

## 基于距离分辨的激光雷达技术研究进展

陈剑彪<sup>1</sup>, 孙华燕<sup>2\*</sup>, 赵融生<sup>3</sup>, 孔舒亚<sup>4</sup>, 赵延仲<sup>2</sup>, 单聪森<sup>1</sup>

(1. 航天工程大学 研究生院, 北京 101416; 2. 航天工程大学 电子与光学工程系, 北京 101416;  
3. 北京空间信息中继传输技术研究中心, 北京 102300; 4. 中国人民解放军 66135 部队, 北京 100041)

**摘要:** 激光雷达是对空间目标进行远距离高精度探测、跟踪监视的重要手段之一, 基于距离分辨的激光雷达探测系统相比于传统的成像系统, 具有整体结构简单、受大气干扰小等特点。国内外研究机构对该技术领域开展了大量研究, 主要介绍了高分辨率回波探测及反射断层成像激光雷达的发展现状, 总结和比较了国内外在理论算法、仿真分析、实验测试及实际应用等方面的进展, 分析了二者的技术特点, 展望了其发展前景。

**关键词:** 激光雷达; 距离分辨; 高分辨率回波; 反射断层成像; 图像重建

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0805007

## Research development of range-resolved laser radar technology

Chen Jianbiao<sup>1</sup>, Sun Huayan<sup>2\*</sup>, Zhao Rongsheng<sup>3</sup>, Kong Shuya<sup>4</sup>, Zhao Yanzhong<sup>2</sup>, Shan Congmiao<sup>1</sup>

(1. Department of Graduate Management, Space Engineering University, Beijing 101416, China;  
2. Department of Electronic and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China;  
3. Beijing Space Information Relay Transmit Technology Research Center, Beijing 102300, China;  
4. 66135 Army, PLA, Beijing 100041, China)

**Abstract:** Laser radar is an important technical way for high-accuracy detection, tracking and monitoring space-based target in the distance. Compared to the traditional imaging system, the range-resolved laser radar system has the advantages of simple structure and small atmospheric effect. At home and abroad the relative research institutes have done much work about this technology. The status and trend of two kinds of laser radar, which were called high resolution echoes detecting laser radar and reflective tomography imaging laser radar respectively, was introduced. The developments of the theoretical algorithms, modeling simulation, experimental verification and actual application were summarized and compared with each other. The technical characteristics of these two kinds of laser radar were analyzed, and the prospect of developments was expected.

**Key words:** laser radar; range-resolved; high resolution echoes; reflective tomography imaging; image reconstruction

收稿日期: 2019-03-11; 修订日期: 2019-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(61302183)

作者简介: 陈剑彪(1991-), 男, 博士生, 主要从事光电信息处理及目标识别方面的研究。Email: general\_chen2041@163.com

导师简介: 孙华燕(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光电信息处理与对抗、数字图象处理等方面的研究。

Email: shy221528@vip.sina.com

## 0 引言

目前,空间目标探测及成像技术主要包括红外成像、可见光成像、微波雷达技术及激光雷达技术等。激光雷达系统具有快速灵活、高精度、高分辨率、抗干扰性强以及隐蔽性强等优势,集主动侦查、目标跟踪探测及识别、光电对抗等先进的作战技术为一体,已在地理测绘、遥感成像、空间目标监视识别等领域得到广泛应用。其中,基于距离分辨的激光雷达系统当其分辨率足以将目标在探测方向上划分为多个距离单元时,能够获取目标的高分辨率外形特征信息,进一步采用重建算法还能恢复目标图像信息。采用非相干直接探测方式时,该技术主要分为两类:一类是采用窄脉宽激光对目标进行照射,获取目标的一维高分辨率回波,即高分辨率回波探测技术;另一类是通过收集目标多个视角下的高分辨率回波数据,运用图像重建算法,获得目标的二维轮廓像,即反射断层成像技术。基于距离分辨的激光雷达技术具有以下特点<sup>[1-3]</sup>:(1)采用单元探测器而非成像阵列,简化了系统结构,作用距离更远;(2)系统分辨率只与脉冲宽度、探测器带宽和噪声有关,与探测距离无关,且不受限于接收孔径。

文中在介绍这两类激光雷达技术基本原理的基础上,尽可能全面地分析、对比和总结了国内外研究机构在该技术领域所开展的理论算法、软件仿真以及实验研究等方面的进展和成果。

## 1 高分辨率回波激光雷达技术

### 1.1 基本原理

目标激光高分辨率回波的概念是由微波雷达高分辨率一维距离像引入的,微波雷达常用点散射模型来简化复杂的电磁波散射问题<sup>[4]</sup>,其特点是当探测系统的分辨率单元  $\Delta R$  小于目标尺寸时,能够将目标表示成若干个距离单元回波信号的叠加,反映目标在探测方向上的散射特性分布情况,如图 1 所示。大多数目标对于激光波段可被视为漫射目标,将其激光回波等效为不同距离单元内面元散射强度的叠加。接收回波被视作目标体反射率分布  $D$  与发射激光脉冲  $L$  的卷积:

$$S=D\otimes L \quad (1)$$

式中: $L$  为发射激光脉冲的波形表达式; $\otimes$  为卷积运算。

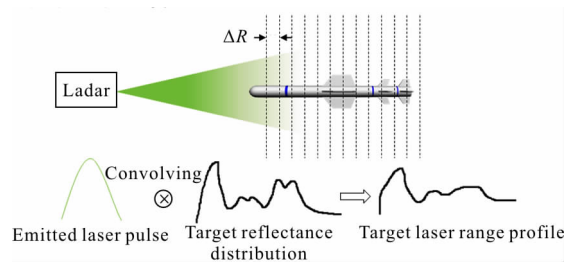


图 1 目标激光高分辨率回波探测示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser high resolution echoes detecting for target

进一步地考虑激光脉冲的时空域分布,结合激光雷达回波公式及图 2,将公式(1)化为积分形式<sup>[5]</sup>:

$$P_r(t)=\int_{R_i+\Delta R/2}^{R_i+\Delta R/2} \int_S E^2(t)E^2(r,z)\frac{\eta_{atm}^2\eta_{sys}^2D^2}{64\pi R^4}\sigma^\circ(t)dS'(2)$$

式中: $\sigma^\circ=\int\sigma^\circ(t)dS$ ;  $D$  为接收光学系统孔径; $\eta_{atm}$  为单程大气衰减系数; $\eta_{sys}$  为系统效率; $R$  为目标与激光雷达之间的距离; $\sigma^\circ$  为目标单元激光雷达散射截面; $dS'$  为目标表面面元; $E(t)E(r,z)$  为激光脉冲的时、空域分布; $R_i=ct/2$  为目标面元与探测系统之间的距离;积分域  $S$  为在单个距离单元内的目标受辐照面积之和。

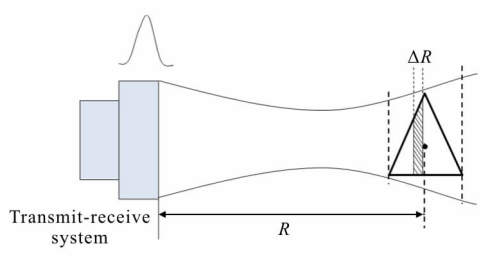


图 2 目标激光高分辨率回波探测原理

Fig.2 Principle of laser high resolution echoes detecting for target

采用非相干方式实现目标的激光高分辨率回波探测,可直接发射窄脉宽激光脉冲或采用经调制的激光脉冲探测目标,然后采用高速光电探测器和大带宽采集系统进行回波信号的接收、采集及存储。

国内外的研究机构主要针对软件仿真、实验研究及特征提取算法等方面对高分辨率回波激光雷达

技术展开了研究。

### 1.2 软件仿真研究进展

瑞典国防研究院 FOI 建立了目标激光高分辨率回波数学模型<sup>[6-7]</sup>,开发了仿真软件 LadarSIM 对整个目标探测场景进行建模,该软件可通过自定义发射激光、目标表面材质、大气湍流强度以及散斑噪声强度等参数来模拟不同条件下目标的强度像和距离像,同时具有激光回波波形和成像仿真两类功能,通过自定义系统参数,可有效地对目标的激光回波探测及成像过程进行模拟<sup>[8]</sup>。

法国 Thales Optronique 公司开发了目标激光雷达散射截面仿真软件,通过三维建模的方式对空中目标高分辨率回波进行仿真研究,该软件相比 FOI 开发的仿真软件的优势是目标体的不同部位可设置成多种材质及涂层,进而更为精确地建立目标三维模型,更精确地模拟现实场景;同时,采用相位屏方法模拟了大气湍流的影响。还进一步对导弹模型开展了对比实验,选用的激光源波长为 1.06  $\mu\text{m}$ ,脉宽为 1 ns,采用平顶高斯光束照射目标,探测器为 InGaAs 雪崩光电二极管,测试距离为 50 m,仿真数据和实验结果整体符合度较高,在一定程度上验证了该仿真软件的准确性<sup>[9]</sup>。

西安电子科技大学 Li 等人基于光散射理论推导出理想平面、球体、圆锥体以及圆柱体等规则几何体的高分辨率回波解析公式,分析了在目标尺寸、表面材质、发射脉宽以及目标姿态等参数变化的条件下其高分辨率回波波形的差异<sup>[10-11]</sup>,获得了回波波形随上述参数发生变化的规律,并进行了数值仿真,并通过实验采集了平板、倾斜平板、圆锥体三类目标若干姿态下的高分辨率回波,通过解析模型获得的数据与实验吻合度较高<sup>[15]</sup>。在获得其解析模型的基础上,进一步分析了表面材质散射特性分别服从朗伯体模型、高斯模型、指数模型以及五参量 BRDF 模型时目标不同姿态下的回波特性,得出了一些重要结论<sup>[12]</sup>。该解析方法对于能够获得回波解析公式的规则几何体的模拟精度较高,但其限制是对于复杂目标体,则很难得到精确的解析公式进行回波计算。

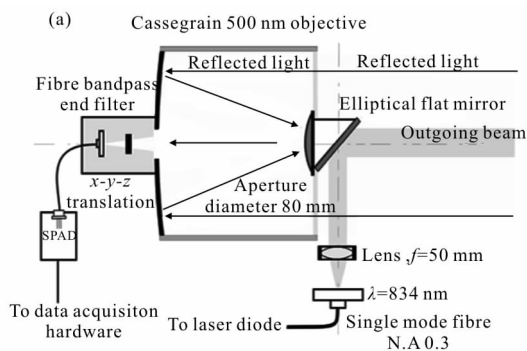
装备学院激光雷达课题组通过三维建模结合 OpenGL 编程的方法开发了目标激光雷达的高分辨率回波仿真软件,获取了目标的高分辨率回波,考虑

了大气传输效应、激光散斑效应、接收系统噪声等因素对探测性能的影响,在其他系统参数不变的条件下,主要分析了目标尺寸的变化对其高分辨率回波分布的影响,并开展了原理性实验验证了仿真结果<sup>[13]</sup>,该软件的特点是获取仿真结果速度快,可根据需要进行实时编程调整相关参数设置,缺点是对于大气因素的影响考虑不够全面。

目前,关于高分辨率回波激光雷达的仿真软件的开发和研究较为广泛,主要是通过建立目标三维模型,结合高分辨率回波公式,考虑大气效应、系统效率及噪声等多种因素后,经理论计算得出目标回波。目标模型的精确度、大气等环境因素的理论模型以及回波计算效率等都是衡量仿真软件优劣的标准。下一步的方向是开发能够更为精确地模拟各种复杂环境条件,特别是大气效应、计算效率更高的激光雷达仿真软件。

### 1.3 实验测试研究进展

瑞典国防研究院 Sjoqvist 等采用时间相关光子计数(TCSPC)探测体制构建了实验系统,如图 3 所示,分析了在白天和夜晚两种条件下该体制的性能,测试时选用的激光脉冲脉宽为 78 ps,重复频率为 40 MHz,发散角为 0.8 mrad,接收系统由焦距为 500 mm 的卡塞格伦镜头以及高速雪崩二极管(SPADs)组成,计时精度为 350 ps,目标分别为漫反射材质的平板、球体和圆锥体,在探测距离为 179.8 m 时分辨率达到 7 cm,对回波数据进行解卷积处理后分辨率提高到 6.2 cm<sup>[14]</sup>,其中,实测与理论数据之间的差异主要由目标表面材质误差、外形建模精度引起的,且探测器的记时精度也是影响距离分辨率的重要因素,结果表明,通过对回波进行解卷积可在一定程度上提高距离分辨率<sup>[15]</sup>。



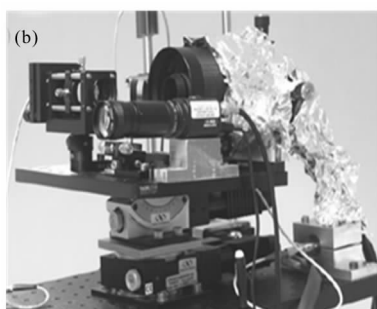


图 3 TCSPC 系统示意图<sup>[15]</sup>

Fig.3 Schematic diagram of TCSPC system<sup>[15]</sup>

该机构 Steinvall 等还将高分辨率回波激光雷达系统用于探测和识别海面上的远、小目标,分析了海面波动、风速、大气湍流强度及探测器噪声对精度的影响,采用脉宽为 3 ns 的激光脉冲,进行了目标识别率仿真测试,在 10 km 内可有效地对尺寸大于 3 m 的海面舰艇目标进行识别。为了进一步地验证仿真结果的可信度,开展了外场实验,采用波长为 1.5  $\mu\text{m}$ 、脉宽为 6 ns 的激光源,接收系统采用双通道模式,其中一个通道视场角为 3.3 mrad,接收带宽为 10 MHz,用于搜索目标,另一个通道视场角为 1 mrad,接收带宽为 300 MHz,用于对目标进行高分辨率回波探测,经过测试,该系统在探测距离为千米级时达到的距离分辨率为 0.7 m,对三类舰船目标的平均识别率高于 80%<sup>[16-17]</sup>,如图 4 所示;对导弹模型的实验结果表明高分辨率回波能够在一定程度上反映目标的外形细节信息,如图 5 所示。

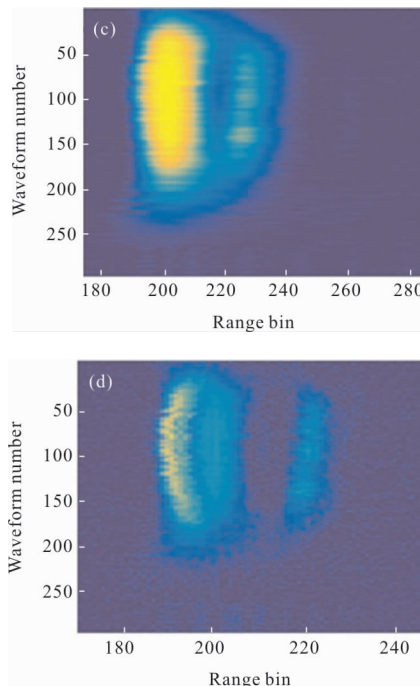
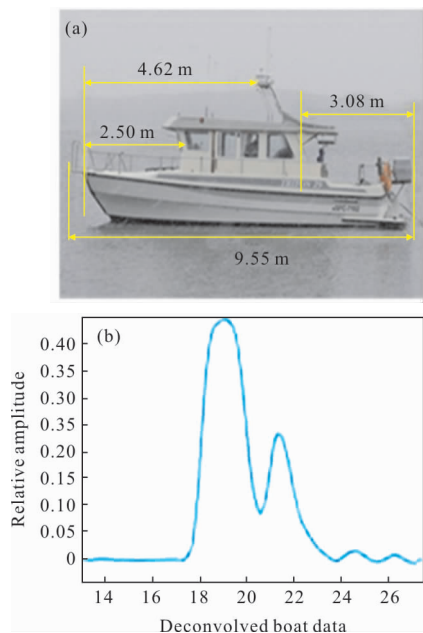


图 4 目标模型及多角度激光高分辨率回波<sup>[17]</sup>

Fig.4 Target model and multi-angles laser high resolution echoes<sup>[17]</sup>

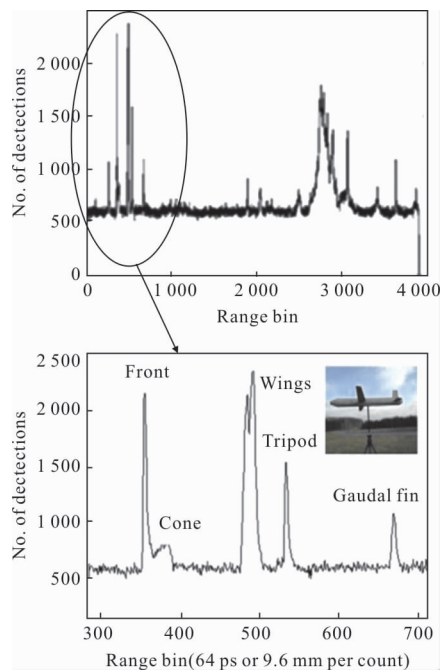


图 5 导弹模型激光高分辨率回波<sup>[17]</sup>

Fig.5 Laser high resolution echoes of missile model<sup>[17]</sup>

进一步开展了针对运动目标的激光高分辨率回波实验,采用脉冲宽度为 4 ps、重复频率为 40 MHz 脉冲激光源,系统视场角为 5 mrad,选用的单光子探测器的时间抖动小于 50 ps,实验中圆锥体目标沿

直线导轨以 0.1~0/36 m/s 之间速度运动, 采用互相关算法对运动目标的高分辨率激光回波进行处理, 实现了运动目标的高分辨率回波重建, 验证了对运动目标进行高分辨率回波探测的可行性<sup>[18]</sup>, 但该课题组未开展对高速运动目标进行回波重建的研究。

该机构 Sjoqvist 等还将高分辨率回波探测体制用于识别狙击枪瞄准镜等光学设备<sup>[19]</sup>, 其原理是利用光学镜头内部存在多层光学结构的特点, 当探测系统距离分辨率足够高时, 其回波呈现出多个峰值, 进而使反演光学系统内部结构成为可能。实验系统采用皮秒量级的脉冲激光源, 探测器为工作在盖革模式的单光子探测器, 光子响应时间为 54 ps, 采用收发同路的单站探测方式, 对放置在距系统 750 m 处的步枪瞄准镜、路标、角反射镜、反射镜等目标探测, 可明显识别出狙击镜, 且回波起伏能够大致反映出其内部反射镜的数目, 如图 6 所示。该系统的限制是需要较高信噪比条件下才能够有效地识别出光学系统的内部结构。

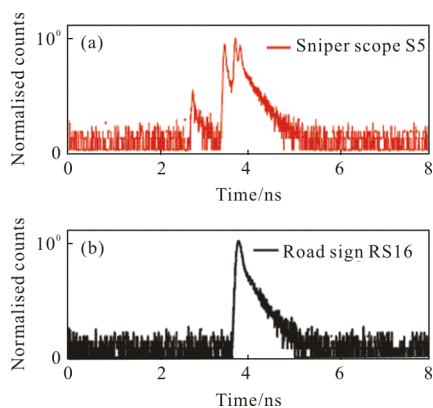


图 6 狙击镜和路标的高分辨率回波对比<sup>[12]</sup>

Fig.6 Comparison between sniper scope and road sign high resolution echoes<sup>[12]</sup>

荷兰国家应用科学院相关人员开展了针对海面浮标及船体的回波探测实验。采用波长为 1.57 μm、脉宽为 15 ns 的激光源, 能有效探测到位于 3.5~9.3 km 之间不同距离处的四个海面浮标及小船<sup>[20]</sup>, 但由于选用的激光脉宽对应的距离分辨率为 2.25 m, 获取的细节信息有限, 对小目标的识别效果不够理想, 更适合用于识别尺寸较大的目标<sup>[21-22]</sup>。

美国空军研究实验室 Peterson 等提出了高重

频时间调制激光脉冲串的非相干探测体制, 其原理是向目标发射经时间调制的脉冲激光串, 再将由目标散射的回波信号与原始信号进行互相关处理, 同时增加累计次数提高信噪比, 即可获取目标的位置以及高分辨率回波。实验表明, 该方法在信噪比低于 0.1 时获得的距离分辨率小于 25 cm, 与单光子探测体制相比, 具有较强的抗噪能力, 但探测远距离目标所需的激光能量更高<sup>[23]</sup>。

华东师范大学 Ren 等构建了 1 550 nm 波长的单光子测距系统, 原理如图 7 所示, 激光脉宽为 20 ps, 接收端为 1 GHz 带宽的 InGaAs/InP 高速光电探测器, 单光子探测器未与激光源同步时的时间抖动为 460 ps, 同步后脉宽可达到 80 ps, 这是限制系统距离分辨率的主要因素。实验中, 采用飞行时间测量方法在白天探测距离为 32 m 时获得了 8 cm 距离分辨率, 该体制为远距离目标探测提供了参考<sup>[24]</sup>。

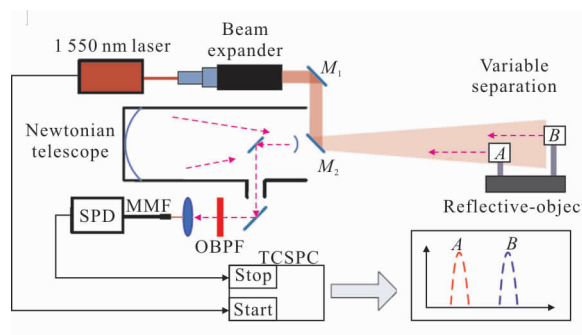


图 7 1 550 nm 波长时间相关光子计数探测系统示意图<sup>[24]</sup>

Fig.7 Principle diagram of TCSPC system at 1 550 nm wavelength<sup>[24]</sup>

目前, 关于高分辨率回波激光雷达的应用, 国内外研究机构在不同环境条件下针对不同的探测体制、系统参数以及不同类型、尺寸的目标开展了丰富的实验研究, 比较全面地验证了该技术在目标探测领域的应用价值, 但也暴露了其缺陷, 即一维回波能获取的目标信息有限且较抽象, 下一步应基于高分辨率回波激光雷达探测距离远、系统简单的优点, 进一步探索研究与可见光、红外等成像手段相结合的复合探测体制以及相关的数据融合方法。

#### 1.4 特征提取算法研究进展

英国何瑞瓦特大学 Wallace 等为了提取目标

不同波段的回波特征, 研制了基于时间相关单光子计数体制的多波段回波探测系统, 用于高分辨率回波获取和目标特征分析。该系统有六个独立的可见光和近红外波段的激光源和单光子探测通道, 将回波数据处理后, 分别提取不同通道回波的峰值个数、位置、强度等参数用于目标识别, 他们进一步采用 RJMCMC 算法对重叠目标回波进行处理, 反演出重叠区域回波的相关参数<sup>[25-26]</sup>。由于同一种目标在不同波段的回波具有差异, 如何有效融合不同波段的特征信息是应予以考虑的。

为了进一步提高分辨率, 对单光子系统电路进行改进减小了其时间抖动, 并在低信噪比条件下采用 RJMCMC 算法提高了 TCSPC 系统的距离分辨率, 改进后的系统在探测距离大于 300 m 时可获得的距离分辨率达到 1.7 cm, 但因采用的数据处理方法需要多次循环而十分耗时, 因此该方法的实时性较差<sup>[27]</sup>。

Mou 等人基于已建立的圆锥体目标的解析模型, 通过提取动态条件下圆锥体目标激光高分辨率回波中包含的目标特征信息, 运用遗传算法实现了圆锥体目标在不同姿态下的高度、半顶角, 以及尺寸不同时姿态信息的准确反演, 且该算法具备较好实时性, 对于通过高分辨率回波反演目标姿态参数进行目标识别有一定价值<sup>[28]</sup>, 但文中并未对其他复杂目标进行仿真验证, 因此, 此方法的普适性还有待考证。

由于高分辨率回波激光雷达获取的是目标的一维回波信号, 较为抽象, 需要对回波进行处理, 进一步提取能够反映目标本身特征的信息, 用以目标的识别。目前, 只有在一定的假设条件和先验知识下, 现有的算法能够在一定程度上提取目标特征, 进而对目标状态进行反演, 甚至识别较为有效; 反之, 特征提取效果则不够理想。因此, 下一步的工作是针对性地研究在限制条件更少的情况下更为有效、稳定的目标高分辨率回波特征提取方法或对现有算法进一步改进提高其性能。

## 2 断层成像激光雷达

### 2.1 基本原理

激光反射断层成像是由 X 射线透射断层成像

(Computed tomography, CT) 技术发展而来的, 第 1 节介绍的高分辨率回波激光雷达对目标具备距离分辨的特性, 引入断层成像方法后, 通过探测目标在不同角度的高分辨率回波信号, 可采用图像重建算法对目标外形轮廓进行重建。激光反射断层成像的原理及目标投影、重建流程分别如图 8、9 所示, 其理论基础是 Radon 变换、逆变换以及中心切片定理。

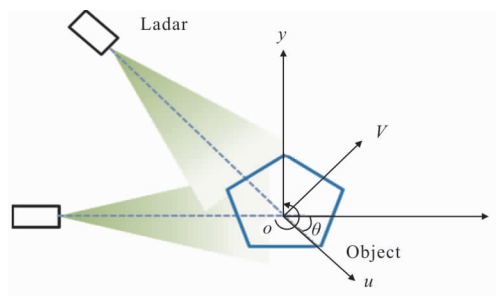


图 8 反射断层成像原理

Fig.8 Principle diagram of reflective tomography imaging

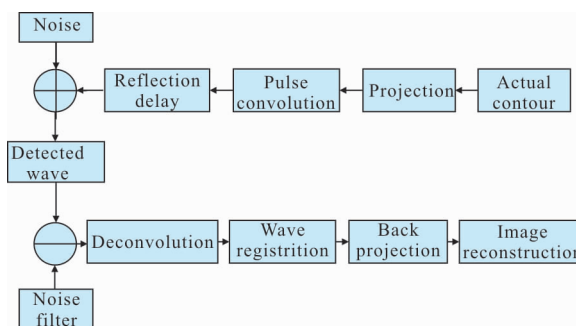


图 9 反射断层成像信号处理流程图

Fig.9 Flow chart of signal processing for reflective tomography imaging

如图 8 所示,  $x-y$  直角坐标系经  $\theta$  角旋转得到  $u-v$  坐标系,  $(x, y)$  和  $(u, v)$  的关系可以通过平面旋转角  $\theta$  来给出。发射激光覆盖沿探测方向上的整个目标表面, 与目标反射率分布卷积后得到沿距离方向上目标的一维高分辨率回波信号, 写为积分形式:

$$p(u, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) dv = \int_{-\infty}^{\infty} g(u \cos \theta - v \sin \theta, u \sin \theta + v \cos \theta) dv \quad (3)$$

式中:  $g(x, y)$  为目标轮廓;  $g(x, y)$  为  $g(x, y)$  的 Radon 变换, 即为目标轮廓在  $\theta$  方向上的一个投影。

如图 9 所示流程, 探测系统围绕目标进行圆周扫描, 采集多个角度的目标回波, 经过噪声滤波、回波解卷积处理, 然后采用图像重构算法反演得到能

够反映目标外部轮廓特征的二维图像,极坐标下可表示为:

$$g'(x, y) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^{+\infty} |f| P(f) \exp[j2\pi f(x \cos \theta + y \sin \theta)] df d\theta \quad (4)$$

式中: $P(f)$ 为 $p(u, \theta)$ 的一维傅里叶变换, $\hat{p}(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} |f| P(f) \exp[j2\pi f(x \cos \theta + y \sin \theta)] df$ 称为滤波投影; $g'(x, y)$ 为重建后的目标图像。该重建过程即经典的滤波反投影图像重建方法。

断层成像激光雷达技术的特点是采用单元探测器接收的与时间相关的目标一维回波信号进行目标图像重建,其距离分辨率只与发射脉冲宽度、探测器光电响应特性以及环境噪声等因素有关,而不受限于传统光学系统的口径,且系统整体结构比传统的光学成像平台更简单。

国内外的研究机构主要针对成像体制、数据处理算法以及成像实验等方面开展了目标反射断层成像技术的研究。

## 2.2 断层成像体制研究进展

美国林肯实验室最早开展了基于距离分辨的激光雷达反射断层成像技术的研究<sup>[29-30]</sup>,介绍了该成像体制的基本原理,分析了反射投影与透射投影的对应关系,指出可将反射投影转换为透射投影数据,从而采用透射断层成像的理论重建图像,并得出了具体的转换公式<sup>[31]</sup>,如此可将现有的透射断层算法经过转换运用到反射断层成像过程。

美国空军实验室 Matson 等分析得出了精确重建目标轮廓所需的反射投影角度个数以及每个投影内所需采样点数与目标尺寸、空间截止频率的关系,为实际投影数据采集提供了参考,建立了地基反射断层激光成像雷达对卫星目标的探测成像模型,进而可以计算得到对在轨卫星目标进行探测的角度范围及成像所需时间<sup>[32-33]</sup>。

瑞典国防研究院首次报道了采用 TPSPC 探测体制的反射断层成像激光雷达系统,该系统采用锁模超连续光纤激光器,激光波长为 1.5  $\mu\text{m}$ ,脉冲宽度为 4 ps,激光功率为 7 mW,重复频率为 40 MHz,光学系统视场角为 6.2 mrad,单光子探测器时间抖动为 50 ps,在测试距离为 53 m 时对小船模型的成像效果如图 10 所示,由于激光源脉宽很窄,且采用单光子探测体制,能够获得更高的分辨率,重建图像

较为清晰<sup>[34]</sup>,但该体制需要在信噪比较高的条件下才能很好地工作。

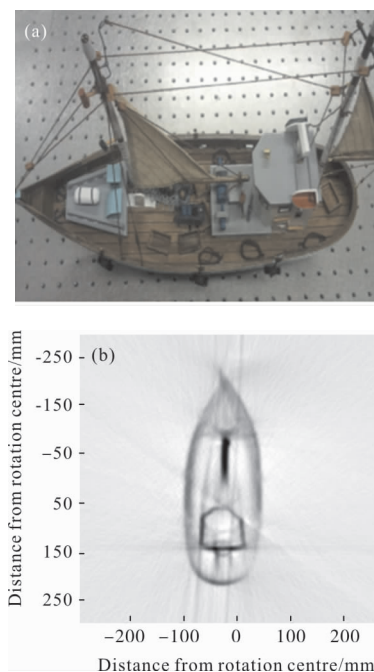


图 10 小船目标模型及重建图像

Fig.10 A boat target model and its reconstructed image

美国 Longmont 光学研究中心 Murray 等采用对发射激光脉冲进行编码、对回波解码的方式,提高了激光雷达系统的探测距离和回波信噪比。成像实验中,探测距离为 22.4 km,系统采集放置在 304.8 m 高处、直径为 1 m 的多个匀速旋转角反射器的多组回波,获得的目标重建图像分辨率达到 15 cm,实验场景及目标重建结果分别如图 11、12 所示(图 11 中,1 in=2.54 cm),该研究验证了反射断层成像体制对远距离低速旋转目标成像的可行性<sup>[35]</sup>。

电子工程学院瞿福琪等为了提高断层成像激光雷达系统的探测距离,提出了采用啁啾脉冲信号的成像探测体制,其核心部分是借用微波雷达领域的脉冲压缩技术来获得大时宽宽带宽基信号,从而兼顾远距离探测和高距离分辨率,但激光所处的波段频率更高,且脉冲压缩属于相干探测体制,增加了系统的复杂性,对计算精度要求更高,因此该方法在实际应用中并不成熟。瞿福琪等以星对星激光雷达断层成像为应用背景,采用发射啁啾调制激光脉冲的探测体制来实现空间远距离目标探测,分析了限制伴星探测对目标星进行断层成像的分辨率的条件,估

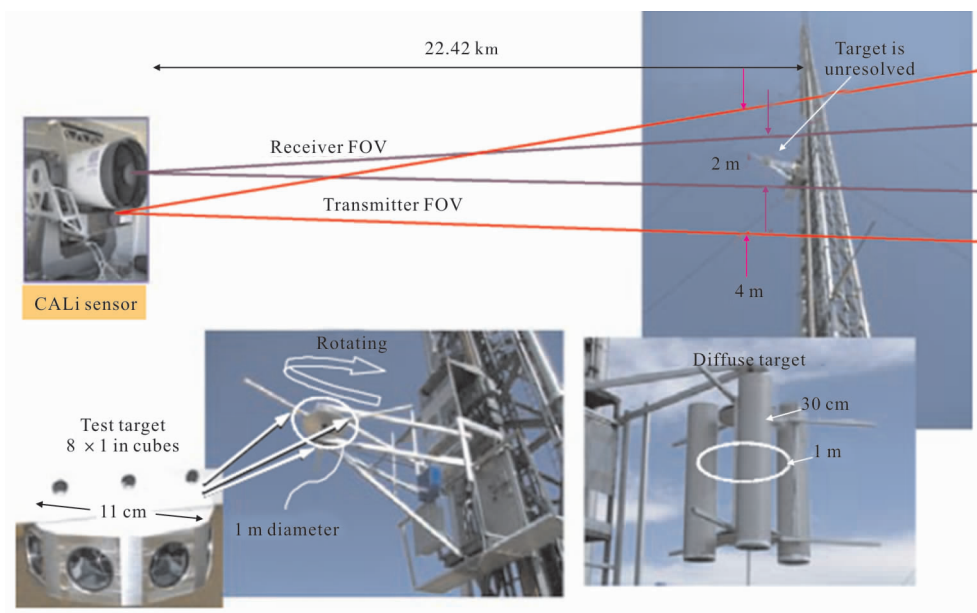


图 11 远距离旋转目标重建场景

Fig.11 Scene of reconstructing of a rotating target at long distance

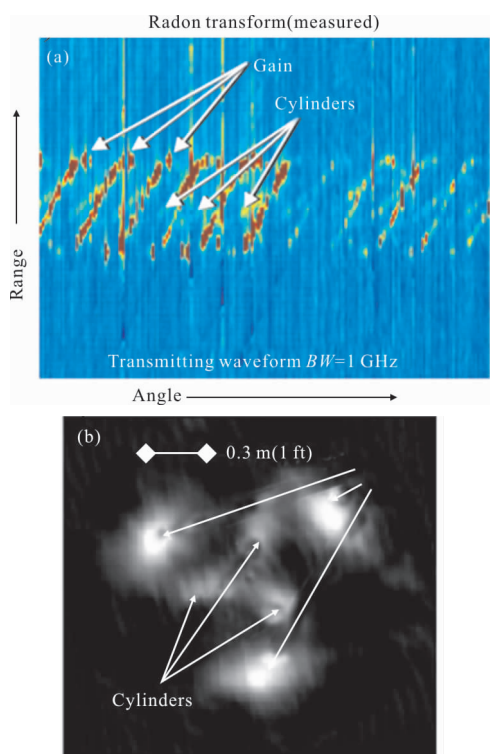


图 12 远距离旋转目标重建图像

Fig.12 Reconstructed image of a rotating target at long distance

算了观测星对目标星的成像时间。仿真实验中,发射带宽为 2 GHz 啁啾信号,对高度为 100 km 的卫星进行伴星成像,在观测角度大于时得到了 0.1 m 的成像分辨率,最小成像时间为 635.4 s,从理论上验

证了星对星反射断层成像的可行性<sup>[36]</sup>。

中国科学院上海光学精密机械研究所(下面简称上海光机所)Jin 等研究了反射断层成像过程中,由于投影数据不充分和投影角度受限等原因导致的成像分辨率降低的问题,通过计算激光雷达成像系统的理论点扩散函数,采用瑞利判据获得了系统的理论成像分辨率,并将该成像分辨率与脉冲宽度和探测器参数所确定的距离分辨率建立了对应关系。理论分析和实验结论均表明:当投影角度受限范围小于 40°时,成像分辨率急剧下降,此时通过增加投影角度采样间隔,无法提高成像的分辨率<sup>[37]</sup>。

目前,关于激光反射断层成像体制的研究包括了成像原理、反射成像与透射成像的对应关系、投影受限及稀疏投影对分辨率的影响、相干及非相干探测方法以及单光子探测方法等方面的内容。图像重建方法主要采用经典的滤波反投影方法,该法优点是重建效率高,但在噪声影响、投影受限及稀疏投影条件下,其重建效果不佳,因此,研究抗噪性强、效率高、能够在投影数据残缺条件下对目标图像有效重建的算法是下一步的研究重点。

### 2.3 投影数据处理算法研究进展

美国空军实验室 Ford 等将相位恢复(Phase retrieve)算法用于目标投影数据的自动配准,主要是为了解决由于不同角度下采集的目标投影数据相互



之间存在位移的问题。在重建目标图像之前,需要尽可能将所有投影数据关于目标自身的旋转中心进行对齐,进而能够提高重建图像质量。他们给出了采用相位恢复算法进行投影配准的具体步骤及参数设置,对仿真卫星目标进行了相位恢复测试,结果表明该方法能在一定程度上提高重建图像的分辨率<sup>[38]</sup>,但该方法对迭代次数以及迭代规则敏感,需进一步改进。

上海光机所 Jin 等采用特征点跟踪法对不同角度的目标反射投影配准,运用该算法的前提是目标表面存在反射率差别明显的特征点,通过跟踪这些特征点的位置来实现相邻投影的配准,进而提高目标重建图像质量。实验表明,采用该方法对投影配准的实际效果并不理想,只能对投影数据进行粗对准,由于要求目标本身存在可跟踪的特征点,也限制了其应用范围<sup>[39]</sup>。为了进一步增强重建图像质量, Jin 等采用相位恢复算法对目标反射投影精确对准,该算法的理论依据是投影数据的傅里叶模值不会受到投影平移的影响,可从未对准的投影数据中对目标自身的傅里叶分布进行估计,选取不同的初始矩阵,设置合适的空间域和频域的约束条件,进行反复的迭代运算,实现对目标图像的精确重建。结果表明,该算法的实际重建效果要好于特征点跟踪算法,且不要求目标自身存在明显的特征点<sup>[40]</sup>。两种算法对于同一圆锥体的重建图像如图 13 所示。

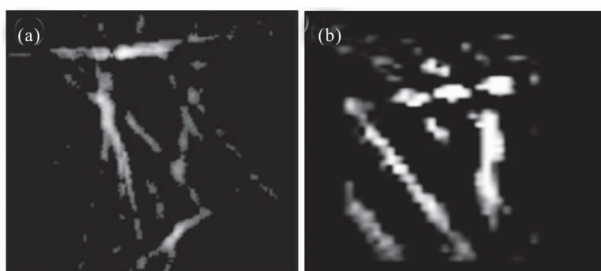


图 13 圆锥目标重建图像<sup>[39-40]</sup>

Fig.13 Reconstructed image of cone<sup>[39-40]</sup>

电子工程学院谷雨等研究了滤波反投影重建算法中常用的四种典型滤波器的时频特性,指出在有 Poisson 噪声干扰的情况下,反射断层重建图像的振荡现象与所选用的滤波器有关,滤波器的主瓣高度和旁瓣衰减会对重建图像的分辨率产生影响,提出性能更优的滤波函数是提高重建图像分辨率的一种

思路<sup>[41]</sup>。当发射激光的脉冲宽度大于采样周期时,目标回波可被视作反射率分布与发射脉冲的卷积,导致目标成像分辨率降低,谷雨等通过假设适当的先验条件,采用变分贝叶斯方法对一维回波信号进行非盲解卷积处理,实现对回波的脉冲压缩,从而提升了重建图像的空间分辨率,并开展了验证实验,激光脉冲宽度为 6.5 ns, Si-APD 探测器截止频率为 3 GHz,卫星模型尺寸为米级数量级,成像距离为 40 m,通过对投影数据按上述方法解卷积,成像分辨率改善了 4.6 dB,未解卷成像结果和解卷后成像结果分别如图 14(a)、(b)所示<sup>[42-43]</sup>。

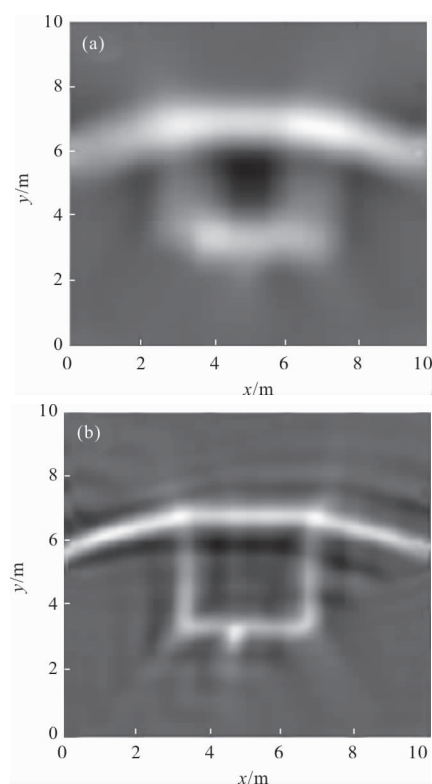


图 14 卫星目标模型投影解卷积前后的重建图像<sup>[42]</sup>

Fig.14 Reconstructed images of satellite target model before and after projections deconvolution<sup>[42]</sup>

电子工程学院林放等基于目标投影回波多角度测量的相似性,采用增量维纳滤波器,提出了多帧投影迭代盲解卷积方法,对一维回波信号进行盲解卷积,该方法通过探测系统的先验知识,同时估计目标反射系数投影分布和入射脉冲波形信息,结合多角度测量的公约数性质,对估计结果迭代优化,从而获得分辨率更高的目标反射率分布投影。实验中,激光脉宽为 1 ns,探测器截止频率为 3 GHz,目标为长 54 cm、

宽为 30 cm 的长方体模型,探测距离为 2.38 m,采用滤波反投影重建算法得到的目标投影解卷积前后的重建图像如图 15(a)、(b)所示,该方法能在一定程度上提高成像分辨率<sup>[44]</sup>。

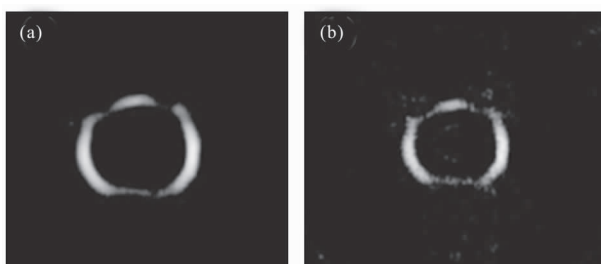


图 15 长方体模型投影解卷积前后的重建图像<sup>[44]</sup>

Fig.15 Reconstructed images of rectangular parallelepiped model before and after projections deconvolution<sup>[44]</sup>

对投影数据进行处理的主要目的是保证图像重建的准确度和提高分辨率。对目标不同角度下的投影进行配准是提高重建图像质量的必要步骤。目前,主要有特征点跟踪方法、相位恢复方法两种,前者其应用受限于合作目标,实用性不强,后者需要在时域和频域进行大量迭代运算及参数优化,较为耗时,且迭代参数的选取对结果的影响差别较大,稳定性不够。因此,寻找和研究更为有效的投影配准算法是断层成像技术投入实际应用必须解决的问题。关于投影解卷积过程,由于投影是一维信号,可将现有的多种一维信号解卷积技术用于断层成像过程,验证其有效性,择优使用。

#### 2.4 断层成像实验研究进展

林肯实验室 Knight 等采用波长为 532 nm、脉宽为 100 ps 的脉冲激光对尺寸为 170 cm×53 cm 圆锥体模型进行了成像实验,假设其散射特性近似符合朗伯体模型,由于选用的光电倍增管的响应时间为 840 ps,该系统的距离分辨率为 12.6 cm,通过在目标前后分别设置参考屏用于对目标反射投影数据的对齐,采用滤波反投影重建方法重建得到的圆锥体目标轮廓图像如图 16(a)所示<sup>[30-31]</sup>。该实验室 Knight 等还进一步采用 EG&G 条纹管相机作为接收单元,该型探测器可响应脉宽为 260 ps 的回波脉冲,实际重建图像获得的分辨率为 4 cm,分辨率与前者相比提高了约 3 倍,同一圆锥体的重建图像如

图 16(b)所示<sup>[29]</sup>。

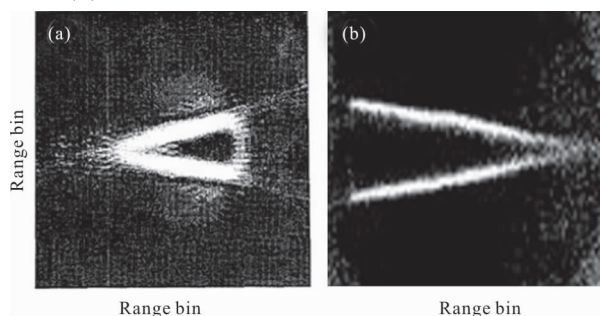


图 16 不同分辨率的圆锥体重建图像<sup>[30-31]</sup>

Fig.16 Reconstructed image of cone with different resolutions<sup>[30-31]</sup>

美国空军实验室 James 等基于激光雷达成像平台(Heterodyne Imaging Laser Testbed, HILT)开展了成像测试。实验中,采用外差探测方式,发射波长为 10.6 μm、脉宽为 1.3 ns 的脉冲激光,回波数据采用带宽为 1 GHz 单元探测器接收,距离分辨率为 30 cm,对位于 1 km 处如图 17(a)所示的卫星模型目标开展断层成像实验,其断层成像的结果如图 17(b)所示,可以看出重建的图像轮廓与目标模型的真实外形大致相符<sup>[45]</sup>。

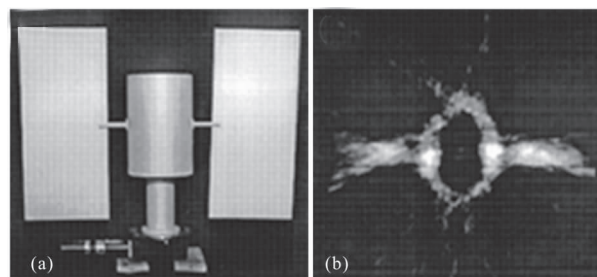


图 17 卫星目标模型及重建图像<sup>[45]</sup>

Fig.17 A satellite target model and its reconstructed image<sup>[45]</sup>

该机构 Matson 等基于 HI-CLASS 激光雷达系统对在轨卫星 LACE 搭载的两个间距为 6 m 的角反射器进行反射断层成像实验。该高性能激光雷达监视系统采用的激光源波长为 11.15 μm,脉宽小于 1.5 ns,重复频率为 30 Hz,脉冲串长度为 10 μs,发射脉冲间隔为 40 ns。实验中,由于在轨卫星观测角度范围受限,无法获得范围的目标回波,是在不完全投影条件下重构目标图像,最终达到的成像分辨率约为 0.2 m,图 18(a)、(b)分别为目标重建图像、经阈值化处理的重建图像,该试验成功验证了反射断层

成像激光雷达体制对远距离空间目标进行探测的可行性<sup>[46]</sup>。

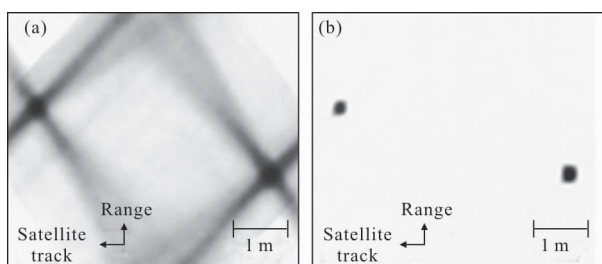


图 18 卫星搭载的角反射器目标重建图像<sup>[46]</sup>

Fig.18 Reconstructed image of corner cube targets mounted on the satellite<sup>[46]</sup>

目前,针对目标激光反射断层成像技术的实验研究主要是针对静态的放置于地面的仿真目标模型开展的,实际对于远距离空间目标的应用案例较少,从目前可查阅的公开报道来看,只有参考文献[46]开展了此类实验。总之,相关的实验研究验证了该技术对旋转目标进行图像重建的可行性。进一步开展针对远距离空中、空间目标的反射断层成像实验,对于验证该体制的实用性很有必要。另外,对窄脉宽激光发射技术、高速探测器及高速存储技术的研究,对于发挥激光反射断层成像技术的优势有实际意义。

### 3 发展方向

综上所述,近年来国内外研究机构持续开展了关于高分辨率回波激光雷达技术及反射断层成像激光雷达技术的研究,具体研究内容涵盖了基本原理、软件仿真、数据处理算法、实验平台及硬件改进等多方面的关键内容。

随着激光雷达器件和技术的不断发展,国内研究机构在基于距离分辨的激光雷达技术领域取得了一定的科研成果,但没有形成像国外那样的工程实用化仿真系统和试验平台。整体来讲,下一步的研究方向应主要包括:

(1) 构建工程实用化的仿真系统,加强仿真模型的验证和检验。主要是为了精确地评估仿真得到的目标高分辨率回波及反射断层重建图像质量是否与实际相符,进而确保仿真系统的可信度,增强实用性;

(2) 建立目标较为完备的高分辨率回波数据库。

有针对性地收集、存储特定目标的实验数据,一方面可以为验证仿真系统的可靠性提供依据,另一方面可为这两种激光雷达系统的实际应用提供参考,验证相关算法的有效性;

(3) 对于高分辨率回波激光雷达技术,由于其获取的是关于目标的一维信号,与目标的图像信息相比较抽象,如何从中反演及提取目标的有效特征信息是亟需进一步解决的问题。目前,关于目标运动对激光高分辨率回波影响的研究较少,可作为下一步的研究重点;

(4) 对于断层成像激光雷达技术,实际应用中需要对非合作目标进行多角度探测及投影接收,制约其实用的一个关键难题是要将各个角度的投影数据关于目标的自旋转中心对准,数据对准的精度直接影响到目标重建图像的质量。因此,研究如何从投影数据本身提取、确定目标旋转中心和有效的投影对准算法是关键内容;

(5) 目前,断层成像激光雷达成像是直接采用透射 CT 成像算法,从本质上讲,断层成像提取的是目标的轮廓像,CT 成像提取的是目标内部的密度分布,为了提高断层成像质量,有必要对现有 CT 重建算法进行改进,使其更符合反射断层成像的应用场景;

(6) 研发、更新实际平台所需的硬件设备,同时基于现有硬件条件进行相关算法改进和创新。高分辨率回波探测及反射断层成像激光雷达系统为实现对目标远距离、高精度探测,均需要大功率激光器、窄脉宽激光光源、高灵敏度高速光电探测器及高速信号采集存储设备等关键技术的支撑,国内在硬件方面与国外相比并无技术优势,因此,在加快高性能硬件研究的同时,基于现有条件进行高分辨率回波信号处理算法的改进和创新是可行的思路。

### 4 结论

高分辨回波激光雷达和反射断层成像激光雷达是激光雷达技术的重要组成部分,在对远距离空间目标进行高精度探测及成像方面具有广阔的应用前景。文中介绍了两种典型的基于距离分辨的激光雷达技术的探测及成像体制,总结归纳了近年来国内外研究机构在成像体制、软件仿真、数据处理算法以

及实验测试等方面的研究进展,通过比较、分析其优缺点,探索了下一步的研究和发展方向,总结了现有研究工作的不足,同时针对亟待解决的关键技术问题提出了可行的研究思路,可为空间目标远距离高精度探测及成像激光雷达技术的研究、发展提供参考。

#### 参考文献:

- [1] Hu Yihua. Laser imaging technology for space target precise reconnaissance [J]. *National Defense Science & Technology*, 2016, 37(1): 30–36. (in Chinese)  
胡以华. 空间激光成像目标精确侦察技术 [J]. 国防科技, 2016, 37(1): 30–36.
- [2] Sun J, Zhou Y. Short pulselength direct-detect laser reflective tomography imaging lidar: field results [C]// SPIE NanoScience +Engineering. International Society for Optics and Photonics, 2010, 7419: 74190W.
- [3] Lin F, Wang J C, Lei W H, et al. Detection of barycenter of planar target based on laser reflective tomography [J]. *Optics Communications*, 2017, 402: 540–544.
- [4] Chen V C, Ling H. Time-frequency transforms for radar imaging and signal analysis [D]. Boston MA: Artech House Inc, 2001.
- [5] Li Y, Wu Z. Targets recognition using subnanosecond pulse laser range profiles [J]. *Optics Express*, 2010, 18 (16): 16788–16796.
- [6] Steinvall O, Chevalier T. Range accuracy and resolution for laser radars [C]//SPIE, 2005, 5988: 73–88.
- [7] Steinvall O K, Carlsson T. Three-dimensional laser radar modeling [C]//SPIE, 2001, 4377: 23–34.
- [8] Steinvall O, Elmqvist M, Chevalier T, et al. Measurement and modeling of laser range profiling of small maritime targets [C]//Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications VI. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8542: 85420I.
- [9] Berginc G. Scattering models for 1-D - 2-D - 3-D laser imagery [J]. *Optical Engineering*, 2016, 56(3): 031207.
- [10] Li Y, Wu Z, Gong Y. Laser range profile of the sphere [C]//Photonics Asia, 2010: 078501J.
- [11] Li Y, Wu Z, Gong Y. Ultra-short pulse laser one-dimensional range profile of a cone [J]. *Nuclear Inst & Methods in Physics Research A*, 2011, 637(1): S149–S152.
- [12] Gong Y, Li Y, Wu Z, et al. Analytical model of a laser range profile from rough convex quadric bodies of revolution [J]. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 2012, 29(7): 1383–1388.
- [13] Chen Jianbiao, Sun Huayan, Zhao Yanzhong. Simulation and experimental research on one dimensional lidar range profile of airborne target [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 318–325.
- [14] Steinvall O, Sjöqvist L, Henriksson M, et al. High resolution lidar using time-correlated single-photon counting [C]//SPIE, 2008, 6950: 695002.
- [15] Sjöqvist L, Henriksson M, Jonsson P, et al. Time-of-flight range profiling using time-correlated single-photon counting [C]//Technologies for Optical Countermeasures IV. International Society for Optics and Photonics, 2007, 6738: 67380N.
- [16] Steinvall O, Chevalier T, Grönwall C. Simulating the performance of laser imaging and range profiling of small surface vessels [C]//SPIE Defense, Security, and Sensing, 2013, 8731: 87310U.
- [17] Steinvall O, Tulldahl M. Laser range profiling for small target recognition [C]//SPIE Defense +Security, 2016, 9832: 98320E.
- [18] Jonsson P, Hedborg J, Henriksson M, et al. Reconstruction of time-correlated single-photon counting range profiles of moving objects [C]//Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications IX. International Society for Optics and Photonics, 2015, 9649: 964905.
- [19] Sjöqvist L, Allard L, Henriksson M, et al. Target discrimination strategies in optics detection [C]//SPIE Security+Defence. International Society for Optics and Photonics, 2013, 8898: 8898K.
- [20] Heuvel J C V D, Pace P, Bekman H H P T, et al. Experimental validation of ship identification with a laser range profiler [C]//SPIE, 2008, 6950: 23.
- [21] Van den Heuvel J C, Bekman H H P T, van Putten F J M, et al. Search-lidar demonstrator for detection of small sea-surface targets [C]//Laser Radar Technology and Applications XIII. International Society for Optics and Photonics, 2008, 6950: 69500W.
- [22] Van den Heuvel J C, Schoemaker R M, Schleijsen R H

- M A. Identification of air and sea-surface targets with a laser range profiler [C]//Laser Radar Technology and Applications XIV. International Society for Optics and Photonics, 2009, 7323: 73230Y.
- [23] Peterson R D, Schepler K L. Timing modulation of a 40-MHz laser-pulse train for target ranging and identification [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(36): 7191.
- [24] Ren M, Gu X, Liang Y, et al. Laser ranging at 1 550 nm with 1 GHz sine-wave gated InGaAs/InP APD single-photon detector [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (14): 13497-13502.
- [25] Wallace A M, Sung R C W, Buller G S, et al. Detecting and characterising returns in a pulsed lidar system [J]. *Vision, Image and Signal Processing, IEE Proceedings*, 2006, 153(2): 160-172.
- [26] Wallace A M, Buller G S, Sung R C W, et al. Multi-spectral laser detection and ranging for range profiling and surface characterization [J]. *Journal of Optics A Pure & Applied Optics*, 2005, 7(6): S438.
- [27] Warburton R E, McCarthy A, Wallace A M, et al. Enhanced performance photon-counting time-of-flight sensor [J]. *Optics Express*, 2007, 15(2): 423-429.
- [28] Mou Y, Wu Z S, Li Z J, et al. Geometric detection based on one-dimensional laser range profiles of dynamic conical target [J]. *Applied Optics*, 2014, 53 (35): 8335-8341.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Knight F K, Kulkarni S R, Marino R M, et al. Tomographic techniques applied to laser radar reflective measurements [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 1989, 2 (2): 143-160.
- [32] Matson C L, Magee E P, Holland D E. Reflective tomography using a short-pulselength laser: system analysis for artificial satellite imaging [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(9): 2811-2820.
- [33] Magee E P, Matson C L, Stone D. Comparison of techniques for image reconstruction using reflective tomography [C]//Image Reconstruction and Restoration. International Society for Optics and Photonics, 1994, 2302: 95-103.
- [34] Henriksson M, Olofsson T, Grönwall C, et al. Optical reflectance tomography using TCSPC laser radar [C]//Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications VI. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8542: 85420E.
- [35] Murray J T, Triscari J, Fetzer G, et al. Tomographic lidar [C]//Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications. Optical Society of America, 2010: LSWA1.
- [36] Qu Fuqi, Hu Yihua, Jiao Junjun, et al. Satellite-to-satellite lidar imaging using reflective tomography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(1): 48-53. (in Chinese)
- [37] Jin X, Sun J, Yan Y, et al. Imaging resolution analysis in limited-view Laser Radar reflective tomography [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(10-11): 2575-2579.
- [38] Ford S D, Matson C L. Projection registration in reflective tomography [C]//Digital Image Recovery and Synthesis IV. International Society for Optics and Photonics, 1999, 3815: 189-199.
- [39] Jin X, Sun J, 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.
- [40] 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.
- [41] Gu Yu, Hu Yihua, Hao Shiqi, et al. Study on influence of filter back-projection on laser reflective tomography [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(12): 1500-1504. (in Chinese)
- [42] Gu Yu, Hu Yihua, Hao Shiqi, et al. Application of variational Bayesian deconvolution method in laser reflective tomography imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0611003. (in Chinese)
- [43] 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.
- [44] Lin Fang, Wang Jincheng, Zhang Hua, et al. Application of multi-frame iterative blind deconvolution method in

- laser reflective tomography imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0911001.
- [45] Lasche J B, Hanes S A, Rowland K B, et al. Imaging with heterodyne laser radar and reflection tomography [C]//High -Resolution Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications II. International Society for Optics and Photonics, 2000, 4124: 275-286.
- [46] Matson C L, Mosley D E. Reflective tomography reconstruction of satellite features—field results [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(14): 2290-2296.