

反射层析激光雷达实现小远目标超分辨成像

反射层析激光雷达是一种新型成像探测技术手段,探测系统发射脉冲激光束对目标进行全覆盖,通过其与目标之间的相对运动,多角度准确获取包含目标表面反射分布信息的回波数据,并解算得到反射系数投影分布。根据傅里叶切片定理,投影数据的一维傅里叶变换和目标投影图像的二维傅里叶变换相等,利用专用算法进行重构处理,从而实现激光垂轴方向的目标投影成像。该成像方式在激光回波信噪比足够大的情况下,成像分辨率与探测距离、系统孔径无关,而主要与激光脉冲宽度、探测电路带宽和采集系统采样率有关。若脉冲宽度小于 100 ps、探测电路带宽接近 10 GHz、采集系统采样率大于 20 GSa/s,通过光机电系统精细设计装校和处理算法创新,则可以得到 1~2 cm 的成像分辨率。因此,该成像手段具有突破接收光学系统衍射极限的优势,既有扫描激光成像的作用距离远、方向性好、抗干扰能力强等特点,又不需要极小间隔的密集扫描;相比于合成孔径激光雷达,只需要采集回波脉冲包络,对平台稳定性和激光相干性的要求更低。反射层析激光雷达是实现星载百公里甚

至千公里级目标厘米级超分辨成像的最有潜力手段,也是最接近工程化的技术途径。

近期,国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室在窄脉冲激光产生、脉冲激光信号高保真高速采集、超分辨垂轴投影成像重构算法等关键技术取得突破的基础上,研制出反射层析激光雷达成像实验系统。系统如图 1 所示,其主要参数为:工作波长 1064 nm,脉冲宽度 73 ps,光电探测器带宽 7.5 GHz,采集系统采样率 50 GSa/s,接收光学系统孔径 260 mm。系统成像实验在合肥市紫蓬山地区进行,在山上(31°43'28"N,116°59'55"E)的实验塔上分别设置倾角为 60°、尺寸为 70 cm×45 cm、字宽为 2 cm 的“NUDT”艺术字模型和由三个边长为 5 cm、两两夹角为 135°的正方形组合而成的空间碎片模拟目标。实验系统布置在该市华南城(31°46'20"N,117°5'35"E)某小区的楼上,开展了距离为 10.38 km 的反射层析激光雷达成像实验,在多种实验环境下,成功实现了图 2(a)、(c)所示的小远目标超分辨成像,成像分辨率优于 2 cm。

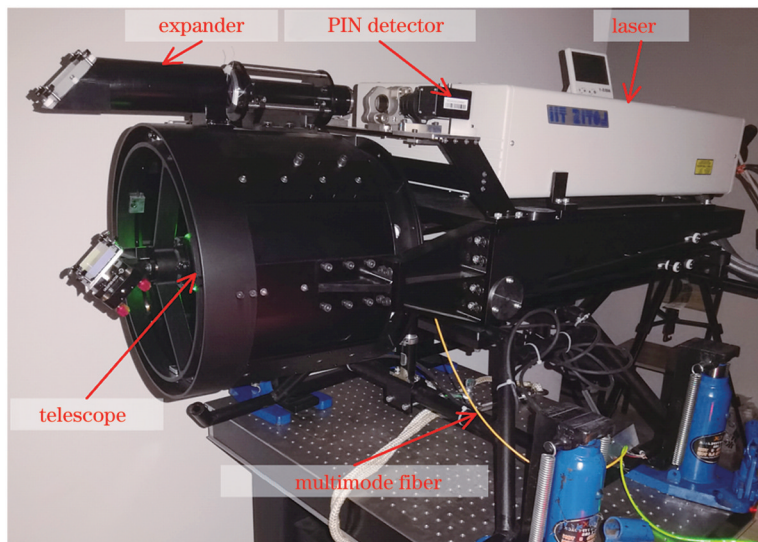


图 1 反射层析激光雷达系统图

Fig. 1 Diagram of reflective tomography lidar system

该系统光学孔径为 260 mm,相同孔径的光学成像系统衍射极限为 5 μ rad,对应 10 km 处常规光学成像的极限分辨率约为 5 cm。反射层析激光雷达目标成像结果如图 2(b)、(d)所示。根据基于调制传递函数(MTF)的图像质量评价方法,选取重构图像中的不同

典型特征,分别计算其 MTF 值为 0.1 时对应的分辨率,并取平均得到极限分辨率约为 1.7 cm,高于相关激光反射层析研究及传统光学成像的衍射极限,据我们所知,其厘米级的成像分辨率是目前国内外报道的最高水平。

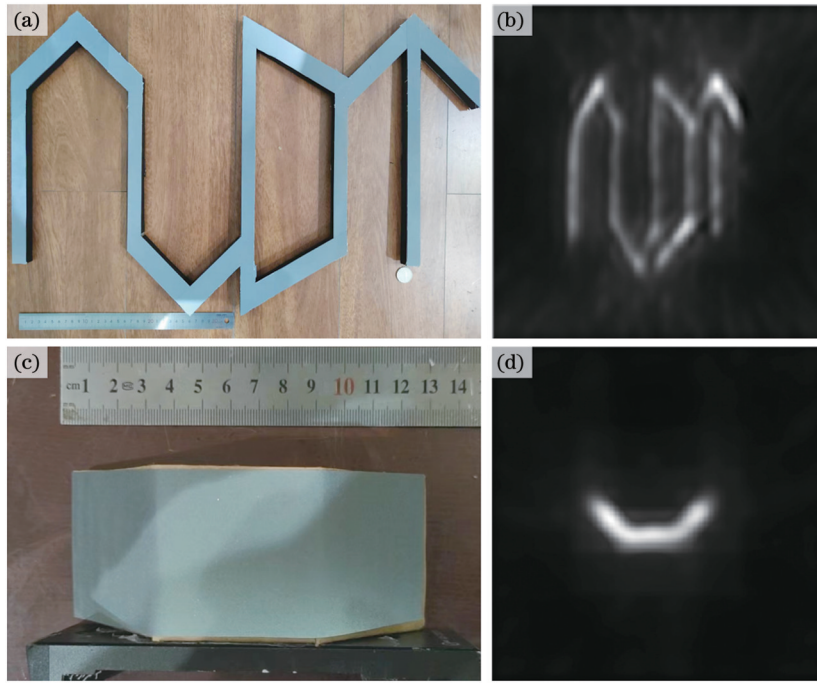


图 2 目标实物与成像结果。(a)“NUDT”模型;(b)“NUDT”模型重构图像;(c)空间碎片模拟目标;(d)空间碎片模拟目标重构图像
 Fig. 2 Target objects and imaging results. (a) “NUDT” model; (b) reconstructed image of “NUDT” model; (c) space debris simulation target; (d) reconstructed image of space debris simulation target

胡以华^{1,2,3*}, 张鑫源^{1,2,3}, 韩飞^{1,2,3}, 王一程^{1,2,3}, 徐世龙^{1,2,3}, 赵楠翔^{1,2,3}, 谌诗洋^{1,2,3}, 刘家祥^{1,2,3}, 方佳节^{1,2,3},
 董骁^{1,2,3}, 侯阿慧^{1,2,3}

¹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;

²国防科技大学电子对抗学院先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;

³国防科技大学电子对抗学院电子制约技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037

通信作者: *skl_hyh@163.com

收稿日期: 2022-12-13; 修回日期: 2022-12-29; 录用日期: 2023-01-05; 网络首发日期: 2023-01-15