluation standard to realize the quantitative evaluation of the quality of laser reflective tomography. These methods often need a priori image as a reference, and there are large errors and limited scope of application. In this study, we investigate a quality evaluation method of laser reflective tomography. This method does not need an a priori image as a reference, and the result is more accurate. We expect that this method and our findings herein can aid the application of laser reflective tomography.

**Methods** We introduce the concept of modulation transfer function into the quality evaluation method of laser reflective tomography and establish the quality evaluation model of laser reflective tomography based on distance resolution. First, the part containing edge information in the reconstructed image is intercepted, and its edge spread function is obtained. Next, the corresponding line spread function is obtained by differentiating the edge spread function. Then, the line spread function is used to obtain the modulation transfer function curve based on spatial frequency by the Fourier transformation. Finally, according to the relationship between spatial frequency and range resolution, the curve is transformed into a modulation transfer function curve based on range resolution to realize the quantitative evaluation of the quality of laser reflective tomography. In addition, we also set up the corresponding laser reflective tomography system and carry out a laser reflective tomography experiment under the detection distance of 0.2 km. The feasibility and accuracy of this method are verified by comparing the experimental results with the simulation results under ideal conditions.

**Results and Discussions** Through the experiment of laser reflective tomography, we get the reconstructed image of the target (Fig. 4) and successfully draw the modulation transfer function curve based on distance resolution. In this study, the abscissa value corresponding to MTF value of 10% is considered as the test system's limit value of distance resolution. According to the obtained modulation transfer function curve based on distance resolution (Fig. 7), the corresponding distance resolution at MTF value of 10% is approximately 1.587 cm, which is almost equal to the distance resolution (approximately 1.54 cm) obtained by theoretical calculation. With the increasing abscissa of the curve, the MTF value becomes larger and larger, and the imaging quality becomes better. Compared with the ideal image obtained by simulation (Fig. 8), the coincidence degree of their modulation transfer function curves is high, which also reflects the accuracy of the method in this study. In addition, we theoretically analyze the advantages of this method compared with the conventional evaluation methods. On the basis of the results, the modulation transfer function curve based on distance resolution can accurately evaluate the quality of laser reflective tomography.

**Conclusions** We examine a method for evaluating the quality of laser reflective tomography. By introducing the modulation transfer function curve from conventional optical imaging into the quality evaluation of laser reflective tomography, the modulation transfer function curve based on distance resolution is drawn, and a model for evaluating the quality of laser reflective tomography based on the modulation transfer function is established. Quantitative evaluation of the image quality of laser reflective tomography without prior images is achieved. In the experiment, we set up an experimental system of laser reflective tomography and obtain modulation transfer function curves that can characterize the image quality of laser reflective tomography through the reconstructed image of this system, thus verifying this method's feasibility. By solving the transverse coordinates at MTF value of 10%, the distance resolution of the laser reflective tomography system is 1.587 cm, which is approximately equal to the distance resolution (1.54 cm) of the system calculated by theoretical calculation. Moreover, we compare the experimental results with the simulation results and obtain almost identical modulation transfer function curves, thereby verifying the method's accuracy. The results demonstrate that the evaluation method of laser reflective tomography based on modulation transfer function can accurately evaluate the quality of laser reflective tomography without prior images.

**Key words** remote sensing; reflective tomography; modulation transfer function; imaging quality; lidar