

# 目标散射特性对激光雷达回波特性的影响分析

孙华燕<sup>1</sup>, 陈剑彪<sup>2</sup>, 周哲帅<sup>3</sup>, 赵延伸<sup>1</sup>, 单聪淼<sup>2</sup>

(1. 航天工程大学电子与光学工程系, 北京 101416; 2. 航天工程大学研究生院, 北京 101416; 3. 32039 部队, 北京 100094)

**摘要:** 研究目标散射特性对其激光雷达回波特性的影响是进行目标激光雷达主动成像、跟踪以及目标识别的基础。首先推导了考虑探测激光时空分布的目标激光雷达回波公式, 通过 3DS MAX 软件建立了三种典型目标的三维模型, 采用单站激光雷达 BRDF 模型仿真得到了理想漫反射、近似镜面反射以及粗糙表面三种情况下不同目标多角度回波峰值序列, 基于此分析了目标散射特性对其激光雷达回波特性的影响, 可为目标激光雷达主动探测及成像提供理论参考。

**关键词:** 激光雷达; 三维建模; 双向反射分布函数; 散射特性

**中图分类号:** TN958.98      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.05.004

## Influence of target scattering property on laser radar echo characteristics

SUN Hua-yan<sup>1</sup>, CHEN Jian-biao<sup>2</sup>, ZHOU Zhe-shuai<sup>3</sup>, ZHAO Yan-zhong<sup>1</sup>, SHAN Cong-miao<sup>2</sup>

(1. Department of Electronic and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Department of Graduate Management, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

3. 32039 Army, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The effect of target scattering property on laser radar echo characteristics is the base of laser radar active imaging, target tracking and recognition. Firstly, considering the spatial and temporal distribution of detecting laser, the laser radar echo formula is derived. The 3D models of three typical targets are established by 3DS MAX software, and their echo peak value sequences in different angles are simulated by using the BRDF model corresponding to monostatic laser radar, then their echoes are obtained under three different surface material conditions. Based on this, the influence of target scattering property on laser radar echo characteristics is analyzed, and it can provide theoretical references for laser radar active detecting and imaging.

**Key words:** laser radar; 3-D modeling; bidirectional reflectance distribution function; scattering characteristics

### 1 引言

激光雷达目标主动探测是指通过向目标发射连续或脉冲激光束, 并由光电接收系统接收目标的回波, 通过对回波所携带信息的分析, 提取感兴趣的特征

的探测技术。由于激光雷达探测系统具有分辨率高、探测距离远以及能够对暗、小目标探测等方面的优势, 已经被广泛地应用于军、民用的多个领域<sup>[1]</sup>。

目标的光散射特性是由其自身表面材质以及几

**作者简介:** 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, 数字图像处理等方面的研究。E-mail: shy221528@vip.sina.com

**通讯作者:** 陈剑彪(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事光电信息处理及目标识别方面的研究。E-mail: general\_chen2041@163.com

**收稿日期:** 2017-09-17; **修订日期:** 2017-11-02

何外形等特征共同决定的,这会对其激光雷达回波特性产生一定的影响,因此,研究目标散射特性对其激光雷达回波特性的影响是进行目标特性反演及识别的一种有效手段。Ove Steinvall<sup>[2]</sup>研究了目标自身几何外形和反射率等散射特性对理想目标的激光雷达散射截面的影响,但没有对其激光雷达回波特性进行分析。Steven Johnson<sup>[3]</sup>等研究了目标表面倾斜角度对高斯脉冲回波展宽的影响。马鹏阁<sup>[4]</sup>等研究了空中目标激光雷达回波的脉冲展宽特性,并进行建模及数值仿真。寇添<sup>[5]</sup>等建立了激光成像雷达探测目标的回波数学模型,分析了目标距离、尺寸以及速度等因素对于脉冲时延和展宽的影响。徐孝彬<sup>[6]</sup>等研究了脉冲激光周向探测平面目标的展宽特性,推导了脉冲展宽理论公式。以上学者均未从目标散射特性对激光雷达回波特性影响的角度开展研究,且主要是基于数值方法仿真目标三维模型,不利于进一步模拟复杂目标。

本文推导了考虑探测激光时空分布的目标激光雷达回波公式,通过 3DS MAX 三维建模软件建立了三种特定典型目标的三维模型,主要研究分析了不同目标表面材质在理想漫反射、近似镜面反射以及粗糙表面三种情况下的多角度回波峰值序列特性,并基于此分析了目标散射特性对其激光雷达回波特性的影响。

## 2 目标激光雷达回波模型

激光和微波的本质都是电磁波,因此从微波雷达作用距离方程可以推导得到激光雷达作用距离方程<sup>[7-8]</sup>,考虑扩展目标情况,当激光光斑将目标全部覆盖时,可以得到目标激光雷达回波解析表达式:

$$P_R(t) = \int_{x,y,z \in C} \frac{P_T(x,y,z,t)}{\pi(\theta R)^2} \times \frac{\pi D^2}{4} \times \eta_{Atm}^2 \eta_{Sys} \times \rho(x,y,z) \cos\alpha dx dy dz \quad (1)$$

式中,积分范围  $C$  是目标上的受激光照射的所有表面元;  $\alpha$  为目标表面面元几何中心与系统探测方向的夹角。

高斯激光脉冲的时域波形可表示为:

$$P(t) = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{(t-2\tau)^2}{2\tau^2}\right) \quad (2)$$

参考文献[9]给出的某一时刻、目标上任意一点  $(x,y,z)$  的辐照度分布表达式,结合上式可得到

目标激光雷达回波功率表达式:

$$P_R(t) = \int_{x,y,z \in C} \frac{2P(t)}{\pi\omega^2(z)} \exp\left[-2\frac{(x^2+y^2)}{\omega^2(z)}\right] \frac{1}{\pi(\theta R)^2} \frac{\pi D^2}{4} \eta_{Atm}^2 \eta_{Sys} \rho(x,y,z) \cos\alpha dx dy dz \quad (3)$$

上式参数的含义如表 1 所示。

表 1 目标激光雷达回波公式中的参数

Tab. 1 Parameters used in target laser radar echo formula

Abbreviation	Meaning
$P_R$	接收功率/W
$P_T$	发射功率/W
$G_T$	发射系统增益
$\sigma$	激光雷达散射截面
$D$	接收光学系统孔径/m
$R$	探测距离/m
$\eta_{Atm}$	大气传输系数
$\eta_{Sys}$	光学系统效率因子
$\rho(x,y,z)$	目标表面 BRDF
$P_0$	激光脉冲峰值功率
$\tau$	脉宽/ns
$\omega(z)$	高斯光束宽度
$\lambda$	波长/nm

## 3 三维目标及其散射特性建模

### 3.1 建模流程

首先通过 3DS MAX 软件建立目标的三维模型,将目标表面划分为多个微小的面元,并获取观测坐标系下每个小面元的顶点坐标以及法向向量,接下来根据所获取的目标表面小面元顶点坐标、法向向量以及光照方向,判断这些小面元在观测方向上的相互遮挡关系,计算得到每个小面元的回波,叠加后即可得到整个目标的回波。建模流程如图 1 所示。

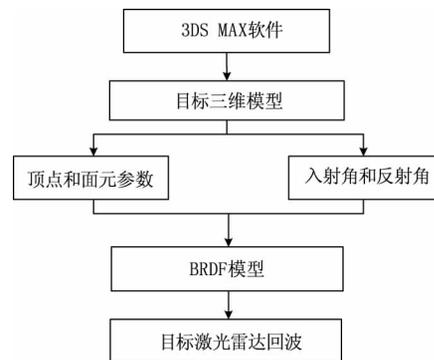


图 1 建模流程图

Fig. 1 Flow diagram of modeling

### 3.2 目标三维模型

由于一般空间目标等都是由比较简单的几何体组合而成的,建立了圆柱体、圆锥体以及球体三种典型的几何目标的三维模型。图 2(a)、(b)、(c)给出了某一角度下三种典型几何体的二维距离像;图 3(a)、(b)、(c)给出了目标表面法向向量与观测方向夹角余弦值。

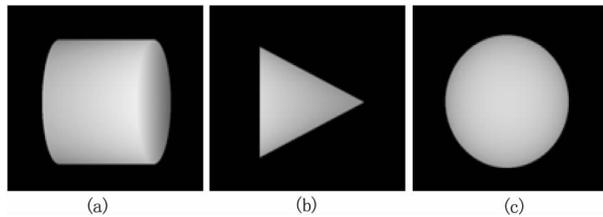


图 2 典型几何体的二维距离像

Fig.2 3D Model of simple geometric target

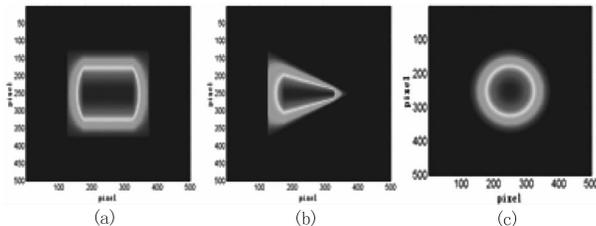


图 3 典型几何体表面法向向量与观测方向夹角余弦示意图

Fig.3 Value of the angle between target surface normal vector and observation orientation

### 3.3 目标散射特性模型

目标对照射到其表面光辐射的散射特性与表面材料的种类、粗糙度及目标几何外形等多种参数有关。目前,研究人员建立的较为典型的 BRDF 模型主要有: Davies BRDF 模型<sup>[10]</sup>、Torrance - Sparrow 模型<sup>[11]</sup>、五参数半经验统计模型<sup>[12]</sup>、Sun BRDF 模型<sup>[13]</sup>以及四参量单站模型等<sup>[2]</sup>,其中,四参量单站探测 BRDF 模型是瑞典国防研究院 (FOI) 根据大量实验数据拟合的经验模型,是激光雷达主动探测模型中常用的收发同路 BRDF 模型:

$$\rho = \frac{A}{\cos^6(\theta)} \exp\left(-\frac{\tan^2(\theta)}{s^2}\right) + B \cos^m(\theta) \quad (4)$$

其中,  $\theta$  为入射角 (因是单站探测,也即反射角);  $m$  表示漫反射系数;  $s$  表示镜面反射系数;  $B$  为漫反射幅度系数;  $A$  为镜面反射幅度系数。

### 4 目标激光雷达回波特性仿真分析

由于目标的散射特性不仅受到其表面材料 BRDF 特性的影响,还与目标几何外形有关,选取了比较典型的圆柱体、圆锥体以及球体等三种简单几

何体作为研究对象。仿真采用脉宽为 2 ns 激光光源照射目标,分别采用高为 1 m、底面半径为 0.5 m 的圆柱体,高为 1 m、底面半径 0.5 m 的圆锥体以及半径为 0.5 的球体。通过获取三种目标在 BRDF 模型参数取值不同的情况下的多角度回波峰值序列,进而分析目标散射特性对其激光回波特性的影响。图 4、5、6 中的曲线 A 代表目标散射特性为理想漫反射情况,对应参数取值  $A=0.2, s=0.5, B=0.2, m=1$ ; 曲线 B 代表粗糙表面情况,对应参数取值  $A=0.4, s=0.05, B=0.4, m=50$ ; 曲线 C 代表近似镜面反射情况,对应参数取值  $A=0.05, s=1, B=0.05, m=5$ ,在此统一说明。

#### 4.1 圆柱体

由图 4 可知,由于圆柱体关于其中心轴对称,在通过几何中心与中心轴垂直的直线也是其对称轴,因此其回波峰值序列分别关于  $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  对称的。当表面散射特性为理想漫反射体时,相邻角度的回波峰值分布具有明显的连续性和对称性,呈现出明显的极大值和极小值点;当表面散射特性为近似镜面反射时,其回波整体幅度明显小于理想漫反射和粗糙表面情况,但仍在  $90^\circ$  和  $270^\circ$  呈现出较为明显的对称特性,在大部分角度范围内回波峰值相对较小,这是由于当目标表面元法线矢量与探测方向夹角增大时,其回波幅度会很快下降;当表面散射特性为粗糙表面时,目标在各个角度下的回波峰值大小相近,与理想漫反射和镜面反射情况相比,其回波峰值序列的对称性特点减弱。

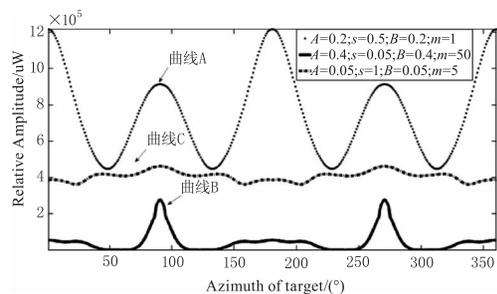


图 4 圆柱体在  $0^\circ \sim 360^\circ$  角度下回波峰值序列

Fig.4 Peak values of echoes of a cylinder from  $0^\circ$  to  $360^\circ$

#### 4.2 圆锥体

由图 5 可知,由于圆锥体关于其中心轴是轴对称的,因此其回波峰值序列关于  $180^\circ$  对称。当表面散射特性为理想漫反射体时,相邻角度的回波峰值分布具有明显的连续性和对称性,呈现出明显的极

大值和极小值点,这与圆柱体的情况较为类似,但不同的是,其回波峰值的最大值出现在  $180^\circ$ ,这是由于此时圆锥体的底面法向方向平行于观测方向造成的;当表面散射特性为近似镜面反射时,其回波整体幅度明显小于理想漫反射和粗糙表面情况,但仍在  $180^\circ$  呈现出较为明显的对称性,而在大多数角度范围内回波峰值较小,圆锥体在某些角度范围如  $0^\circ \sim 50^\circ$  呈现出很小的回波幅度,在另外一些角度,粗糙表面情况下的回波反而高于理想漫反射,这是由其外形特征决定的;当表面散射特性为粗糙表面时,与圆柱体情况相比,其回波峰值序列的对称性较为明显。

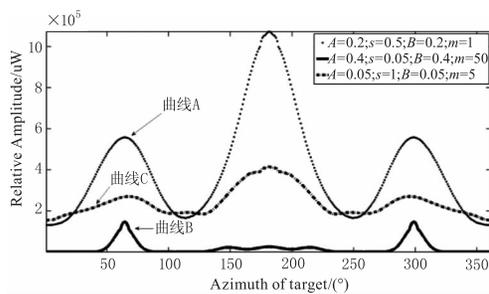


图 5 圆锥体在  $0^\circ \sim 360^\circ$  角度下回波峰值序列

Fig. 5 Peak values of echoes of a cone from  $0^\circ$  to  $360^\circ$

### 4.3 球体

由于球体的几何对称特性,在球体自身半径等参数固定的条件下,其各个角度的回波均相同,因此,更便于考虑 BRDF 参数取值的变化对回波特性的影响。如图 6 给出了在 BRDF 参数不同的三种情况下,半径为 0.5 m 的球体的回波分布;理想漫反射情况下回波幅度最大,粗糙表面其次,近似镜面反射情况最小;三种情况下回波峰值位置也不尽相同,镜面反射情况峰值位置位于最左侧,粗糙表面情况位于最右侧,理想漫反射情况位于二者之间。

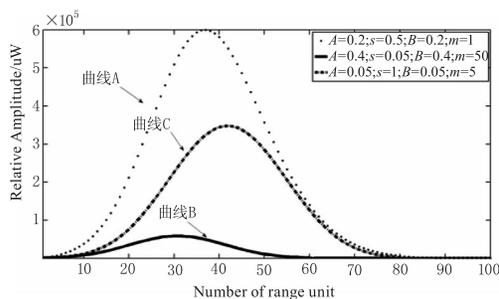


图 6 球体回波峰值

Fig. 6 Peak values of echoes of a sphere

通过以上对三种典型目标在不同表面散射特性

情况下多角度回波峰值序列的分析可以得出以下结论:

(1) 目标镜面反射分量可对特定角度下的目标回波产生较大的影响,这是由于当目标表面法向量与观测方向近似垂直或夹角较大时,接收到的由镜面反射提供的回波能量很小,此时的回波成分主要是由漫反射分量组成;

(2) 在目标表面 BRDF 参数所采用的模型以及参数取值相同的情况下,目标的几何外形同样会对目标散射特性产生影响,不同目标的回波特性也不同;在目标外形固定的情况下,目标表面 BRDF 参数设置不同对应了不同的表面材质,同样会对回波的峰值位置和脉冲展宽产生影响;

(3) 对于具有几何对称性的目标体,通过获取其多角度下的回波峰值序列,可以反演其对称轴所对应的观测角度,且不同目标的对称特性可以通过分析其回波峰值序列分布形式得到。

## 5 结论

本文通过建立圆锥体、圆柱体以及球体等三种典型目标的三维模型以及目标散射特性模型,仿真分析了目标表面材质以及外形特征对目标激光雷达回波特性的影响。结果表明,目标形状、尺寸等外形特征以及表面材质散射特性会对目标激光雷达回波特性产生不同的影响,由于空间目标通常具有几何对称性,本文研究内容和结论可为空间目标特性反演、激光雷达反射层析成像以及激光雷达三维成像提供参考。如何从目标激光雷达回波中提取有效的特征进行目标识别是下一步需要研究的内容。

## 参考文献:

- [1] ZHANG Tinghua, NI Guoqiang, GAO Kun, et al. Feature extraction from "cat-eye" targets' laser range profile based on bi-spectrum [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47 (3): 341 - 346. (in Chinese)  
张廷华,倪国强,高昆,等.基于双谱的猫眼目标激光一维距离像特征提取[J].*激光与红外*,2017,47(3): 341 - 346.
- [2] Steinvall O. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections [J]. *Applied Optics*, 2000, 39 (24): 4381 - 4391.
- [3] Johnson S E. Effect of target surface orientation on the

- range precision of laser detection and ranging systems [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2009, 3 (1): 033564 - 033564 - 13.
- [4] MA Pengge, QI Lin, YANG Yi, et al. Study on airborne multi-pulse ladar target signal simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32 (1): 271 - 276. (in Chinese)  
马鹏阁, 齐林, 羊毅, 等. 机载多脉冲激光雷达目标信号模拟器的研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32 (1): 271 - 276.
- [5] Kou Tian, Wang Haiyan, Wang Fang, et al. Research on pulse echo characteristic of airborne laser detecting air target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, (4): 201 - 209. (in Chinese)  
寇添, 王海晏, 王芳, 等. 机载激光探测空中目标脉冲回波特性研究 [J]. *光学学报*, 2015, (4): 201 - 209.
- [6] XUXiaobin, ZHANG He, CHEN Shanshan. Plane target echo characteristics of pulsed laser circular-viewing detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, (4): 217 - 224. (in Chinese)  
徐孝彬, 张合, 陈杉杉. 脉冲激光周向探测平面目标回波特性 [J]. *光学学报*, 2017, (4): 217 - 224.
- [7] LIU Zhiying, XING Tianxiang. Optical system design for laser semi-active guided seeker [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46 (5): 527 - 531. (in Chinese)  
刘智颖, 邢天祥. 激光半主动导引头光学系统设计 [J]. *激光与红外*, 2016, 46 (5): 527 - 531.
- [8] Wagner W, Ullrich A, Ducic V, et al. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitizing airborne laserscanner [J]. *Journal of Photogrammetry & Remote sensing*, 2006, 60: 100 - 112.
- [9] SUN He, YAO Yuan, XU Zhengping, et al. Simulation modeling of scanning ladar echo signal based on coordinates transformation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52 (1): 68 - 75. (in Chinese)  
孙嵩, 姚园, 徐正平, 等. 基于坐标变换的扫描激光雷达回波信号建模仿真 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52 (1): 68 - 75.
- [10] Shen Y J, Zhang Z M, Tsai B K. Bidirectional reflectance distribution function of rough silicon wafers [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2001, 22 (4): 1311 - 1326.
- [11] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57 (9): 1105 - 1114.
- [12] WU Zhensen, XIE Donghui, XIE Pinhua, et al. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22 (8): 897 - 901. (in Chinese)  
吴振森, 谢东辉, 谢品华, 等. 粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法 [J]. *光学学报*, 2002, 22 (8): 897 - 901.
- [13] Sun Yinlong. Statistical ray method for deriving reflection models of rough surfaces [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2007, 24 (3): 1105 - 1114.