# 激光反射断层成像目标的重构建模仿真

杨彪1,2\*\*, 胡以华1,2\*, 李敏乐1,2, 郭力仁1,2, 唐进迎1,2, 陈曦1,2

1国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室,安徽 合肥 230037;

2国防科技大学电子制约技术安徽省重点实验室,安徽 合肥 230037

摘要 提出了一种基于激光束边界面的快速求交算法。基于激光雷达信号的时空分布特性,推算出了探测目标对信号的响应函数,建立了二者的作用过程模型,构建了基于激光反射断层成像的目标重构仿真系统。利用采样间隔和探测角度对重构图像质量的影响,进行了两组对比仿真实验,在不同条件下运用滤波反投影算法实现了目标二维轮廓的图像重构。

关键词 遥感;激光雷达;反射断层成像;建模仿真;光线求交;响应方程;反投影重构

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1128002

## Modeling and Simulation of Target Reconstruction by Laser Reflection Tomography

Yang Biao<sup>1,2\*\*</sup>, Hu Yihua<sup>1,2\*</sup>, Li Minle<sup>1,2</sup>, Guo Liren<sup>1,2</sup>, Tang Jinying<sup>1,2</sup>, Chen Xi<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract** A fast algorithm based on the boundary of laser beam is proposed. Based on the time-space distribution of laser radar signals, the response function of the detection target to the signal and the model of the interaction process between them are deduced and established. A target reconstruction simulation system based on the laser reflection tomography is constructed. Based on the influences of the different sampling intervals and the different detection angles on the reconstructed image quality, two sets of comparative simulation experiments are carried out. Under different conditions, the filter backprojection algorithm is used to achieve the image reconstruction of the two-dimensional contour for the target.

**Key words** remote sensing; laser radar; reflection tomography; modeling and simulation; ray intersection; response equation; back projection reconstruction

**OCIS codes** 280.3640; 100.3010; 100.5070; 070.4560

## 1 引 言

激光反射断层成像(LRT)是近年来发展起来的一种新型激光成像方式。传统光学镜头存在衍射极限,不适用于远距离目标成像,而激光成像雷达能克服衍射极限,且受外界环境的影响较小[1]。开展LRT回波信号的建模仿真与分析研究对LRT目标重构技术的发展具有重要意义。Parker等[2-3]在计算机断层成像(CT)中引入激光反射层析,并进行了

实验验证。Matson 等[4-5]研究了 LRT 的理论和应用。林放等[6-8]在特征点跟踪、二维成像、图像配准、脉冲压缩解卷积等方面进行了实验研究。

国内外学者在利用激光束进行目标探测方面也进行了大量的研究,其中三维(3D)激光雷达仿真系统主要包括瑞典国防研究局研发的 3D 成像仿真模型<sup>[9-10]</sup>和美国林肯实验室为激光成像雷达"竖锯"开发的雷达仿真系统<sup>[11]</sup>。目前,已开发的完整可实际应用的仿真软件有美国洛克希德·马丁公司的

收稿日期: 2018-03-06; 修回日期: 2018-05-07; 录用日期: 2018-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(61271353)

<sup>\*</sup> E-mail: skl\_hyh@163.com; \*\* E-mail: yangbiao135@163.com

ALASS<sup>[12]</sup>和美国犹他州立大学研发的 USU Ladar SIM<sup>[13]</sup>。国内学者也在一定程度上开展了激光成像雷达系统的建模仿真研究<sup>[14-16]</sup>,金晓峰等<sup>[17]</sup>提出了反射层析激光雷达小系统的成像模拟,但其在复杂轮廓目标的应用上有待进行进一步深入研究。

根据 LRT 的基本原理,要实现目标二维轮廓图像重构的建模仿真,需要着重解决激光子光束与探测目标表面的交点获取问题及激光子光束与不同特性的目标表面作用过程的建模问题。Carlsson等[9-12]采用从目标向成像平面作垂直映射的方法,这种方法无法精细观察单个激光束的作用过程,且与激光束和探测目标之间的实际作用过程不符。当目标处于运动状态时,Graham等[18-19]主要采用光线追踪算法获取了激光子光束与探测目标的交点,其目标场景模型采用的是体素表示法,这种方法没有对扩束激光进行细分。因此,如何快速有效地获取激光子光束与探测目标表面的交点是迫切需要解决的一个问题。

本文结合激光雷达探测的基本原理,展开了对基于 LRT 的目标重构建模仿真。研究了激光子光束与探测目标表面的交点获取问题,准确获取了交点处的距离、反射率、入射角等相关信息;研究了激光子光束与不同特性的目标表面作用过程,得到了激光照射目标一周的回波数据。运用滤波反投影算法完成了目标二维轮廓的图像重构,重构结果验证了仿真模型的正确性,为进一步开展复杂场景下LRT 的目标重构和空间目标探测提供了参考。

### 2 LRT 原理

LRT 的基本重建算法是滤波反投影(FBP)算法,其数学原理是傅里叶切片定理。如图 1 所示,平行激光光束照射一个二维目标,照射角度记为 ø,目标在角度 ø 的投影定义为

$$p(r,\phi) = \int_{L_{r,\phi}} f(x,y) \, \mathrm{d}s, \qquad (1)$$

式中(x,y)为目标在 Oxy 坐标系中的位置;积分路径  $L_{r,\phi}$ 为垂直于光照方向的直线;极径  $r=x\cos\phi+y\sin\phi$ ; f(x,y)为目标的反射系数分布; s为积分路径。平行箭头的展开区域为激光照射区域,投影的距离范围取决于被激光照射区域的距离范围。激光无法穿透目标,实际上反射系数只在表面不为零,即

$$f(x,y) = 0, \quad (x,y) \notin D, \tag{2}$$

式中 D 为目标表面点集。因此,实际投影可表示为

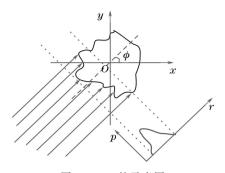


图 1 LRT 的示意图

Fig. 1 Schematic of LRT

$$p(r,\phi) = \int_{L_{r,\phi} \cap D} f(x,y) \, \mathrm{d}s.$$
 (3)

目标重构过程与投影数据的获取是逆向的过程,需要对采集的投影数据进行预处理以去除掉信号采集过程中的噪声。投影数据的配准是将采集的回波信号按照统一的时间基准进行重新排列。接受回波信号是目标表面的反射率分布信息与激光脉冲的卷积,故在目标重构前需要对接受信号进行解卷积运算以得到目标的实际反射率分布投影数据。将全部探测角度下的解卷积后投影数据进行直接反投影运算,可得到物体重建的二维轮廓图像。

直接反投影重构算法的主要思想是将每一次测得的投影数据按角度为 ø 的扫描路径"原路"回抹到路径经过的像素上。即是将所有经过这个坐标点的值进行累加或累加后取均值,再将该值作为重建的二维轮廓图像的该像素点的值。但这样会产生伪影,影响图像分辨,因此通常使用滤波反投影算法,重建的目标反射系数分布的图像表示为

$$g_{FB}(x,y) = \sum_{i=1}^{m} F_{i}^{-1} \{ | \omega | F_{i}[p(r,\phi)] \}, (4)$$

式中m 为投影数量; $F_1$ 、 $F_1^{-1}$  分别为一维傅里叶变换和傅里叶逆变换的算符; $|\omega|$ 为由直角坐标系转到极坐标系产生的雅可比因子,起斜坡滤波器的效果。

### 3 仿真系统建模

#### 3.1 目标的投影角度旋转

在 LRT 的目标轮廓重构过程中,需要采集环绕目标 360°的全角度信息,根据目标与激光成像雷达的相对运动关系可确定探测雷达的位置,通过将目标旋转不同的角度来采集不同角度的目标回波信息。在 LRT 过程中,根据环绕目标旋转一周需要采集的回波信号的组数调整目标的单次旋转角度。

3D 空间中的旋转变换比二维空间中的旋转变换复杂,除了需要指定旋转角外,还需指定旋转轴。

若以坐标系的三个坐标轴  $x \times y \times z$  分别作为旋转轴,则点实际上只在垂直坐标轴的平面上作二维旋转,此时用二维旋转公式即可直接推出 3D 旋转变换矩阵。规定在右手坐标系中,物体旋转的正方向是右手螺旋方向,即从该轴正半轴向原点看为逆时针方向(俯视图角度)。绕 z 轴正向旋转  $\gamma$  角后的坐标为

$$(x' \quad y' \quad z') =$$

$$(x \quad y \quad z) \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{5}$$

旋转后点的z 坐标值保持不变,x、y 坐标的变化相当于在xOy 平面内作正y 角的旋转。

物体绕平行于某一坐标轴的旋转变换的基本步骤为:1)平移物体使旋转轴与所平行的坐标轴重合; 2)沿该坐标轴进行指定角度的旋转;3)平移物体使旋转轴移回到原位置。

#### 3.2 扩束激光在目标场景中的投影点获取

在 LRT 目标重构的过程中,激光源发射的激光束为一束扩束光束,一定距离处的光斑直径明显大于目标的尺寸。当扩束激光照射目标表面时,激光光斑往往能完全覆盖目标,在每个激光束中,由于目标表面的空间和反射率分布的特性,不同部分对激光束的作用过程存在差异。为了准确反映激光扩束光束与目标表面不同部分不同特性的作用过程,需要运用微分的思想将一束宽束激光分解为一定数量的子光线来分别求取每条子光线与目标的交点,这样就能得到扩束激光与目标不同部位的作用过程,最终不同部位的子光束的回波在时间域上的线性叠加即为扩束激光的回波信号。将一束激光细分为 N×N 条子光线,如图 2 所示,通过计算每条子光线与目标场景模型最近的交点,即能通过交点处的目标表面信息得到每个微小面元的回波信号。

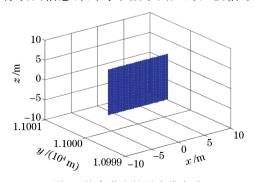


图 2 扩東激光的子光线点阵

Fig. 2 Dot matrix diagram of sub-rays of expanded laser 3.2.1 需求分析

通过 3DSMAX 软件绘制探测目标模型的 3D

形状,并设置其在目标场景坐标系中的方位、缩放比 例、反射率等,再将绘制完成的模型以 3DS 的文件 形式导出,通过 Visual Studio 软件编写的相关程序 读取目标场景模型的三角形面元各顶点的坐标等相 关信息。故激光束与探测目标的求交问题实际上相 当于每个子光线与三角形面元求交点问题。直线与 多边形求交点是计算机图形学中的一个基础问题, 一般通过联立方程组求解[20-21]。在实际建模过程 中,为了能够尽可能贴近实际的探测目标,模型的面 元数量往往十分庞大,同时,为了能在建模过程获得 准确的回波数据,激光束分解的子光线数量也较多, 每条子光线都需要与目标面元进行求交运算。假如 目标场景模型由 1000 个面元组成,激光束细分为 30×30个子光线,获取激光束的投影点就需进行 9×10<sup>5</sup> 次求交运算,计算量巨大,因此必须解决光 线求交的计算效率问题。

#### 3.2.2 基于激光子光线面阵的快速求交算法

扩束激光的子光线集只与探测目标中的很少一部分面元相交,若能在每条子光线与目标场景求交点前先初步判断哪些面元可能与当前激光束内的子光线相交,就能在一定程度上提高光线求交的效率。

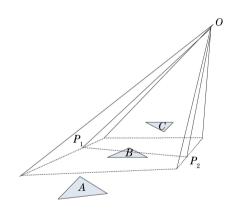


图 3 光東平面与面元位置关系示意图

Fig. 3 Positional relationship between beam plane and element

如图 3 所示,将一束激光细分为  $N \times N$  条子光线点阵,取点阵每一列中的最边缘的两个边界点  $P_1$ 、 $P_2$  和激光源所在位置 O 点构成一个三角形  $OP_1P_2$ 。探测目标中的三角形面元与激光束的一列点阵所在的平面可能存在以下几种位置关系:

- 1) 三角形面元的三个顶点全部处在平面的左侧,如图 3 中的 A 面元;
- 2) 三角形面元的三个顶点全部处在平面的右侧,如图 3 中的 C 面元;
  - 3) 三角形面元与平面相交,这时面元的顶点分

布在子光线一列点阵形成的平面的两侧,如图 3 中的 B 面元。

在第一种和第二种情况下,三角形面元完全处于激光束所在平面的范围外,与激光子光线不存在交点,可以将其剔除。光线求交的具体步骤如下。

1) 激光源所在的坐标 O 点和  $P_1$ 、 $P_2$  所产生的两条边界光线的方向矢量  $F_1$ 、 $F_2$  确定的激光一列子光线所在的平面方程为

$$a_1x + b_1y + c_1z = d_1,$$
 (6)

$$\boldsymbol{n}_1 = \boldsymbol{F}_1 \times \boldsymbol{F}_2 = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}},$$
 (7)

式中 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$  为系数; T 代表求转置;  $d_1$  为平面方程常数项;  $n_1$  为平面方程的法向量。

2) 确定点 $(x_i \ y_i \ z_i)^{\mathrm{T}}(i \ 为)$ 与平面  $a_1x + b_1y + c_1z = d_1$  的位置关系。当点位于包含法线向量的半空间(正半空间)时,存在

$$a_1 x_i + b_1 y_i + c_1 z_i - d_1 > 0$$
 (8)

当点位于另一侧时,存在

$$a_1 x_i + b_1 y_i + c_1 z_i - d_1 < 0, (9)$$

三角形面元的三个顶点的坐标矩阵为

$$\mathbf{M}_{1} = \begin{bmatrix} x_{1} & y_{1} & z_{1} \\ x_{2} & y_{2} & z_{2} \\ x_{3} & y_{3} & z_{3} \end{bmatrix}. \tag{10}$$

故判定矩阵 M 为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{1} \cdot \mathbf{n}_{1} - \mathbf{D} = \begin{bmatrix} x_{1} & y_{1} & z_{1} \\ x_{2} & y_{2} & z_{2} \\ x_{3} & y_{3} & z_{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{1} \\ b_{1} \\ c_{1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d_{1} \\ d_{1} \\ d_{1} \end{bmatrix},$$

$$(11)$$

式中 D 为平面方程常数项列矩阵。

根据(11)式可以判断该三角形面元的三个顶点 与激光束一列点阵所在平面的位置关系。

- 3) 判断三角形面元与激光束所在平面的位置 关系。M为3×1矩阵,若矩阵 M中的元素全部大 于零,该面元位于平面的正半空间;若矩阵 M中的 元素全部小于零,该面元位于平面的负半空间。这 两种情况下面元与激光的子光线不存在交点。当矩 阵 M中的元素即存在正数又存在负数时,该面元与 激光束所在的平面相交,此时三角形面元保留。
- 4) 对于保留下来的面元,按照经典光线求交算 法求得每条子光线与面元的交点。
- 5) 分别取每一列点阵进行 N 次循环,直至完成所有子光线与探测目标的求交运算。

#### 3.3 激光束与目标场景的作用过程建模

3.3.1 激光发射脉冲的时空分布

在激光脉冲与目标场景作用过程的建模仿真

中,影响回波信号的时间延迟和强度的因素主要包括交点距激光源或光电探测器的距离、探测目标的表面反射率及子光线相对于探测目标表面法线的入射角。激光雷达信号的时空分布函数<sup>[22]</sup>为

 $U(x,y,z) = I_0 \cdot p(t) \cdot I(x,y)$ , (12) 式中 p(t)为发射激光脉冲的时间分布函数; t 为时间;  $I_0$  为单个激光发射脉冲的能量; I(x,y) 为扩束激光的空间分布函数。因此,可对扩束激光脉冲与探测目标的作用过程分别从时间域和空间域进行考虑。

p(t)一般采用较为简单的高斯分布模型[22],即

$$p(t) = \frac{2}{T_{1/2}} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp \cdot \left[ -4 \ln 2 \times \left( \frac{t - 3/2 \times T_{1/2}}{T_{1/2}} \right)^{2} \right], \quad (13)$$

式中 $T_{1/2}$ 为激光脉冲的半峰全宽。

*I(x,y)*为光束瞬时功率沿激光照射的射线传播方向的空间分布,通常情况下可表示为径向高斯分布,即

$$I(x,y) = I(r) = \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) = \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right], \quad (14)$$

式中 $\omega_0$ 为激光源处的光束半径; $\omega$ 为径向距离 R处的光束半径。

3.3.2 目标对激光雷达信号的响应函数

激光雷达的距离方程通常用来计算特定条件下 激光雷达接受的回波能量,其公式为

$$P_{\rm r} = \frac{4IP_{\rm t}T_{\rm al}\eta_{\rm t}}{\pi\theta_{\rm t}^2R_{\rm l}^2}\Gamma\frac{T_{\rm a2}}{4\pi R_{\rm l}^2}\frac{\pi D_{\rm r}^2\eta_{\rm r}}{4},\qquad(15)$$

式中  $P_r$  为回波信号的功率(接受功率);  $P_t$  为激光器的发射功率; I 为光束分布函数;  $T_{al}$  为发射机到目标的大气透过率;  $\eta_t$  为发射光学系统的透过率;  $\theta_t$  为激光束的发散角;  $R_1$  为发射机到目标的距离;  $\Gamma$  为目标的激光雷达截面;  $T_{al}$  为目标到接收机的大气透过率;  $R_2$  为目标到接收机的距离;  $D_r$  为接受空间(光学镜头的直径);  $\eta_r$  为接受光学系统的透过率。

对于稳定的收发合置或当发射系统与接受系统十分靠近时,有 $R_1 = R_2 = R_1$ ,若探测环境为几乎真空的太空环境, $T_{a1}$ 和  $T_{a2}$ 的数值为 1。故(15)式可以简化为

$$P_{\rm r} = \frac{KP_{\rm t}T_{\rm a}^2\Gamma D_{\rm r}^2\eta_{\rm t}\eta_{\rm r}}{4\pi\theta_{\rm t}^2R^4}.$$
 (16)

雷达截面的定义[23]为

$$\Gamma = 4\pi R^2 \frac{I_r}{I_i},\tag{17}$$

式中 I, 为反射回波在探测器处的能流密度; I, 为人射到目标上的能流密度。粗糙表面单元照射面积 dS的截面 d $\Gamma$  和双向反射分布函数 f, 之间的关系为

$$d\Gamma = 4\pi f_{\rm r} \cos \theta_{\rm r} \cos \theta_{\rm i} dS, \qquad (18)$$

式中  $\theta_r$  为反射角;  $\theta_i$  为入射角。对于朗伯体来讲,  $f_r = \rho/\pi$  为常量, 其中  $\rho$  为半球反射率(通常简称为反射率)。若激光雷达系统采用收发合置的探测系统,则  $\theta_i = \theta_r = \theta$ ; 故(18)式可替代为

$$d\Gamma = 4\rho \cos^2\theta \, dS \, . \tag{19}$$

考虑当前激光束中的一条子光线  $r_{\text{ray}}(x,y)$   $(x=1,\dots,N;y=1,\dots,N)$ ,定义整个探测目标对应的观测区域的每个子光线交点到探测器的距离为 R(x,y),每个子光线交点处的目标反射率分布为  $I_{\text{inten}}(x,y)$ ,子光线的入射角为  $\theta_{\text{angle}}(x,y)$ 。根据激光雷达距离的方程式,对应于每个子面元的观测距离和反射率,子面元对扩束激光脉冲的响应函数为

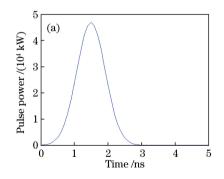
$$h_{p}(x,y,t) = T_{a}^{2}D_{r}^{2}\eta_{t}\eta_{r} \frac{I(x,y)I_{inten}(x,y)}{\pi\theta_{t}^{2}R^{4}}\cos^{2}\theta$$
.

$$\delta \left[ t - \frac{2R(x,y)}{c} \right], \tag{20}$$

式中 $\delta(t)$ 冲击函数。

#### 3.3.3 激光雷达的全波形回波信号

探测目标上每一个面元到探测器的距离不同, 故探测器接受到每个部分的回波信号时间也不同。 根据实验常用的雪崩光电二极管(APD)的响应特 性可知,到光电传感器距离相同的子面元的响应时 间是同一时刻,这个过程对于探测器而言是一个回



波信号强度的叠加过程,如图 4 所示,由此可得到一个时间序列信号,即整个目标的响应函数  $h_{s}(t)$ 为

$$h_{p}(t) = \sum_{S_{object}(x,y)} h_{p}(x,y,t_{j}),$$
 (21)

式中  $S_{\text{object}}(x,y)$ 为激光束所有子面元的集合; $t_j$ ( $j = 1,2,\cdots$ )为探测器接受子面元反射回波信号的时间。

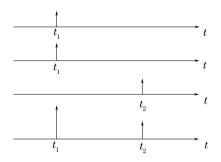


图 4 子光线回波信号叠加的示意图

Fig. 4 Schematic of superposition of sub-ray echo signals

对当前激光束对应的探测目标的响应函数  $h_p(t)$ 与激光雷达的响应函数及信号的时间分布函数 p(t)进行卷积运算,即可得到激光光束与探测目标作用后返回激光雷达接收器的全波形的回波信号  $P_r^{\text{receiver}}(t)$ 为

$$P_{r}^{\text{receiver}}(t) = h_{p}(t) * [I_{0} p(t)] =$$

$$I_{0} \int_{-\infty}^{+\infty} h_{p}(\tau) p(t-\tau) d\tau, \quad (22)$$

式中\*表示卷积运算; 7为积分变量。

图 5 所示为激光信号与目标作用前后的脉冲波形。

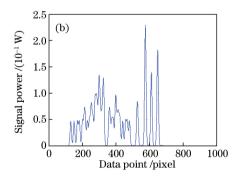


图 5 激光信号与目标作用前后的脉冲波形。(a)发射脉冲信号;(b)回波信号

Fig. 5 Pulse shapes before and after interaction between laser signal and target. (a) Emitted pulse signal; (b) echo signal

## 4 空间目标重构的仿真实现与分析

基于 LRT 的回波信号仿真系统,运用 3DSMAX 软件生成探测目标飞机的1:1的3D立体模型,其中飞机翼展约为13 m,长约为19 m,机身高度约为2.8 m。设置激光雷达距离目标坐标原点

约为 10 km,激光束中心相对于目标场景的俯仰角为 0°,激光束的发散角为 1 mrad,激光束分解为 30×30 的子光束线阵。通过计算模型上 28245 个三角形面元和子光线的作用过程,生成全波形检测条件下激光雷达探测的回波数据。

图 6(a)、(b)、(c)分别为全波形检测条件下目

标的 0°、60°、90°三个角度下获得的激光雷达探测目标的回波点阵图。全波形检测条件下每个角度下均可能出现多个探测点,不方便用角度-角度-距离像

表述,这里均是经过坐标转换后的 3D 点云图。实际数据采样需要采集探测目标 360°的反射回波信号,这里仅展示部分。

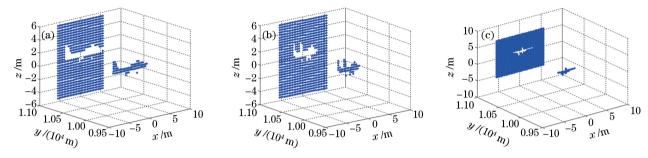


图 6 不同角度目标的投影点信息。(a) 0°;(b) 60°;(c) 90°

Fig. 6 Projection point information of target under different angles. (a) 0°; (b) 60°; (c) 90°

在仿真实验中共进行了两组对比实验,分别为360°采样角度不同采样间隔条件下的回波数据以及相同采样间隔不同采样角度下的回波数据。在360°采样角度下,以1°、2°、4°间隔采集的360、180、90组数据运用滤波反投影算法重构目标的二维轮廓图像,结果如图8(a)、(b)、(c)所示,探测目标为F15战斗机模型,成像分辨率为2500pixel×2500pixel。由成像结果可知,在1°、2°采样间隔条件下目标的外围轮廓像比较清晰,当目标的采样间隔为4°时会有模糊。通过不同采样间隔的仿真实验能够得到LRT不同采样间隔对成像的影响,随着采样间隔的增大,图像会出现模糊,这也在一定程度上为实际应用提供了参考。在1°采样间隔条件

下,进行了360°、180°、120°、90°不同采样角度的目标重构实验,遮挡区域的目标特性无法被脉冲捕捉,在相应角度会出现部分信息缺失。目标的细节存在一个可探测角度范围,因此遮挡区域对区域细节探测结果的影响取决于可探测角度范围的大小。图9所示为不同探测角度范围对目标重建图像的影响,可以看出,在大于180°的采样角度下可以收集到较完整的投影信息,当探测角度减小到120°时,目标出现模糊。战机的机翼部分存在重建模糊不全现象,这是由于仿真数据采集的角度为激光束垂直照射战机的侧面,而相对机身部分从激光探测角度来看,机翼的厚度十分纤薄,这会导致数据采集稀少,重构的目标二维轮廓在机翼部分出现模糊。

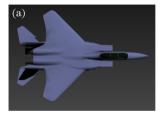




图 7 3DSMAX 软件绘制的目标原型。(a)俯视正面;(b)仰视背面

Fig. 7 Target prototype drawn by 3DSMAX software. (a) Top view of front side; (b) down view of back side

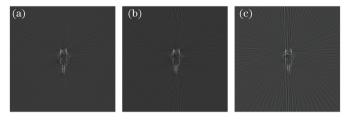
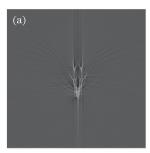


图 8 不同角度间隔下采样的数据重构目标图像。(a) 1°;(b) 2°;(c) 4°

Fig. 8 Reconstructed target images based on data sampled under different angle intervals.

(a)  $1^{\circ}$ ; (b)  $2^{\circ}$ ; (c)  $4^{\circ}$ 



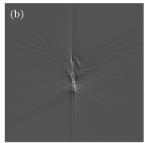




图 9 不同探测角度下的目标重构图像。(a) 180°;(b) 120°;(c) 90°

Fig. 9 Reconstructed target images under different probing angles. (a) 180°; (b) 120°; (c) 90°

### 5 结 论

针对 LRT 仿真系统方面研究存在的空缺问题,从激光子光线与探测目标的投影点相交、激光雷达信号与目标的表面作用过程及采样数据的滤波反投影重构三个方面系统研究了 LRT 过程中的激光发射、接受及数据处理的主要流程。提出了子光线与探测目标的快速求交算法;基于激光雷达的距离方程建立了激光束与目标场景的响应函数模型。在仿真实验中进行了不同采样间隔和不同探测角度的目标重构实验,初步得到了回波数据采集条件对目标重构的影响规律。

#### 参考文献

- [1] Jin X F, Zhang P, Liu C H, et al. Techniques on long-range and high-resolution imaging lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 050002. 金晓峰,张鹏,刘春华,等. 远距离高分辨激光成像
  - 金晓峰, 张鹏, 刘春华, 等. 远距离高分辨激光成像雷达技术[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 050002.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Matson C L, Magee E P, Stone D. Reflective tomography for space object imaging using a short-pulse length laser [J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2302: 73-82.
- [5] Matson C L. Deconvolution-based spatial resolution in optical diffusion tomography[J]. Applied Optics, 2001, 40(31): 5791-5801.
- [6] 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.

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.

- [7] 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.
- [8] 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,
- [9] Carlsson T, Steinvall O, Letalick D. Signature simulation and signal analysis for 3-D laser radar [R]. Stockholm: Swedish Defence Research Agency, 2001.

36(6): 0611003.

- [10] Steinvall O, Carlsson T. Three-dimensional laser radar modelling[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4377: 23-34.
- [11] O'Brien M E, Fouche D G. Simulation of 3D laser radar systems[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2005, 15(1): 37-60.
- [12] Jacob D, Gatt P, Nichols T. Overview of LMCT's advanced ladar signal simulator (ALASS)[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6950: 69500L.
- [13] Budge S, Leishman B, Pack R. Simulation and modeling of return waveforms from a ladar beam footprint in USU LadarSIM[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6214: 62140N.
- [14] Xue G G, Sun D S, Yang Z. Modeling and performance simulation of direct detection laser radar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32

- (3): 244-247.
- 薛国刚, 孙东松, 杨昭. 直接探测激光雷达模型及其性能模拟[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(3): 244-247.
- [15] Yi X, Wang W R. Numerical simulation for lidar system [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(1): 21-23. 易翔, 王蔚然. 激光雷达系统的数值仿真[J]. 光子学报, 2004, 33(1): 21-23.
- [16] Ma C J, Sun X Q, Li X X. Simulation designing of imaging laser radar guidance system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(6): 655-659.

  马超杰,孙晓泉,李晓霞. 基于激光成像雷达制导系统的仿真设计[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(6): 655-659.
- [17] 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.
- [18] Graham M. Design of afoliage penetrating ladar simulation tool[R]. Edinburgh: Intelligence, Surveillance and Reconnaissance Division, 2009.
- [19] Mewett D T, Graham M D, Davies A H. Testing flight paths for collecting 3D ladar imagery of

- inconspicuous targets[C]. 18th World IMACS Congress and MODSIM09, 2009: 1636-1642.
- [20] Watt A. 3D computer graphics[M]. Bao H, Transl. 3<sup>rd</sup> ed. Beijing: China Machine Press, 2005. Watt A. 3D 计算机图形学[M]. 包宏, 译. 第三版. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [21] Slater M, Steed A, Chrysanthou Y. Computer graphics and virtual environments from realism to real-time[M]. Cheng C, Xu Y T, Transl. Beijing: China Machine Press, 2004.

  Slater M, Steed A, Chrysanthou Y. 计算机图形学与虚拟环境[M]. 程成,徐玉田,译. 北京: 机械工业出版社,2004.
- [22] Zhao M B, He J, Fu Q. Simulation modeling and analysis of full-waveform ladar signatures[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0628002. 赵明波,何峻,付强.全波形激光雷达回波信号建模 仿真与分析[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0628002.
- [23] Wu Z S, Han X E, Zhang X D, et al. Experimental study on bidirectional reflectance distribution function of laser scattering from various rough surfaces [J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(3): 262-268. 吴振森, 韩香娥, 张向东,等. 不同表面激光双向反射分布函数的实验研究[J]. 光学学报, 1996, 16(3): 262-268.