

# 激光反射层析成像仿真方法研究

陈剑彪<sup>1\*</sup>, 孙华燕<sup>2</sup>, 孔舒亚<sup>3</sup>, 赵延伸<sup>2</sup>, 单聪淼<sup>4</sup>

<sup>1</sup>航天工程大学研究生院, 北京 101416;

<sup>2</sup>航天工程大学电子与光学工程系, 北京 101416;

<sup>3</sup>中国人民解放军 66135 部队, 北京 100042;

<sup>4</sup>中国航天员科研训练中心, 北京 100094

**摘要** 为了解决复杂结构和形状的目标进行消隐数值计算时计算量大, 精度较低的难点, 提出基于 OpenGL 的目标消隐及可见部分显示方法, 启用深度缓冲区进行深度测试, 利用计算机图形加速卡在硬件层级迅速实现目标消隐并得到面元距离信息, 提高了计算效率和精度, 并通过一次光照获取目标面元与探测视线夹角的余弦值。考虑激光脉冲的时空分布特点, 结合仿真得到的目标反射率分布, 采用卷积模型计算目标的激光回波波形, 仿真分析了发射激光脉宽、目标表面材料对目标激光反射层析成像质量的影响。

**关键词** 成像系统; 激光雷达; 反射层析成像; 三维建模; OpenGL 处理; 图像重建

中图分类号 TN951

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.131104

## Simulation Method of Laser Reflection Tomography Imaging

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

<sup>1</sup>Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

<sup>2</sup>Department of Electronic and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

<sup>3</sup>66135 Army, Beijing 100042, China;

<sup>4</sup>China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China

**Abstract** This study proposes a method of object shading and display of the object's visible parts based on OpenGL, which is used to solve the problems of large calculation amount and low accuracy when the blanking process of a complex structure object is realized by a numerical method. By enabling depth buffers and depth testing, the computer graphics acceleration card is used in a hardware level to quickly achieve the goal of hidden and surface element distance information. The calculation efficiency and accuracy are improved. Moreover, the cosine of the angle between the target element and the detection line of sight is obtained by a single illumination. Subsequently, the target reflectivity distribution is obtained by a simulation considering the temporal and spatial distribution characteristics of the laser pulse. The convolution model is then used to calculate the laser echo waveform of the target. The effects of the laser pulse width and the target surface material on the quality of laser reflection tomography are analyzed using the presented method.

**Key words** imaging systems; laser radar; reflection tomography imaging; three-dimensional modeling; OpenGL processing; imaging reconstruction

**OCIS codes** 110.2960; 100.3010; 100.6950; 110.1758

## 1 引言

激光反射层析成像概念由林肯实验室提出, 其原理是利用单元探测器接收多视角下目标反射回波, 通过重构算法反演目标的投影轮廓像, 在空间目

标探测及成像领域具有广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>。

近年来, 相关研究机构相继开展了激光反射层析成像关键技术的研究, 美国 Longmont 光学研究中心 Murray 等<sup>[3]</sup>验证了反射层析成像体制对远距离低速旋转目标成像的可行性; 瑞典国防研究院首

收稿日期: 2019-01-07; 修回日期: 2019-01-11; 录用日期: 2019-01-29

\* E-mail: general\_chen2041@163.com

次报道了采用时间相关单光子计数(TPSPC)探测体制的反射层析成像激光雷达系统<sup>[4]</sup>;美国空军实验室 Ford 等<sup>[5]</sup>将相位恢复算法用于目标投影数据的自动配准,解决了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;中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院上海技术物理研究所也开展了相关的反射投影处理算法和实验研究<sup>[6-11]</sup>。目前,关于激光反射层析成像的仿真方法研究较少,而通过仿真方法开展反射层析成像技术的相关研究具有重要的应用价值。

由于复杂空间目标模型的表面难以利用解析表达式描述,因此计算目标激光回波时,一般需要3个步骤:1)建立目标三维模型并进行面元划分;2)对特定姿态下的目标模型进行消隐处理;3)获取目标模型的顶点、面元的空间坐标。可以通过三维建模软件编辑、处理后获得所需的目标三维模型,目标消隐过程以及顶点、面元坐标可以采用相关数值算法直接得到。数值方法对于面元之间相互遮挡关系的判断过程比较繁琐,需要多次循环计算和分析比较,计算精度与遮挡判决条件的有效性直接相关,且计算量很大。对于复杂结构和形状的目标,小面元划分得越细,面元数量越多,计算时间呈指数增加;但若减少小面元数量,增大小面元面积,则面元之间相互遮挡关系的判断误差大幅增加,计算精度降低。

OpenGL强大的图形函数可以将大量数据转换为图形或图像,可在屏幕上显示和交互,即实现快速可视化功能,其在深度缓存中存储每个像素与视点之间的深度值(即距离值,用于描述像素点距离观察点的远近),可以启用深度缓冲区进行深度测试,并利用计算机图形加速卡(显卡)在硬件层级迅速实现目标的消隐<sup>[12-13]</sup>。

为提高三维目标激光回波仿真过程中的计算精度与效率,本文将 OpenGL 的可视化与自动消隐功能用于目标激光回波仿真建模,提出一种基于三维建模与 OpenGL 处理的复杂空间目标激光回波计算方法,结合目标表面散射特性,仿真目标激光反射层析成像过程。通过对卫星三维模型仿真成像,分析发射激光脉宽、目标表面材料等因素对目标激光反射层析成像质量的影响。

## 2 反射层析成像原理

激光反射层析成像由 X 射线透射层析成像技术发展演变而来,该成像方式是通过探测收集目标在不同角度的激光高分辨率回波信号,然后采用图

像重建算法完成目标外形轮廓重建,而图像重建的理论基础是 Radon 变换及其逆变换以及中心切片定理。激光反射层析成像的原理及目标投影、重建流程分别如图 1 和图 2 所示。

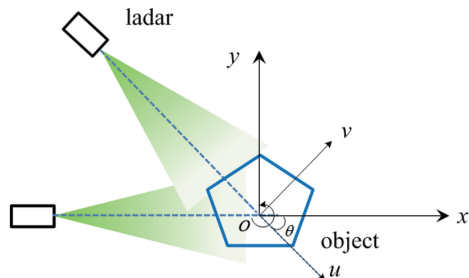


图 1 反射层析成像原理

Fig. 1 Principle of reflective tomography imaging

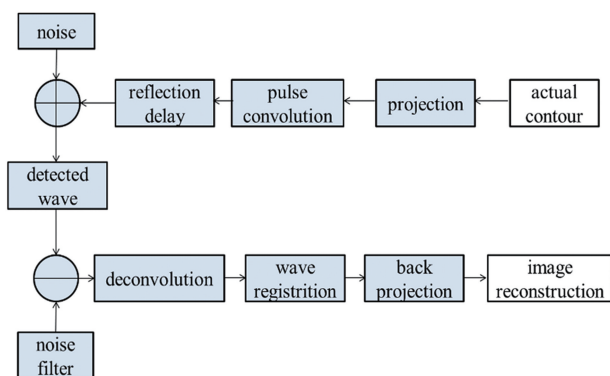


图 2 激光反射层析成像流程图

Fig. 2 Diagram of reflective tomography imaging

如图 1 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  $\theta$  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,即可得到沿距离方向上目标的一维高分辨率回波信号,积分形式为

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

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(u \cos \theta - v \sin \theta, u \sin \theta + v \cos \theta) dv, \quad (1)$$

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

在图 2 所示的流程图中,探测系统围绕目标进行圆周扫描,并采集多个角度的目标回波,经过噪声滤波和回波解卷积处理后,采用图像重构算法反演得到反映目标外部轮廓特征的二维图像。重建结果在极坐标下可表示为

$$g'(x, y) =$$

$$\int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |f| P(f) \exp [j2\pi f (x \cos \theta + y \sin \theta)] df d\theta, \quad (2)$$

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

激光反射层析成像技术采用单元探测器接收目标一维回波信号, 然后进行目标图像重建, 其理论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, 不受限于传统光学系统的口径。

### 3 仿真系统建模

#### 3.1 激光脉冲时空分布模型

激光脉冲与目标表面作用过程的关键因素包括: 目标与探测系统的距离、目标表面材料散射特性以及子探测系统视线方向与目标表面面元法线方向的夹角。激光器输出的单个激光脉冲在时域上具有高斯线型。设发射激光波长为  $\lambda$ , 重复频率为  $f'$ , 则在  $t$  时刻发射激光功率  $P(t)$  的表达式为<sup>[14]</sup>

$$P(t) = E_p \cdot \frac{2}{\tau} \cdot \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{4 \cdot \ln 2 \cdot (t - 2\tau)^2}{\tau^2}\right], \quad (3)$$

式中:  $\tau$  为功率的半峰全宽(FWHM), 也是脉冲宽度的一个标准测量指标, 通过改变  $\tau$  值, 即可调整发射激光脉冲的时域波形;  $E_p$  为发射激光的单脉冲能量。

基模高斯光束是亥姆霍兹方程在缓变振幅近似条件下的一个特解。在三维直角坐标系中, 令  $r^2 = x^2 + y^2$ , 则光束的光场表达式为<sup>[14]</sup>

$$E(r, z) = \frac{A_0 \omega_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{w^2(z)}\right] \exp \times \left\{-i \left\{k \left[\frac{r^2}{2R(z)} + z\right] - \psi(z)\right\}\right\}, \quad (4)$$

式中:  $A_0$  为高斯光束振幅常量;  $\omega_0$  为束腰半径;  $k = 2\pi/\lambda$  为光波传播常数;  $w(z)$  为自由空间中传输距离  $z$  处的光束半径;  $R(z)$  为光束的等相面曲率半径。

根据(3)~(4)式可得,  $t$  时刻坐标  $(x, y, z)$  处的激光辐射照度  $E(x, y, z, t)$  的表达式为<sup>[14]</sup>

$$E(x, y, z, t) = \frac{4P(t)}{\pi w^2(z)} \exp\left[-2 \frac{(x^2 + y^2)}{w^2(z)}\right]. \quad (5)$$

#### 3.2 建立目标三维模型

利用 3DS MAX 三维建模软件建立目标模型, 并进行面元网格划分和尺寸设置。为了描述目标空间位置, 建立如图 3 所示的卫星目标本体坐标系与观测坐标系, 其中卫星翼展为 6.8 m。在初始条件下, 图 3 中观测坐标系  $o-xyz$  与目标本体坐标系  $o-x'y'z'$  重合, 原点  $o$  为卫星质心,  $ox'$  轴与卫星太阳能帆板转动轴重合,  $oy'$  轴指向卫星正上方。观测坐标系的  $oz$  轴由目标质心指向观测系统。对于单站激光探测目标情况, 入射激光方向与观测方向相同, 均与  $oz$  轴重合。

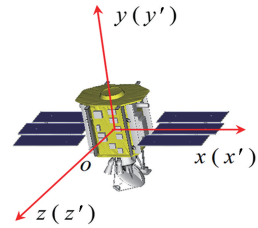


图 3 卫星模型坐标系设置

Fig. 3 Setting of coordinate for satellite model

#### 3.3 获取目标面元参数

通过编程读取 3.2 节建立的三维目标模型数据文件, 在 OpenGL 中根据当前观测时刻的目标姿态对目标进行旋转变换, 采用正交投影模式将三维目标投影到二维屏幕上, 在正交投影模式下, 目标在屏幕图像上的大小与目标的相对距离无关, 目标所占像素数目越多, 表示目标表面划分越细, 每个像素面元所代表的实际面积越小。OpenGL 方法不需要计算目标遮挡关系, 直接进行深度测试, 即可完成目标的消隐和可见部位的显示, 可见部分即为目标能够被激光照明的区域。同时获取目标的距离信息会后, 可以将消隐后的目标二维距离像直接在屏幕上显示, 具体的计算量与所设置的图像像素有关, 综合考虑计算精度和效率, 本文选取的图像像素为 500 pixel × 500 pixel, 如图 4(a) 所示。此方法利用 OpenGL 处理复杂目标的消隐, 大幅提高了计算准确度和效率, 并且避免了对面元遮挡关系进行逻辑判断引起的误差。采用文献[15]的算法计算面元的遮挡关系, Matlab 软件计算目标消隐后的图像耗时数分钟, 而采用 OpenGL 的消隐过程只需要几秒钟。

利用 OpenGL 获取像素面元法向矢量的方法可以概括为: 在 OpenGL 中采用 Phong 光照模型, 设光源为无衰减的定向光源, 环境光和镜面反射光源为 0, 漫反射光源的 RGB 颜色分量值为 (1, 1, 1),

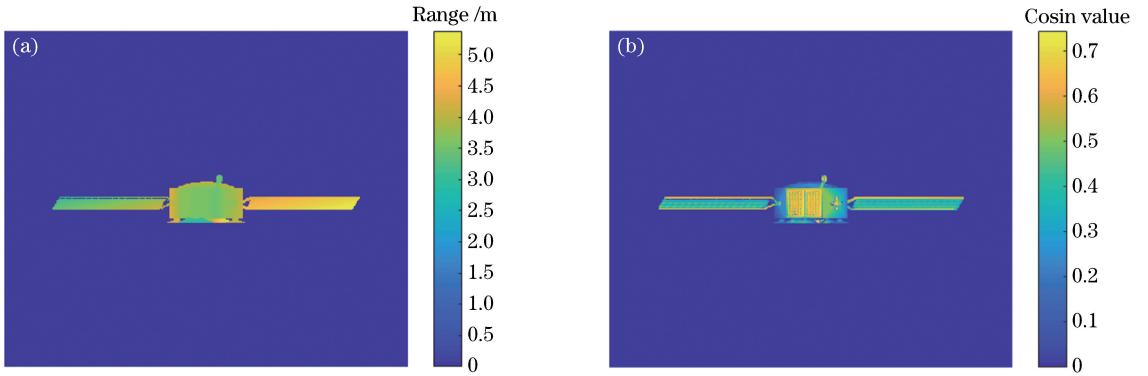


图4 目标表面参数图像。(a)面元距离信息;(b)面元法向与观测方向的夹角

Fig. 4 Images for object surface parameters. (a) Facet range image; (b) angle between facet normal and detecting direction

入射方向为  $\boldsymbol{l}$ , 即垂直于计算机屏幕内部入射。设物体表面材质对光的散射特性为漫反射, 图 4(a) 中第  $(i, j)$  个像素面元的材质散射属性设为  $C_{ij} = (R_{ij}, G_{ij}, B_{ij})$ ,  $R_{ij}, G_{ij}, B_{ij}$  分别代表面元的颜色分量, 其面元单位法向矢量为  $\boldsymbol{n}$ ,  $\theta_{ij}$  为矢量  $\boldsymbol{n}$  和  $\boldsymbol{l}$  的夹角, 在 OpenGL 进行一次光照后, 屏幕显示的该像素面元颜色值为

$$I_{ij} = (\boldsymbol{l} \cdot \boldsymbol{n}) \cdot C_{ij} = \cos \theta_{ij} \cdot C_{ij}, \quad (6)$$

通过读取目标可见部位每个像素的颜色值及其组合方式, 即可获得面元法向与入射光线的夹角余弦, 如图 4(b) 所示, 进而可计算出  $\theta_{ij}$ 。

### 3.4 目标表面材料 BRDF 模型

对于在轨空间目标, 无论是目标主体的包覆材料还是太阳能电池板, 其散射一般均存在漫反射和镜面反射分量, 因此, 描述空间目标的激光散射特性, 不能只利用漫反射率近似, 而需要建立目标表面材料的反射特性模型。瑞典国防研究院 Steinvall 等<sup>[16-17]</sup>提出的四参数双向反射分布函数 (BRDF) 模型能够有效描述多种材质的散射特性, 且非常适用于单站激光雷达探测情况, 其表达式为

$$f_r = \frac{A}{\cos^6 \theta'} \cdot \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta'}{s^2}\right) + B \cos^m(\theta'), \quad (7)$$

式中:  $\theta'$  为入射角, 即入射方向与材质面元法向矢量的夹角;  $A, B$  分别为镜面反射和漫反射幅度分量;  $s$  为镜面反射系数,  $s < 1$ ;  $m$  为漫反射系数。  $A, B, s, m$  均为待定系数。

表 1 给出了 3 种典型材料 (完全漫反射材料、近似镜面反射材料以及混合材料) 的 BRDF 参数。

图 5 给出了 3 种典型材料的 BRDF 分布曲线。

### 3.5 目标高分辨率激光回波信号

根据小面元距探测系统的距离以及面元法向与

表 1 表面材质 BRDF 参数

Table 1 BRDF parameters of surface material

Material type	$A$	$B$	$m$	$s$
Purely diffuse reflection	0	1	0.8	0
Approximate specular reflection	1	0	0	0.2
Mixed condition	0.5	0.5	0.8	0.4

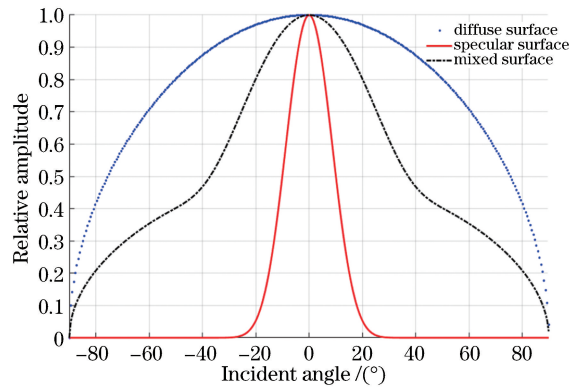


图5 表面为近似镜面反射、漫反射以及混合表面时的 BRDF 曲线

Fig. 5 BRDF curves of specular, diffuse, and mixed surfaces

探测方向的夹角信息, 结合目标表面材质散射特性参数, 将目标表面距探测系统距离相同的小面元反射率叠加, 可以得到距离分辨率为  $\Delta R$  时目标模型的反射率分布 ( $R_{\text{reflec}}$ ), 过程如图 6 所示, 采用激光反射层析成像的卷积模型, 目标激光回波  $W_{\text{echo}}$  可表示为

$$W_{\text{echo}} = P(t) \otimes R_{\text{reflec}}, \quad (8)$$

式中:  $P(t)$  为激光脉冲时域分布, 如 (3) 式所示; 符号  $\otimes$  表示卷积运算。

## 4 反射层析成像仿真

采用第 3 节给出的目标激光回波仿真方法, 将图 3 中卫星目标模型在  $xoz$  平面内围绕  $y$  轴依次



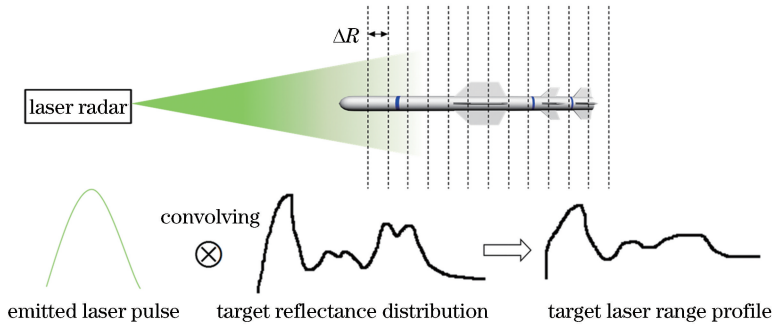


图 6 目标激光回波示意图

Fig. 6 Diagram of object laser echoes

旋转  $360^\circ$ , 角度间隔为  $1^\circ$ , 将不同视角下激光脉冲与目标反射率分布卷积后得到  $360$  个激光回波波形, 然后采用经典滤波反投影重建算法重构出目标轮廓像。其中, 卫星星体尺寸为  $1.8\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ ; 星翼尺寸为  $0.8\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ 。

#### 4.1 发射激光脉宽对反射层析成像的影响

根据激光反射层析成像的原理可知, 发射激光脉冲的宽度决定探测系统的距离分辨率  $\Delta R$ , 因此当脉宽发生变化时, 同一目标的激光回波以及反射层析重建图像会产生相应的变化。图 7(a)~(c) 分别给出了脉宽为  $0.5, 1, 3\text{ ns}$  时卫星目标在多个视角下的回波信号, 其中纵坐标为方位角, 横坐标为探测方向的距离。由图 7(a)~(c) 可知, 脉宽越窄, 实际回波能够呈现的目标细节越丰富; 反之, 目标回波呈现叠加模糊效应。图 7(d)~(f) 分别给出了脉宽为  $0.5, 1, 3\text{ ns}$  时卫星目标的重建轮廓像, 当脉宽为  $0.5\text{ ns}$  时, 对应的理论分辨率为  $0.075\text{ m}$ , 重建图像可以清晰地反映卫星目标的外形特征, 与背景相比,

卫星星体以及太阳帆板的轮廓具有较高的对比度, 如图 7(d) 所示, 可进一步通过图像处理方法提取目标的尺寸; 当脉宽增大为  $1\text{ ns}$  时, 重建得到的目标边界开始模糊化, 但仍然能够大致刻画目标的轮廓, 如图 7(e) 所示, 这是由于激光脉宽增加导致回波展宽效应更明显; 当脉宽增大为  $3\text{ ns}$  时, 重建目标轮廓出现更大程度的失真和畸变, 无法准确提供关于目标外形的细节信息, 如图 7(f) 所示。根据图 7 给出的仿真结果, 可以从回波波形、重建图像质量两方面直观分析脉冲宽度对回波探测及反射层析成像的影响。

#### 4.2 目标表面材料对反射层析成像的影响

不同目标的表面散射特性会对其激光回波产生不同的影响, 进而影响层析重建图像的质量, 发射激光脉宽为  $1\text{ ns}$  且其他参数不变时, 针对同一目标, 图 8(a)~(c) 分别给出了目标表面散射特性为完全漫反射、近似镜面反射以及混合情况时的激光回波波形。图 8(b) 中卫星部分回波信号很弱, 以至于无法显示结果, 这是由于在该姿态下, 卫星太阳能帆板

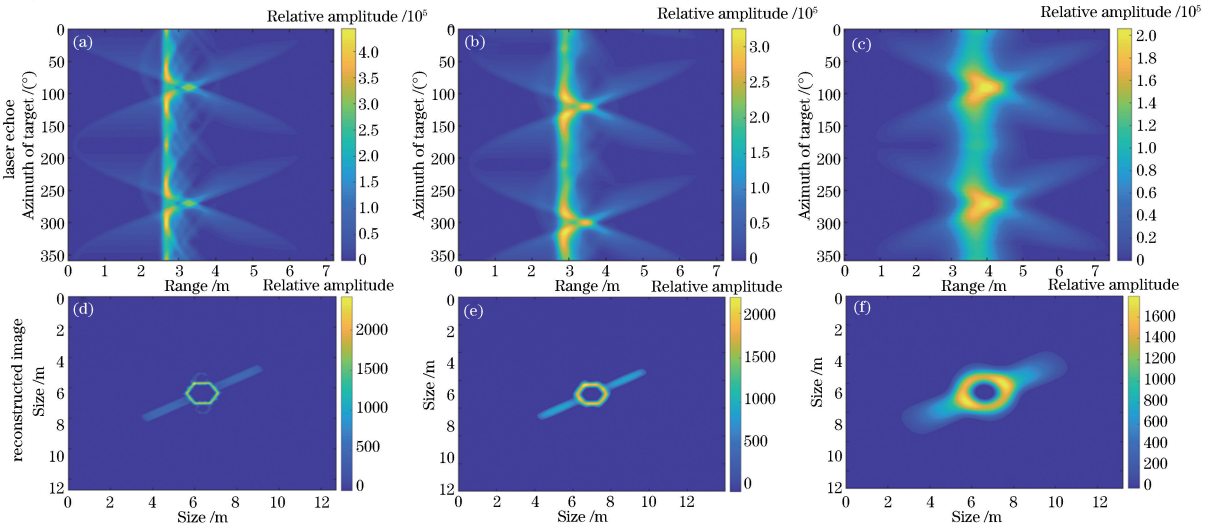


图 7 卫星目标激光回波及重建图像。(a)、(d)  $\tau=0.5\text{ ns}$ ; (b)、(e)  $\tau=1\text{ ns}$ ; (c)、(f)  $\tau=3\text{ ns}$

Fig. 7 Laser echoes and reconstructed images of satellite model. (a), (d)  $\tau=0.5\text{ ns}$ ; (b), (e)  $\tau=1\text{ ns}$ ; (c), (f)  $\tau=3\text{ ns}$

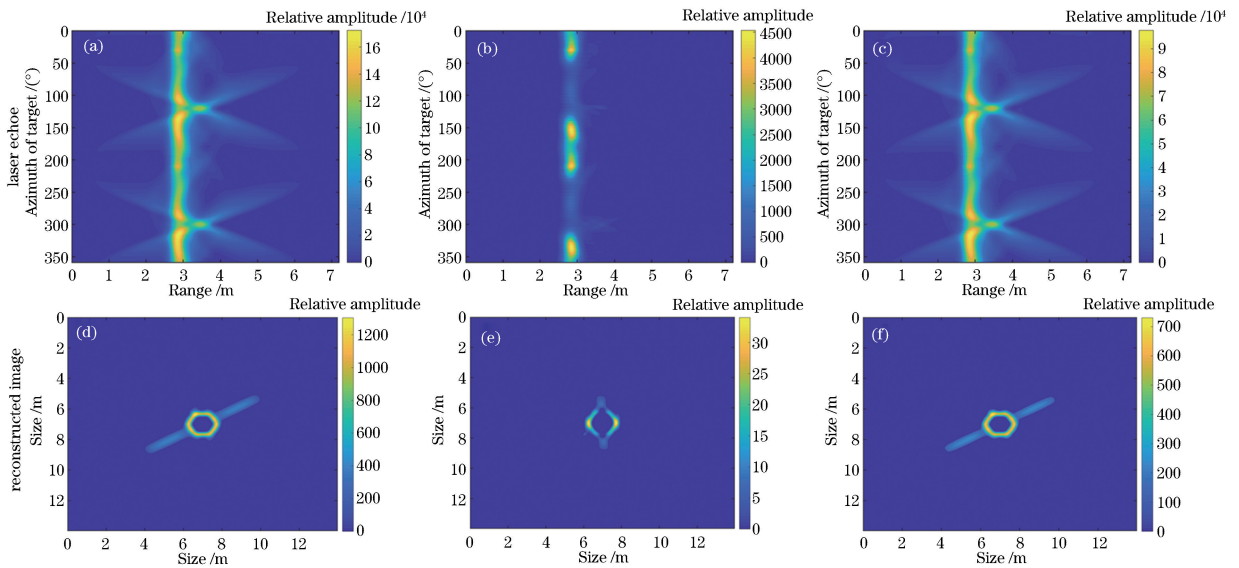


图8 卫星目标激光回波及重建图像。(a)、(d)漫反射表面；(b)、(e)近似镜面反射表面；(c)、(f)混合表面

Fig. 8 Laser echoes and reconstructed images of satellite model. (a), (d) Diffuse surface; (b), (e) approximate specular surface; (c), (f) mixed surface

与探测方向的夹角过大,探测系统无法接收足够的能量。图8(d)~(f)分别给出了目标表面散射特性为完全漫反射、近似镜面反射以及混合情况时的目标重建图像。如图8(d)和图8(f)所示,当目标表面散射特性为完全漫反射和混合情况时,反射层析方法能够重构出目标的外形轮廓;如图8(e)所示,当目标表面散射特性为近似镜面反射时,反射层析方法只能重构出卫星目标的主体部分,无法重构出太阳能帆板部分,这是由于在该姿态下,卫星目标帆板表面法向方向与探测方向的夹角过大,探测系统几乎接收不到太阳能帆板的回波信号,从而无法对其进行重构。提取图8(a)和图8(c)中对应像素点卫星目标的回波强度可知,图8(a)的回波强度均高于图8(c),显然,这是由于混合情况下,目标散射特性包括漫反射和镜面反射,回波强度低于完全漫反射情况。因此可知,目标的表面材质会对目标的激光回波产生不同的影响,进而对目标激光反射层析成像的结果产生影响。

## 5 结 论

提出了一种基于 OpenGL 处理的目标消隐及可见部分显示的快速方法,利用 OpenGL 处理复杂目标的消隐,大幅提高了计算准确度和效率。采用提出的激光回波仿真方法分析了发射激光脉宽、目标表面材料散射特性对反射层析成像质量的影响。结果表明,当探测系统其他参数不变时,脉宽越窄,目标反射层析重建图像质量越好,分辨率越高,可以

得到更多的目标外形轮廓细节信息;目标表面材质散射特性为漫反射或混合情况时,通常能够有效地重建目标轮廓。所提方法为激光反射层析成像相关研究提供了可靠的仿真数据,可以为下一步成像实验系统的参数选择提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Bellet J B, Berechet I, Berechet S, *et al.* Laser interactive 3D computer graphics [C] // 2nd International Conference on Tomography of Materials and Structures, July, 2015, Québec, Canada. [S.l.: s.n.], 2015.
- [3] Murray J, Triscari J, Fetzer G, *et al.* Tomographic lidar[C] // Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications 2010, February 3-3, 2010, San Diego, California, United States. Washington D. C.: OSA, 2010: LSWA1.
- [4] Henriksson M, Olofsson T, Grönwall C, *et al.* Optical reflectance tomography using TCSPC laser radar [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8542: 85420E.
- [5] Ford S D, Matson C L. Projection registration in reflective tomography [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3815: 189-198.
- [6] Gu Y, Hu Y H, Hao S Q, *et al.* Application of

- variational Bayesian deconvolution method in laser reflective tomography imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0611003.
- 谷雨, 胡以华, 郝士琦, 等. 变分贝叶斯解卷积法在激光反射层析成像中的应用[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0611003.
- [7] Jin X F, Sun J F, Yan Y, *et al.* Small system imaging simulation for reflective tomography laser radar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 747-752.
- 金晓峰, 孙建锋, 严毅, 等. 反射层析激光雷达小系统成像模拟[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 747-752.
- [8] Jin X F, Yan Y, Sun J F, *et al.* Angle-Doppler resolved reflective tomography laser imaging radar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0828001.
- 金晓峰, 严毅, 孙建锋, 等. 基于角度-多普勒分辨的反射层析激光成像雷达研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0828001.
- [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] 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] Jin X F, Sun J F, Yan Y, *et al.* Modified radon-Fourier transform for reflective tomography laser radar imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8192: 81921S.
- [12] Shreiner D, Sellers G, Kessenich J, *et al.* OpenGL programming guide: the official guide to learning OpenGL version 4.3 [M]. 8th ed. [S.l.: S.n.], 2008: 154-194.
- [13] Wright R S, Jr, Haemel N, Sellers G M, *et al.* OpenGL superbible: comprehensive tutorial and reference[M]. 5th ed. [S.l.: S.n.], 2010: 292-296.
- [14] Kang X P, He Z. Introduction to laser beam quality evaluation [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technological Literature Publishing House, 2007: 30-35.
- 康小平, 何仲. 激光光束质量评价概论[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2007: 30-35.
- [15] Mao X, Shen W, Zhao X Y. Hidden-removal method of perspective drawing based on constrains between lines and junctions[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(8): 925-928, 937.
- 毛峡, 沈巍, 赵兴圆. 基于点线关系的透视图消隐算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(8): 925-928, 937.
- [16] Steinvall O. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(24): 4381-4391.
- [17] Paleologue A. Active infrared systems: possible roles in ballistic missile defense? [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6214: 621401.