



公里级激光反射层析实验和碎片质心估计

张鑫源 胡以华 谌诗洋 方佳节 王一程 刘一凡 韩飞

Kilometer-level laser reflective tomography experiment and debris barycenter estimation

Zhang Xin-Yuan Hu Yi-Hua Shen Shi-Yang Fang Jia-Jie Wang Yi-Cheng Liu Yi-Fan Han Fei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 114205 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220205

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

偏振成像激光雷达与短波红外复合光学接收系统设计与分析

Design and analysis of polarization imaging lidar and short wave infrared composite optical receiving system

物理学报. 2020, 69(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200920>

一种无需定标的地基激光雷达气溶胶消光系数精确反演方法

An accurate inversion method of aerosol extinction coefficient about ground-based lidar without needing calibration

物理学报. 2019, 68(7): 074205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181825>

一种测量大气消光系数边界值的新方法

A new method of measuring boundary value of atmospheric extinction coefficient

物理学报. 2018, 67(5): 054205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172008>

基于拉曼-布里渊散射的海水盐度精细探测遥感方法

Method of remotely sensing seawater salinity fine detection based on Raman Brillouin scattering

物理学报. 2021, 70(22): 229201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210201>

光纤相控阵稀疏排布优化算法对比

Comparison between optimal configuration algorithms of fiber phased array

物理学报. 2021, 70(8): 084205 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201768>

基于两级压缩感知的脉冲星时延估计方法

Pulsar time delay estimation method based on two-level compressed sensing

物理学报. 2018, 67(9): 099701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172100>

公里级激光反射层析实验和碎片质心估计^{*}张鑫源¹⁾²⁾ 胡以华^{1)2)†} 谌诗洋¹⁾²⁾ 方佳节¹⁾²⁾王一程¹⁾²⁾ 刘一凡¹⁾²⁾ 韩飞^{1)2)‡}

1) (国防科技大学, 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

2) (国防科技大学, 电子制约技术安徽省重点实验室, 合肥 230037)

(2022 年 1 月 29 日收到; 2022 年 2 月 27 日收到修改稿)

大功率激光清理低轨大量厘米级空间碎片一直是国际学术研究的热点. 其中, 空间碎片的精确定位和碎片质心距离的高精度测量是关键, 也是亟待解决的世界性难题. 作为一种新型远距离、高分辨率的成像方法, 激光反射层析具有成像分辨率与探测距离无关的优势, 是远距离空间暗目标探测的有效途径. 基于激光反射层析原理, 建立厘米级空间碎片目标质心模型, 分析碎片目标与探测器的相对运动, 进而提出厘米级空间碎片质心距离估计方法, 开展了 1 km 探测距离激光反射层析实验验证. 实验结果表明, 该方法能够将质心探测精度由 1.50 cm 提高到 0.34 cm, 是实现厘米级空间碎片质心距离高精度测量的有效手段. 该研究实现了公里级激光反射层析实验及其理论验证的突破, 具有更广阔的应用前景和技术发展潜力.

关键词: 激光雷达, 反射层析, 质心估计, 公里级实验**PACS:** 42.68.Wt, 06.20.Dk, 93.85.Bc, 42.66.Lc**DOI:** 10.7498/aps.71.20220205

1 引言

随着航天活动的日益频繁, 空间碎片与日俱增, 对近地空间的航天器构成严重威胁. 其中, 尺寸为 1—10 cm 的厘米级空间碎片, 由于数目较多难以主动规避、预警, 且尺寸较大被动防护实施困难, 已经成为对在轨航天器威胁最大的空间碎片^[1,2]. 目前, 对于这类空间碎片清理的一种有效措施是大功率激光清理^[3], 其前提是空间碎片的精确定位和质心距离的高精度测量^[4]. 其中, 亚厘米甚至毫米级精度的质心探测是当今大功率激光清理技术的基础和关键之一. 这是因为, 大功率激光清理的工作原理是让强激光能量会聚于碎片质心, 与碎片发生冲量耦合, 使碎片获得一个速度增量, 而冲量耦

合必须作用于碎片的质心位置, 才能使激光能量合理地与碎片发生作用, 从而推动碎片移向大气层加以销毁, 达到碎片清理的目的^[5]. 当质心探测精度不足时, 冲量耦合作用点偏离质心位置, 碎片移动难以达到预期目标, 无法实现空间碎片激光清理的目的.

厘米级空间碎片质心距离的高精度测量是亟待解决的世界性难题. 迄今为止, 卫星激光测距 (satellite laser ranging, SLR) 是单点测距精度最高的测量技术^[6], 对合作目标的测距精度能够达到亚厘米级^[7,8]. 但是, 对空间碎片这类非合作目标来说, 由于能够返回接收机的回波强度受目标表面漫反射调制, 测量难度远高于合作目标, 实际测距精度仅达到分米级^[9,10]. 此外, 传统的空间碎片激光测距技术忽略了碎片表面形状对激光回波的调制^[11], 只是将其作为理想的点目标处理, 实际探测过程中

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 61871389)、国防科技大学科研计划重大项目 (批准号: ZK18-01-02) 和湖南省研究生科研创新项目 (批准号: CX20190055) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: skl_hyh@163.com

[‡] 通信作者. E-mail: feihan@ustc.edu.cn

即使提高了激光测距系统的距离分辨率,也无法完成对厘米级空间碎片亚厘米级精度的质心探测. 从现有探测技术来看,对厘米级空间碎片质心距离测量,主要依赖于光学或雷达图像^[12–14],通过图像解算得到目标的质心位置. 这类方法要求图像中碎片所占像素数不少于4个,通过算法优化,最终可以达到的质心探测精度约0.5个像素^[15]. 但是,对于厘米级空间碎片来说,碎片在图像中应占据多个像素,在远距离情况下成像系统的单像素分辨率至少达到亚厘米级. 比如,100 km 成像距离要求角分辨率达到0.1 μrad . 传统光学和雷达成像手段从机理上难以达到上述精度要求.

激光反射层析技术 (laser reflection tomography, LRT) 是在计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 基础上发展而来的新型成像探测技术,具有成像分辨率与距离无关的优势,且受外部环境因素影响较小^[16]. 这项技术最早由 Parker 等^[17]于1988年提出,以实际距离分辨率12.6 cm 实现了对10 m 处锥状目标横截面图像的重建工作. Matson 等^[18]利用 HI-CLASS 相干探测激光雷达系统,以成像分辨率约0.2 m 实现了对915 km 高度处在轨 LACE 卫星本体和伸缩臂上两个铰角反射镜的重构成像. Murray 等^[19]开展了基于脉冲压缩的距离分辨 LRT 实验,以成像分辨率15 cm 实现了对22.4 km 处直径1 m 的多个匀速旋转角反射镜的重构成像. 国内方面, Jin 等^[20]以7.5 mm 的距离分辨率实现了对9.1 m 处长、宽、高分别为46 cm, 41 cm, 30 cm 的方形体的重构成像. Lin 等^[21]首次将 LRT 技术应用于平面目标质心探测,提出利用多角度回波数据解算质心距离的方法,以优于5 cm 的探测精度实现了对50 m 处目标(边长为141 cm \times 70 cm、夹角45°的平面四边形)的质心定位. 但是,对于形状复杂的空间碎片目标,由于遮挡效应的影响^[22],某些角度存在不能被照射到的阴影区域,仅依靠多角度激光回波数据难以准确解算得到质心距离. 目前,国内对 LRT 的实验及其理论验证距离通常为10 m 到50 m^[20,21,23]. 要实现千米级 LRT 实验及其理论验证,进一步提高质心探测精度,要求激光器脉冲宽度更窄、高速探测电路带宽更大,同时发射系统参数与光学系统要高度匹配,对光路装调要求也较高.

为此,本文推导出三维目标实际投影的数学表达式,建立了厘米级空间碎片目标质心模型,并通

过分析空间碎片目标与探测器的相对运动,提出了基于 LRT 的厘米级空间碎片质心距离估计方法,开展了1 km 探测距离的实验验证. 相比传统的空间碎片激光测距技术,本文实验使用的 LRT 雷达样机具有更高的距离分辨率,且本文提出的质心估计方法考虑了碎片目标自身形状对回波波形的调制,实现了更高精度的质心探测,从机理上更具优势. 该研究将厘米级空间碎片质心探测精度由1.50 cm 提高到0.34 cm,并实现了千米级 LRT 实验及其理论验证的突破,将具有更广阔的应用前景和技术发展潜力.

2 LRT 原理与空间碎片质心模型

2.1 LRT 原理

LRT 的原理是将目标的一个切平面轮廓在多角度下进行反射投影^[24],某角度下用平行激光束完全覆盖三维目标后得到该角度下包含目标表面反射分布信息的回波数据,并根据反射系数投影分布重建目标的二维截面图像.

探测过程如图1(a)所示,当准直激光束以 ϕ 角照射目标时,目标在该角度下的投影分布表示为

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

式中, $S_{r, \phi}$ 为垂直于激光入射方向的平面, $f(x, y, z)$ 为目标的反射率分布, B 为三维目标表面的点集. 将图1(a)目标进行小面元分解,在 z 轴上分割出一系列小面元,每个小面元反射光强表示为

$$dI_r = \frac{I_0}{r^2} f_r(x, y, z) \cos \theta_\phi ds, \quad (2)$$

式中, I_0 是发射激光脉冲光强, r 是探测距离, θ_ϕ 是小面元的法线与激光照射方向 ϕ 的夹角,

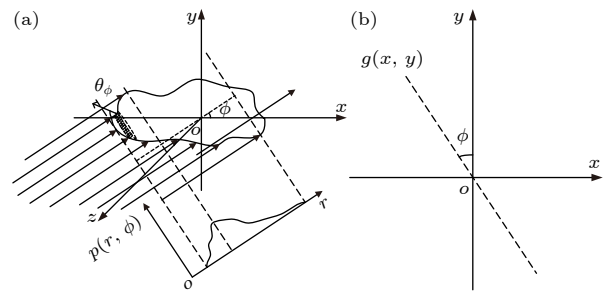


图1 LRT 示意图 (a) 目标投影; (b) 数据反投影

Fig. 1. Schematic diagram of LRT: (a) Target projection; (b) data back-projection.

$f_r(x, y, z)$ 是 BRDF 函数. 如果发射光束满足基模高斯条件, 每个小面元反射光强表示为

$$dI_r = \frac{I_0}{r^2} f_r(x, y, z) \left(\frac{w_0}{w(z)} \right)^2 \exp \left(-\frac{2R^2}{w^2(z)} \right) \cos \theta_\phi ds, \quad (3)$$

式中, w_0 是高斯光束的束腰半径, $w(z)$ 是坐标 z 处的光斑半径. 远场条件下, 每个小面元反射光强表示为

$$dI_r = \frac{I_0}{r^2} f_r(x, y, z) \exp \left(-\frac{R^2}{2r^2\theta_b^2} \right) \cos \theta_\phi ds, \quad (4)$$

式中, R 是面元到 z 轴的距离, θ_b 是激光发散角. 用距离 r 替代 z , 总反射光强表示为

$$I_r = \frac{I_0}{r^2} \oint_{\text{obj}} f_r(x, y, r) \exp \left[\frac{-R(x, y, r)^2}{2r^2\theta_b^2} \right] \times \cos \theta_\phi(x, y, r) dx dy dr, \quad (5)$$

式中, 积分限表示积分在目标表面进行. 根据以上分析, 可以给出照射角度 ϕ 时目标反射系数投影分布的一般表达式如下:

$$p(r, \phi) = \oint_{\text{obj}} f_r(x, y, r) \exp \left[\frac{-R(x, y, r)^2}{2r^2\theta_b^2} \right] \times \cos \theta_\phi(x, y, r) dx dy dr. \quad (6)$$

根据 Lin 等 [21] 建立的回波卷积模型, 回波可以表示为发射脉冲和目标反射系数投影分布的卷积:

$$w(r, \phi) \propto p(r, \phi) \otimes g + \xi(r, \phi) \\ = \int_{-\infty}^{\infty} p(s, \phi) \cdot g(r - s) ds + \xi(r, \phi), \quad (7)$$

其中 $w(r, \phi)$ 是照射角度 ϕ 的回波, g 是入射脉冲波形, $\xi(r, \phi)$ 是加性噪声.

数据反投影示意图如图 1(b) 所示, 在激光束照射区域内展开平行线, 投影距离取决于激光照射区域的深度. 值得注意的是, 不同于 X 射线能够穿透人体, 激光束照射时无法穿透目标, 因此反射率分布仅在目标表面是非零的. 即 $f(x, y, z)$ 表示为

$$f(x, y, z) = 0, (x, y, z) \notin D, \quad (8)$$

式中, D 是目标表面的点集. 根据傅里叶切片定理 [25], 投影数据的一维傅里叶变换 $F_1(p(r, \phi))$ 和目标横截面吸收系数 $g(x, y)$ 的二维傅里叶变换 $F_2(g(x, y))$ 存在如下关系:

$$F_1(p(r, \phi)) = F_2(g(x, y)), \quad (9)$$

式中, F_1 , F_2 分别为一维和二维傅里叶变换. 因此, 获得目标全角度投影数据即可根据下式重建出目

标的横截面图像:

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^n p_{\phi_i} (x \cos \phi_i + y \sin \phi_i) \Delta \phi, \quad (10)$$

需要指出的是, $g(x, y)$ 代表的是目标横截面反射系数分布函数, 投影数据是指单探测器所获得的不同视角的激光反射回波信号并经离散采样后所得到的目标反射激光回波离散数据, 重建出来的图像是目标横截面二维轮廓像. 在实际成像过程中, LRT 采用 (10) 式的离散投影数据来重建图像, 并已证明由完全投影数据可以唯一重建图像. 获取完全投影数据, 就需要保证足够多的投影采样点, 才能保证经过频域变换所得到的目标图像完整、精准.

2.2 基于 LRT 的空间碎片目标质心模型

空间碎片根据形成原因可以有不同的形状, 对于面状空间碎片目标, 利用 LRT 多角度回波数据直接解算质心距离的方法拥有较好的质心定位效果, 且无需对全角度投影数据进行搜集 [21]. 对于形状复杂的碎片目标, 可以采用先成像后估计质心距离的方法. 本文所讨论质心的概念, 都是基于质量密度均匀的假设, 并将目标看作是体积和形状不易发生改变的物体, 即刚体. 在此假设下, 利用 LRT 技术进行精确重建目标几何结构, 实现空间碎片目标质心坐标的精确解算.

典型空间碎片目标, 如末级火箭筒、解体碎片、太阳能帆板等, 平面或近似面状的薄层形状是其最常见的形状, 且近似面状一般在一侧观测为凸面而另一侧观测为凹面. 可以把它们简化成没有厚度的小的曲面元组合而成的组合面, 其中小面元近似用平面元代替. 基于密度均匀假设, 假设面密度为 ρ , 针对目标形状分割为无限小面元 ds , 质心坐标表示为

$$\mathbf{r}_c = \frac{\int_{\text{obj}} \rho \mathbf{r} ds}{\int_{\text{obj}} \rho ds} = \frac{\int_{\text{obj}} \rho \mathbf{r} ds}{\rho A}, \quad (11)$$

式中, \mathbf{r}_c 是碎片质心笛卡尔坐标 (x_c, y_c, z_c) 的矢量形式, 积分限 obj 表示积分在目标空间域内有效, A 是目标的表面积. 这说明要想解算目标的质心, 必须知道其质量随距离的分布规律, 常用的解算方法是利用图像法求解重构图像中质心的位置 [21]. 灰度重心法可以看成以灰度为权值的加权型心法, 灰度图像中目标的灰度重心 (x_0, y_0) 为

$$x_0 = \frac{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^N g(x, y) \times x}{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^N g(x, y)}, \quad (12)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^N g(x, y) \times y}{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^N g(x, y)}, \quad (13)$$

式中, $g(i, j)$ 为像素点 (i, j) 处的灰度值, 即权值. (i, j) 为图像的两个方向, N 是重构二维横截面图像 $g(x, y)$ 的尺寸. 采用该方法处理密度均匀且为薄平面的空间碎片目标时, 通常需要对图像进行阈值分割处理, 将目标轮廓从背景中提取出来. 这种方

法能够较为准确地确定存在遮挡效应的复杂形状空间碎片目标的质心位置, 通过二维横截面图像解算得到二维平面内的质心坐标后, 结合本文提出的质心距离估计方法, 即可确定质心距离.

3 系统构成与实验碎片模型

图 2 所示为用于实现远距离空间碎片目标模型质心探测实验的 LRT 雷达样机原理图, 其关键参数如表 1 所示. 该 LRT 雷达样机包括发射、接收、数据采集和数据处理 4 个部分: 发射部分由微片激光器、两个反射镜、一个分束棱镜、一个 3 倍扩束镜和一个 5—10 倍变倍激光扩束镜组成的扩束系统构成; 接收部分采用望远系统接收, 后接多模光纤输入 APD 光探测模块; 此外还有一个 Pin

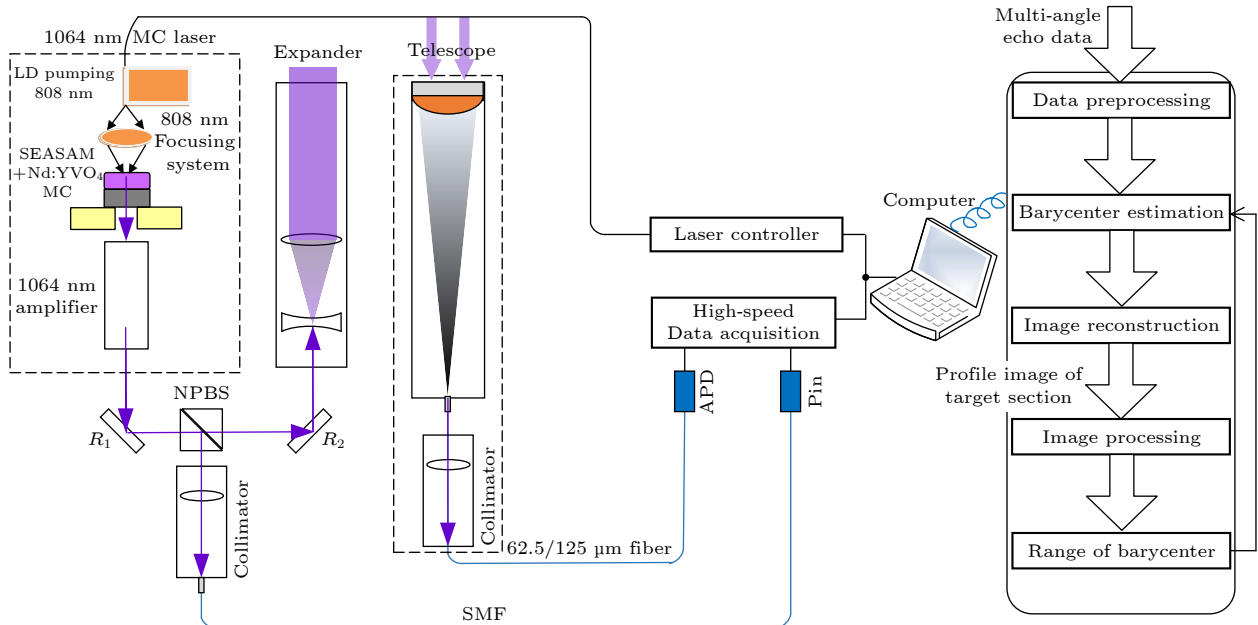


图 2 LRT 雷达样机原理图, 其中 R 表示反射镜, NPBS 表示消偏振分光棱镜, APD 表示雪崩光电二极管, Pin 表示光电二极管, SMF 表示单模光纤, MC laser 表示微片激光器

Fig. 2. Schematic diagram of LRT radar prototype, where R is reflector, NPBS is non-polarizing beam splitter, APD is avalanche photodiode, Pin is positive intrinsic negative, SMF is single mode fiber, and MC laser is microchip laser.

表 1 LRT 雷达样机关键参数

Table 1. Key parameters of the LRT radar prototype.

参数/单位	数值	参数/单位	数值
工作波长 λ /nm	1064	APD 模块带宽 BW_1 /GHz	7.5
脉冲宽度 τ /ps	93	APD 模块灵敏度 S_1 /dBm	-25.5
单脉冲能量 E / μ J	10	Pin 模块带宽 BW_2 /GHz	15
重复频率 f /Hz	10	Pin 模块灵敏度 S_2 /dBm	-27
激光发射发散角 θ /mrad	0.22	高速采集器带宽 BW_3 /GHz	4.25
望远系统口径 D /m	0.1	高速采集器采样率 f_s /GSPS	50
望远系统视场角 ω /mrad	0.3	高速采集器触发延时 t / μ s	6.546

光探测模块在消偏振分光棱镜另一侧用于记录参考信号; 数据采集部分使用激光脉冲高速采集器; 数据处理部分由工控机控制并完成实时数据处理。

验证实验的探测距离为 1 km. 本实验使用的超短脉冲激光器采用半导体可饱和吸收体作为调 Q 开关, Nd:YVO_4 作为增益介质, 直接键合到可饱和吸收体形成微片, 谐振腔的长度在 100 μm 量级, 种子激光输出后经放大最终达到 100 kW 以上的峰值功率. 独特的设计、高精制造以及智能化电源控制确保该激光器具有高电光转换效率、高光束质量、高可靠性等特点. 微片激光器发出 1064 nm 脉冲激光后, 经过一个可拆卸的倍频模块出射部分 532 nm 绿光用于辅助调节光路, 经过第一面反射镜后一路光经由消偏振分光棱镜进入 Pin 光探测模块后由激光脉冲高速采集器通道一采集; 另一路光通过分光棱镜后经由第二面反射镜入射扩束镜后照射到目标处并覆盖, 经由目标表面调制后的回波被望远系统耦合进多模光纤内输入 APD 光探测模块后, 由激光脉冲高速采集器通道二采集; 通道一采集的发射信号作为参考, 触发后延时开始采集通道二的信号. 为保证远距离处光斑完全覆盖目标, 采用 650—1300 mm 变焦望远镜和 CCD 相机组成系统在发射端对远处目标进行成像, 调节发射激光俯仰、方位, 直到光斑完全覆盖目标。

数据处理部分应用的算法就是本文提出的质心距离估计方法, 工控机控制采集到多角度激光回波数据后, 先进行数据预处理, 分析得到其峰值点距离变化规律和转动周期, 将多个周期回波数据整合排列后, 取峰值点距离的平均值作为质心距离的初始估计. 然后, 利用凸面对应的 180° 的回波数据进行滤波反投影 (filtered back projection, FBP) 重构, 获得目标横截面二维轮廓像. 接着, 对重构图像进行图像处理, 解算得到质心确定结果, 并结合理论质心对初始质心距离估计进行校正, 利用校正后的质心再次进行 FBP 重构, 循环此过程, 直到解算得到的质心确定结果与理论质心的距离小于一个像素对应的最小可校正误差时终止。

构建由三个边长为 5 cm、两两夹角 135° 的正方形组合而成的近似面状结构作为典型空间碎片目标模型, 如图 3(a) 所示. 图示坐标系原点 o 选取在碎片质心处, 探测过程中碎片目标所在 xoy 平面绕 oz 轴转动, 规定沿 ox 轴正向时的激光束照射角度 ϕ 为 0° . 遮挡效应示意图如图 3(b) 所示, 激光束照射角度 ϕ 存在不能照射到的阴影区域, 该角度激

光回波数据仅受到黑色标记区域目标表面的调制, 缺失了红色标记区域的目标表面信息, 该角度回波难以准确解算得到质心距离. 因此如何利用多角度激光回波反演得到目标完整、精准的轮廓图像从而准确解算得到质心距离成为本文研究的关键点。

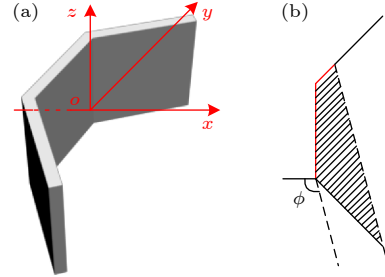


图 3 典型空间碎片模型 (a) 结构示意图; (b) 遮挡效应示意图

Fig. 3. Typical space debris model: (a) Structure diagram; (b) diagram of shielding effect.

4 1 km 实验结果与质心距离估计

图 4(a) 给出了上述 LRT 雷达样机实验装置图, 利用该样机在合肥董铺水库大坝上对图 3(a) 所示的典型空间碎片目标模型开展 1 km 距离的 LRT 质心探测实验, 实验示意图如图 4(b) 所示. 激光光斑在 1 km 处直径约 22 cm, 接收光学系统 1 km 处视场约 30 cm, 接收光学系统视场能够覆盖到激光束。

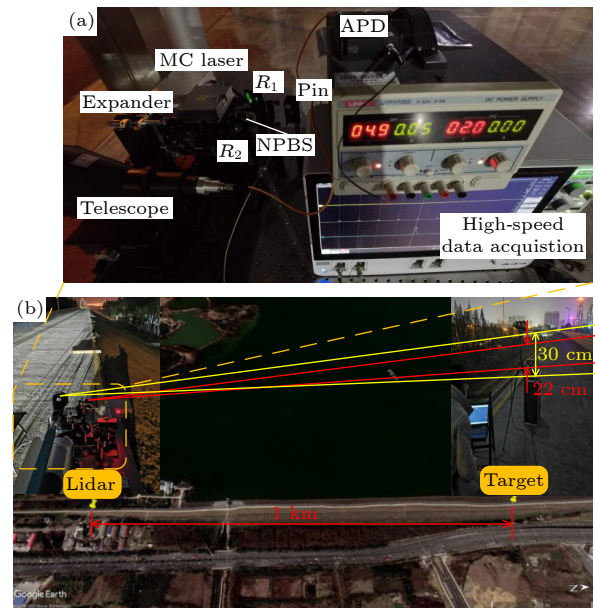


图 4 (a) 实验装置图; (b) 1 km 实验验证示意图

Fig. 4. (a) Diagram of the experimental set-up; (b) diagram of 1 km experiment verification.

厘米级空间碎片目标质心探测的难点在于,对于作为非合作目标的空间碎片来说,如果需要考虑其自身形状对回波波形的调制,就需要利用多角度激光回波反演得到目标完整、精准的轮廓图像.结合地基或天基平台测得的空间碎片目标轨道参数和探测器轨道参数,建立碎片与探测器的相对运动模型,能够实时校正空间碎片目标与探测器的距离.空间碎片目标通常围绕其质心高速转动^[26].校正后的相对运动可以看作是探测器固定,空间碎片目标围绕自身质心作匀速转动,而其作为非合作目标,转动周期是未知的.因此,首先需要从足够多的回波波形采样数据中,确定空间碎片目标的转动周期.选取采样间隔 7° 等间隔采样得到的 500 组多角度激光回波波形如图 5 所示.需要指出的是,工控机控制采集开始的触发延时为 $6.546 \mu\text{s}$,图中原点处对应的探测距离为 981.9 m ,计算距离时需要加上延时对应的距离值.提取各角度回波对应的峰值点距离如图 5 中红色折线 b 所示,可以看到峰值点距离存在很多异常值,这是因为某些角度采集得到的回波信噪比较差,波形湮没在噪声中.利用差分过滤方式将异常值去除,本文设置阈值为 0.015 m 和 -0.015 m ,只有前一个差分值和后一个差分值是一正一负或一负一正的情况才判断为异常值并删除,剩余的峰值点距离利用插值方式获得的折线图如图 5 中蓝色折线 a 所示.选取相邻极值点对应角度分别为 721° 和 1078° ,与多角度激光回波共同确定转动周期 T ,确定的周期共包含 357° ,与转动一周对应的 360° 大致相同.

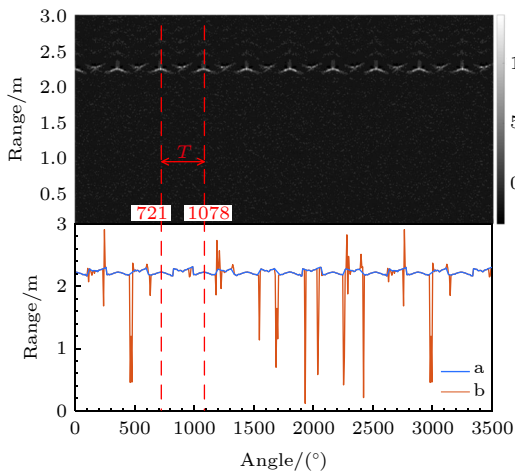


图 5 多角度激光回波和峰值点距离确定转动周期

Fig. 5. Multi-angle laser echoes and the peak point range determined the period of rotation.

确定空间碎片转动周期后,可以确定一个周期内采集到的回波数目,例如图 5 所示的一个周期包含 51 组回波数据,将相邻周期采集到的回波数据依次补全到该周期采集到的回波数据的间隙,补全后得到转动一周内等效为采样间隔 1° 对应的全角度激光回波波形数据,如图 6 所示.分析其峰值点距离发现最大值为 2.352 m ,而最小值为 2.160 m ,也就是说仅依靠单角度回波确定的质心距离误差最大可以达到 19.2 cm ;利用多角度回波数据解算质心距离的方法,根据平面状目标质心探测公式^[21]

$$\bar{r}_c(\phi) = \bar{d} + \bar{R} \cos(\phi + \phi_0) \quad (14)$$

得到的质心距离为 2.250 m ,计算得到的质心距离与实际值的误差为 1.50 cm ,这种方法忽略了目标表面遮挡效应的影响,从机理上无法满足质心距离高精度测量的需要,难以实现针对非平面状厘米级空间碎片亚厘米级甚至毫米级的质心距离测量.

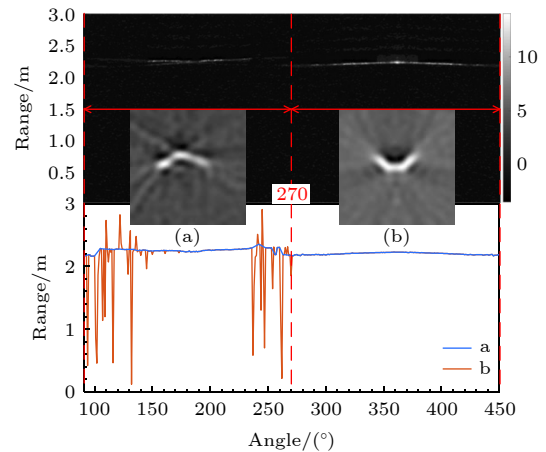


图 6 补全后的多角度激光回波和目标重构图像 (a) 凹面对应回波数据的 FBP 重构图像; (b) 凸面对应回波数据的 FBP 重构图像

Fig. 6. Multi-angle laser echoes after completion and reconstructed image of target: (a) Image reconstruction by FBP based on the echo data of concave surface; (b) image reconstruction by FBP based on the echo data of convex surface.

图 6 所示是补全后等效为采样间隔 1° 对应的全角度激光回波,提取各角度回波对应的峰值点距离如图 6 中红色折线 b 所示,利用差分法去除异常值后插值得到的折线图如图 5 中蓝色折线 a 所示.可以看到,折线明显存在两个突变值,这是由于近似面状的碎片目标在一侧观测为凸面而另一侧观测为凹面,由凹面到凸面或凸面到凹面转动时,回波波形对应的峰值点距离会发生突变,图 5 所示 91° — 270° 对应的回波数据是凹面, 271° — 450° 对应

的回波数据是凸面, 分别对凹面和凸面对应的回波数据进行 FBP 重构, 所得目标重构图像如图 5(a), (b) 所示. 由于碎片目标与探测器的相对运动被认为是围绕其自身质心的转动, 因此重构过程中碎片目标的旋转中心用质心代替, 而质心距离的初始估计为蓝色折线 a 对应峰值点距离的平均值. 比较目标重构图像不难看出, 凸面对应的回波数据获得的重构图像轮廓更清晰, 这是由于凹面受遮挡效应影响明显强于凸面, 因此后续对质心距离的校正采用凸面对应的回波数据获得的目标重构图像处理完成.

利用补全后的凸面对应的回波数据进行 FBP 重构, 质心距离校正前后的 FBP 重构图像如图 7(a), (b) 所示, 采样间隔为 1° . 分别对 FBP 重构图像进行阈值分割处理, 得到如图 7(c), (d) 所示的阈值分割图像. 在阈值分割图像中用方形标记质心确定结果, 并用圆形标记理论质心.

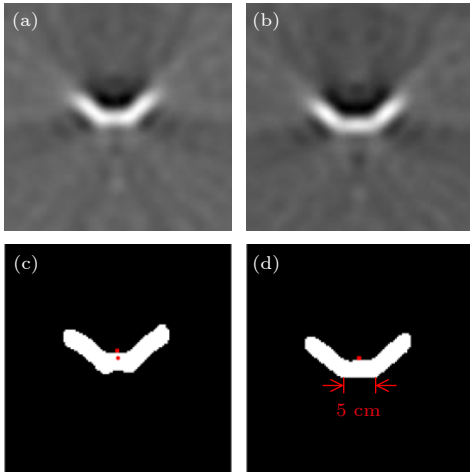


图 7 采样间隔 1° 的目标重构图像与质心确定结果. FBP 重构图像 (a) 质心距离校正前; (b) 质心距离校正后. 阈值分割图像 (c) 质心距离校正前; (d) 质心距离校正后

Fig. 7. Target reconstruction image with sampling interval of 1° and barycenter determination results. Image reconstruction by FBP: (a) Barycenter range before correction; (b) barycenter range after corrected. Threshold segmentation image: (c) Barycenter range before correction; (d) barycenter range after corrected.

根据 (12) 式和 (13) 式计算得到图 7(c) 中质心坐标为 (63.9735, 60.2458), 用方形标记; 而理论质心坐标为 (64.5000, 64.5000), 用圆形标记. 计算得到二者相距 4.2867 个像素, 根据 1 个像素对应 0.3 cm 的转换关系, 得到质心确定结果与理论质

心之间的距离为 1.29 cm, 即质心确定误差的确定值为 1.29 cm. 需要指出的是, 最终计算质心距离时需要加上工控机控制的触发延时对应的探测距离 981.9 m, 为便于分析这部分数据均采用未加上该距离的数值. 利用该误差对质心距离进行校正, 重新进行 FBP 重构得到图 7(d) 所示校正后的阈值分割图像, 可以看到此时质心确定结果与理论质心十分接近, 根据 (12) 式和 (13) 式计算得到质心坐标为 (64.5293, 64.0195), 转换得到此时的质心确定误差的确定值为 0.14 cm. 此外, 校正后的图像轮廓也更接近真实的碎片目标轮廓, 在图上标示出 5 cm 对应的像素值发现, 重构轮廓尺寸与目标尺寸基本一致. 校正前后质心距离和质心确定误差结果比较如表 2 所示, 校正后质心距离与实际值误差仅为 0.34 cm, 达到了毫米级质心探测精度的要求.

表 2 采样间隔 1° 的目标重构图像校正前后质心距离和质心确定误差结果比较

Table 2. Comparison of barycenter range and determination error before or after target reconstruction image correction with sampling interval of 1° .

类型	质心距离		质心确定误差	
	R/m	确定值 E_0/cm	实际值 E/cm	
质心距离校正前	2.2246	1.29	1.54	
质心距离校正后	2.2366	0.14	0.34	

分析计算能够重构图像的最大采样间隔, 假设截止频率为 u_{\max} , 目标空域最大尺寸为 D_{\max} , 根据耐奎斯特采样定律, 频率间隔要小于 $\frac{1}{D_{\max}}$ 才能完全重建出目标图像, 可得到角度间隔 $\Delta\phi$ 的采样限制条件为 [27]

$$\Delta\phi \leq \frac{1}{D_{\max} u_{\max}}, \quad (15)$$

截止频率 u_{\max} 可以通过激光脉冲和探测器确定的距离分辨率计算得出. 这里, 可以认为相较于探测电路的响应时间, 激光脉冲确定的距离分辨率较低, 距离分辨率 ΔR 转换傅里叶频域得:

$$F_1 \left[\text{rect} \left(\frac{D}{\Delta R} \right) \right] = \text{sinc}(\Delta R u), \quad (16)$$

设 sinc 函数第一个频域零点为目标图像频域截止频域, 根据距离分辨率 ΔR 和脉冲宽度 τ 的关系式 $\Delta R = \frac{c\tau}{2}$, 可以得到单个投影上反射层析投影采样角度数 N_ϕ 的限制条件为

$$N_{\phi} \geq \frac{2\pi}{\Delta\phi} = \frac{4\pi D_{\max}}{c\tau}. \quad (17)$$

根据 (17) 式计算得到的最大采样间隔为 6.6° , 选取采样间隔 7° 时凸面对应的激光回波数据共 25 组进行 FBP 重构, 得到质心距离校正前、质心距离第一次校正后和质心距离第二次校正后的 FBP 重构图像如图 8(a)–(c) 所示, 可以看到采样间隔增大后目标重构图像中的伪影和噪点明显增加。

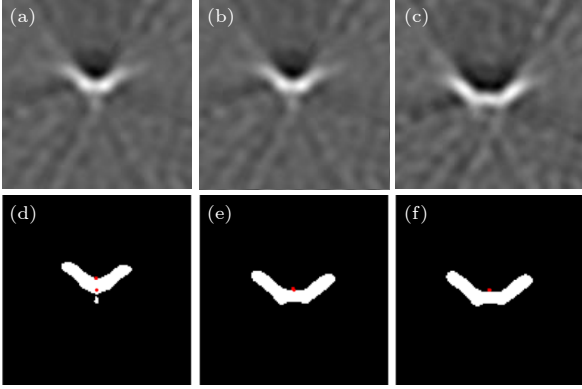


图 8 采样间隔 7° 的目标重构图像与质心确定结果. FBP 重构图像 (a) 质心距离校正前; (b) 质心距离第一次校正后; (c) 质心距离第二次校正后. 阈值分割图像与质心确定结果 (d) 质心距离校正前; (e) 质心距离第一次校正后; (f) 质心距离第二次校正后

Fig. 8. Target reconstruction image with sampling interval of 7° and barycenter determination results. Image reconstruction by FBP: (a) Barycenter range before correction; (b) barycenter range after first corrected; (c) barycenter range after second corrected. Threshold segmentation image and barycenter determination results: (d) Barycenter range before correction; (e) barycenter range after first corrected; (f) barycenter range after second corrected.

校正前后质心距离和质心确定误差结果比较如表 3 所示, 图 8(d) 中质心确定结果与理论质心之间的距离为 2.43 cm. 利用该误差对质心距离进行第一次校正, 重新进行 FBP 重构, 得到图 8(e) 所示校正后的阈值分割图像, 此时质心确定误差的确定值为 0.39 cm. 然后, 进一步对质心距离进行第二次校正, 进行 FBP 重构, 得到图 8(f) 所示的阈值分割图像, 此时质心确定结果与理论质心十分接近, 质心确定误差的确定值为 0.22 cm, 小于一个像素对应的 0.3 cm 的最小可校正误差. 因此校正循环终止, 此时的图像轮廓与真实的碎片目标轮廓接近, 且经过两次校正后质心距离与实际值误差仅为 0.50 cm, 达到了毫米级质心探测精度的要求。

表 3 采样间隔 7° 的目标重构图像校正前后的质心距离和质心确定误差结果比较

Table 3. Comparison of barycenter range and determination error before or after target reconstruction image correction with sampling interval of 7° .

类型	质心距离		质心确定误差
	R/m	确定值 E_0/cm	实际值 E/cm
质心距离校正前	2.2021	2.43	1.79
质心距离第一次校正后	2.2320	0.39	0.80
质心距离第二次校正后	2.2350	0.22	0.50

进一步探讨稀疏角度采样环境下的质心距离解算效果, 选取采样间隔 20° 时凸面对应的激光回波数据共 9 组, 进行 FBP 重构, 得到质心距离校正前后 FBP 重构图像如图 9(a), (b) 所示, 可以看到稀疏角度采样环境下目标重构图像存在大量伪影且目标轮廓与真实轮廓存在偏差。

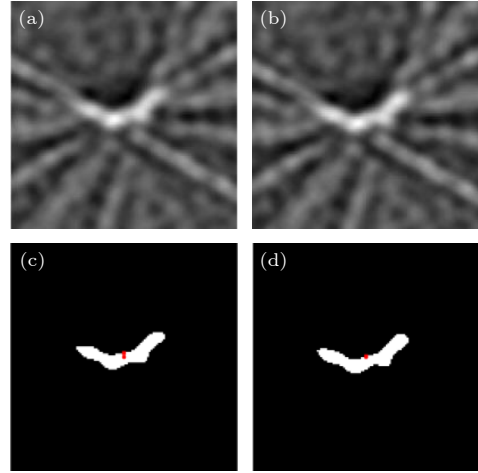


图 9 采样间隔 20° 的目标重构图像与质心确定结果. FBP 重构图像 (a) 质心距离校正前; (b) 质心距离校正后. 阈值分割图像: (c) 质心距离校正前; (d) 质心距离校正后

Fig. 9. Target reconstruction image with sampling interval of 20° and barycenter determination results. Image reconstruction by FBP: (a) Barycenter range before correction; (b) barycenter range after corrected. Threshold segmentation image: (c) Barycenter range before correction; (d) barycenter range after corrected.

校正前后质心距离和质心确定误差结果比较如表 4 所示, 图 9(c) 中质心确定结果与理论质心相距 0.70 cm, 利用该误差对质心距离进行校正, 重新进行 FBP 重构得到图 9(d) 所示校正后的阈值分割图像. 此时, 质心确定误差的确定值为 0.15 cm, 而实际值为 1.70 cm, 证明该方法应用于稀疏角度采样环境下也能够实现超过 2 cm 探测精度的质心距离解算。

表 4 采样间隔 20° 的目标重构图像校正前后质心距离和质心确定误差结果比较

Table 4. Comparison of barycenter range and determination error before or after target reconstruction image correction with sampling interval of 20° .

类型	质心距离	质心确定误差	
	R/m	确定值 E_0/cm	实际值 E/cm
质心距离校正前	2.2170	0.70	2.30
质心距离校正后	2.2230	0.15	1.70

在稀疏角度采样的环境下, 本文使用 FBP 算法对目标图像进行重构, 难以精准重建出目标轮廓. 随着压缩感知 (compressed sensing, CS) 理论的提出, 可以运用更多新的图像重建算法和图像后处理方法, 提升重建图像质量^[28,29]. 根据 CS 理论, 图像迭代重建增加关于稀疏变换后图像的稀疏性约束, 可以解决稀疏角度和有限角度回波数据精确重建问题^[30], 为基于 LRT 的厘米级空间碎片质心距离估计方法提供了更大的应用前景.

5 结 论

本文结合 LRT 原理建立了厘米级空间碎片目标质心模型, 提出了质心距离估计方法. 通过对 LRT 雷达样机关键部件参数进行优化设计以及对系统的高精度装调, 成功研制了用于实现远距离质心探测实验的 LRT 雷达样机, 并针对典型厘米级空间碎片目标模型开展了 1 km 探测距离的实验验证. 实验结果表明, 针对由三个边长为 5 cm、两两夹角 135° 的正方形组合而成的近似面状结构的典型厘米级空间碎片目标模型, 该方法的质心探测精度能够达到 0.34 cm, 且在稀疏角度采样的环境下, 也可以实现 1.70 cm 探测精度的质心距离解算.

展望未来, 随着 CS 理论的提出, 可以运用更多新算法来提升重建图像质量, 进一步提高该方法的质心探测精度. 结合 LRT 技术具有成像分辨率与距离无关的优势, 在可以预见的将来就能实现百公里级 LRT 空间碎片质心探测, 届时亚厘米级甚至毫米级的质心探测精度将远远优于传统光学或雷达成像技术通过图像解算得到目标质心位置的精度, 同时对数百千米距离大功率激光清理空间碎片也将具有一定指导意义.

感谢合肥市董铺·大房郢水库管理处对本文实验的大力支持与帮助.

参考文献

- [1] Bonnal C, Ruault J M, Desjean M C 2013 *Acta Astronaut.* **85** 51
- [2] Esmiller B, Jacqueland C, Eckel H A, Wnuk E 2014 *Appl. Opt.* **53** 45
- [3] Phipps C, Birkan M, Bohn W, Eckel H A, Horisawa H, Lippert T, Michaelis M, Rezunkov Y, Sasoh A, Schall W, Scharring S, Sinko J J 2010 *Propul. Power* **26** 609
- [4] Jin X, Hong Y J, Li X Q 2012 *High Power Part. Beam* **24** 281 (in Chinese) [金星, 洪延姬, 李修乾 2012 强激光与粒子束 **24** 281]
- [5] Hong Y J, Jin X, Chang H 2016 *Infrared Laser Eng.* **45** 9 (in Chinese) [洪延姬, 金星, 常浩 2016 红外与激光工程 **45** 9]
- [6] Hu Y F, Yang F M, Zhang Z P, Hamal K, Prochazka I, Blazej 2004 *Sci. China Ser. G* **34** 711 (in Chinese) [扈荆夫, 杨福民, 张忠萍, Hamal K, Prochazka I, Blazej J 2004 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学 **34** 711]
- [7] Li H, Chen S J, You L X, Meng W D, Wu Z B, Zhang Z P, Tang K, Zhang L, Zhang W J, Yang X Y 2016 *Opt. Express* **24** 3535
- [8] Yang F M, Chen W Z, Zhang Z P, Chen J P, Hu J F, Li X, Prochazka I, Hamal K 2002 *Sci. China Ser. A* **32** 935 (in Chinese) [杨福民, 陈婉珍, 张忠萍, 陈菊平, 扈荆夫, 李鑫, Prochazka I, Hamal K 2002 中国科学 (A 辑) **32** 935]
- [9] Meng W D, Zhang H F, Deng H R, Tang K, Wu Z B, Wang Y R, Wu G, Zhang Z P, Chen X Y 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 019502 (in Chinese) [孟文东, 张海峰, 邓华荣, 汤凯, 吴志波, 王煜蓉, 吴光, 张忠萍, 陈欣扬 2020 物理学报 **69** 019502]
- [10] Li Y Q, Li Z L, Fu H L, Zheng X M, He S H, Zhai D S, Xiong Y H 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 160 (in Chinese) [李语强, 李祝莲, 伏红林, 郑向明, 何少辉, 翟东升, 熊耀恒 2011 中国激光 **38** 160]
- [11] Zhang H F, Long M L, Deng H R, Cheng S Y, Wu Z B, Zhang Z P, Zhang A L, Sun J T 2021 *Appl. Sci.* **11** 10080
- [12] Bai X R, Xing M D, Zhou F, Bao Z 2009 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **47** 2352
- [13] Sun T, Shan X M, Chen J 2014 *IEEE Geosci. Remote S.* **11** 1041
- [14] Morselli A, Lizia P D, Armellini R, Bianchi G, Bortolotti C, Montebugnoli S, Naldi G, Perini F, Pupillo G, Roma M, Schiaffino M, Mattana A, Salerno E, Sergiusti A L, Magro A, Adami K Z, Villadei W, Dolce F, Reali M, Paoli J *IEEE Metrology for Aerospace* Italy, Benevento, June 4–5, 2015 p562
- [15] Xi J B, Wen D S, Ersoy O K, Yi H W, Yao D L, Song Z X, Xi S B 2016 *Appl. Opt.* **55** 7929
- [16] Hu Y H, Zhang X Y, Xu S L, Zhao N X, Shi L 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 13 (in Chinese) [胡以华, 张鑫源, 徐世龙, 赵楠翔, 石亮 2021 中国激光 **48** 13]
- [17] Parker J K, Craig E B, Klick D I, Knight F K, Kulkarni S R, Marino R M, Senning J R, Tussey B K 1988 *Appl. Opt.* **27** 2642
- [18] Matson C L, Mosley D E 2001 *Appl. Opt.* **40** 2290
- [19] Murray J, Triscari J, Fetzter G, Epstein R, Plath J, Ryder W, Van L N *Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications* San Diego, CA, United states, January 31–February 3, 2010 pLSWA1
- [20] Jin X F, Sun J F, Yan Y, Zhou Y, Liu L R 2010 *Opt. Commun.* **283** 3472
- [21] Lin F, Wang J C, Lei W H, Hu Y H 2017 *Opt. Commun.* **402** 540

- [22] Jin X, Li L, Chen Z Q, Xu R L, Huang Y, Zhang L 2011 *Acta Petropol. Sin.* **54** 1691 (in Chinese) [金鑫, 李亮, 陈志强, 徐荣栏, 黄娅, 张丽 2011 *地球物理学报* **54** 1691]
- [23] Chen J B, Sun H Y 2020 *Opt. Commun.* **455** 124548
- [24] Gu Y, Hu Y H, Hao S Q, Wang J C, Wang D 2011 *Acta Opt. Sin.* **54** 1691 (in Chinese) [谷雨, 胡以华, 郝士琦, 王金诚, 王迪 2011 *光学学报* **54** 1691]
- [25] Natter F, Wang G 2002 *Med. Phys.* **29** 107
- [26] Song D W, Shang S, Li X J, Luo X, Sun W F, Fan X Y, Li D 2016 *Infrared Laser Eng.* **45** 76 (in Chinese) [宋大伟, 尚社, 李
- 小军, 罗熹, 孙文锋, 范晓彦, 李栋 2016 *红外与激光工程* **45** 76]
- [27] Jin X F, Sun J F, Yan Y, Zhou Y, Liu L R 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 747 (in Chinese) [金晓峰, 孙建峰, 严毅, 周煜, 刘立人 2010 *光学学报* **30** 747]
- [28] Candes E J, Romberg J K, Tao T 2006 *Commun. Pur. Appl. Math.* **59** 1207
- [29] Romberg J 2008 *IEEE Signal Proc. Mag.* **25** 14
- [30] Sidky E Y, Chartrand R, Pan X C *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference* Honolulu, HI, United states, October 27–November 3, 2007, p3526

Kilometer-level laser reflective tomography experiment and debris barycenter estimation*

Zhang Xin-Yuan¹⁾²⁾ Hu Yi-Hua^{1)2)†} Shen Shi-Yang¹⁾²⁾ Fang Jia-Jie¹⁾²⁾
Wang Yi-Cheng¹⁾²⁾ Liu Yi-Fan¹⁾²⁾ Han Fei^{1)2)‡}

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)

(Received 29 January 2022; revised manuscript received 27 February 2022)

Abstract

Removal of the numerous centimeter-level space debris in low Earth orbit by using high-power lasers is always a hot topic of international academic research. Specifically, the precise positioning of space debris and high-precision measurement of barycenter range of debris are the key points and worldwide problems that need to be promptly solved. As a new remote high-resolution imaging method, laser reflective tomography is an effective approach to detecting the dark targets in remote space with its imaging resolution independent of the detection range. Hence, a centimeter-level space debris barycenter model is established according to the principle of laser reflective tomography in order to analyze the relative movement of debris and detector. On this basis, an approach to estimating the barycenter range of centimeter-level space debris is proposed to carry out the experimental verification of 1km detection range laser reflective tomography. The experimental results show that this method can improve the accuracy of barycenter detection from 1.50 cm to 0.34 cm, which is an effective measure for realizing high-precision measurement of barycenter ranges of centimeter-level space debris. Furthermore, this study achieves a breakthrough in kilometer-level laser reflective tomography experiments and theory of validation, and the kilometer-level laser reflective tomography has a great application prospect and technical potential.

Keywords: lidar, reflective tomography, barycenter estimation, kilometer-level experiment

PACS: 42.68.Wt, 06.20.Dk, 93.85.Bc, 42.66.Lc

DOI: 10.7498/aps.71.20220205

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61871389), the Research Plan Project of the National University of Defense Technology, China (Grant No. ZK18-01-02), and the Postgraduate Scientific Research Innovation Project of Hunan Province, China (Grant No. CX20190055).

† Corresponding author. E-mail: skl_hyh@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: feihan@ustc.edu.cn