

引用格式: CHEN Jian-biao, SUN Hua-yan, ZHAO Yan-zhong, *et al.* Characteristic Analysis of Target Laser One-dimensional Range Profiles Based on Heterodyne Detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12):1228001  
陈剑彪, 孙华燕, 赵延仲, 等. 基于相干探测的目标激光一维距离像特性分析[J]. *光子学报*, 2019, **48**(12):1228001

# 基于相干探测的目标激光一维距离像特性分析

陈剑彪<sup>1</sup>, 孙华燕<sup>1</sup>, 赵延仲<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 中国航天员科研训练中心, 北京 100094)

**摘要:** 为了实现对空间目标的远距离、高分辨率激光一维距离像探测及特性分析, 在建立点目标激光一维距离像光外差探测模型的基础上, 进一步通过三维建模的方式获取了三维目标的激光一维距离像。比较了圆锥体目标光外差探测获取的一维距离像与其距离分辨激光雷达散射截面、脉冲激光一维距离像之间的区别和联系, 分析了目标尺寸、姿态、调频带宽以及表面材质对目标激光一维距离像的影响。实验结果验证了目标一维距离像能够反映目标外形特征, 可为目标特性分析及识别提供参考。

**关键词:** 相干探测; 线性调频信号; 激光一维距离像; 三维建模; 目标识别

中图分类号: TN951

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194812.1228001

## Characteristic Analysis of Target Laser One-dimensional Range Profiles Based on Heterodyne Detection

CHEN Jian-biao<sup>1</sup>, SUN Hua-yan<sup>1</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 *China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China*)

**Abstract:** In order to realize the laser one-dimensional range profile detection with long distance and high resolution and the echo feature analysis of space targets, on the basis of establishing one-dimensional heterodyne detection model of point target laser range image, furthermore the laser one-dimensional range profile of 3-D target is obtained by means of 3-D modeling. The differences and relations among the one-dimensional range profile acquired by optical heterodyne detection of a specific target, its range-resolved laser radar cross section and pulsed laser one-dimensional range profile are compared. The effects of target size, attitude, frequency modulation bandwidth and surface material on the target laser one-dimensional range profile are analyzed. The experiment result shows that the target one-dimensional range profile can reflect the shape features. The conclusions can provide references for analysis of target characteristics and target recognition.

**Key words:** Coherent detection; Linear frequency modulation signal; Laser one-dimensional range profile; 3-D modeling; Target recognition

**OCIS Codes:** 280.4750; 110.2960; 100.3010; 100.6950; 110.1758

## 0 引言

当激光雷达系统的距离分辨率足以将目标在探测方向上划分为多个距离单元时, 能够获取目标的激光一维距离像 (Laser one-dimensional Range Profiles, LRP), 进一步通过参数反演能够获取目标沿视线方向的

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61302183)

第一作者: 陈剑彪 (1991-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为激光雷达、信号处理。Email: general\_chen2041@163.com

导师 (通讯作者): 孙华燕 (1963-), 女, 教授, 博导, 主要研究方向为激光主动探测及成像。Email: shy221528@vip.sina.com

收稿日期: 2019-06-28; 录用日期: 2019-09-03

<http://www.photon.ac.cn>

外形、尺寸以及散射特性等信息,在目标分类及识别领域有重要应用前景.近年来,国内外学者对激光一维距离像开展了广泛的研究,包括探测体制、目标特性分析、参数反演以及实验研究等方面. SHIRLEY 等提出了距离分辨激光雷达散射截面(Range-resolved Laser Radar Cross Section, RRLRCS)的概念<sup>[1-2]</sup>,建立了简单几何体的解析模型,并分析了 RRLRCS 特性; WANG, LI 等基于光散射理论,研究了采用脉冲激光探测粗糙表面的 LRP 特性,分析了目标几何参数以及激光参数变化对 LRP 的影响,并开展了实验对比研究<sup>[3-5]</sup>; MOU 等在分析目标脉冲激光 LRP 特性的基础上,进一步反演了目标的几何参数<sup>[6]</sup>; OVE 等主要研究了 LRP 在目标识别领域的应用,针对飞机、舰艇、光学镜头等目标开展了外场实验,还研究了采用单光子探测体制获取目标 LRP 的体制<sup>[7-9]</sup>.

获取目标 LRP 的探测体制包括非相干直接探测、光外差(相干)探测两种.直接探测方式通过发射激光窄脉冲以获取高的距离分辨率,采用高速光电探测器接收回波信号,对激光源以及光电接收、存储设备性能的要求较高<sup>[10]</sup>.光外差探测通过发射调制后的大时宽带宽激光信号(如线性调频信号),采用光混频、光平衡探测等方式获取本振光和参考光的差频信号,经过滤波等信号处理过程即可得到目标的一维距离像,该方法兼顾了系统分辨率与探测距离两方面因素,但整体系统的复杂度要高于非相干探测系统<sup>[11-12]</sup>.目前,针对 LRP 技术的大多数理论分析及实验研究都是基于非相干激光探测开展的<sup>[13]</sup>,对采用相干探测体制获取目标 LRP 的理论研究及分析较少,且研究对象主要是通过建立二次回转体的解析模型来实现仿真分析<sup>[14-15]</sup>,不利于对实际复杂目标开展研究.为了兼顾远距离、高距离分辨率探测的目的,有必要对采用调制连续波激光外差方式获取的目标 LRP 特性进行研究分析.

本文首先建立了点目标 LRP 光外差探测理论模型,通过三维建模的方式获取了三维目标的 LRP,分析了目标尺寸、姿态、探测带宽以及散射特性对其 LRP 特性的影响,并将其与目标的 RRLRCS 以及脉冲激光 LRP 特性进行了对比分析,进一步开展了实验验证.

## 1 LRP 外差探测模型

光外差探测原理与微波电外差探测相似,其原理如图 1 所示:调制激光源经分束后一部分照射目标,另一部分作为本振光,目标返回的信号光束与本振光束经合束处理后同时入射到光电探测器表面,发生光混频后产生相干光场,经 A/D 转换将光信号转换成电流信号,此时输出电流功率与输入光功率的平方成正比,采用信号采集卡或示波器显示和存储,经信号滤波、变换等处理后得到目标的 LRP.

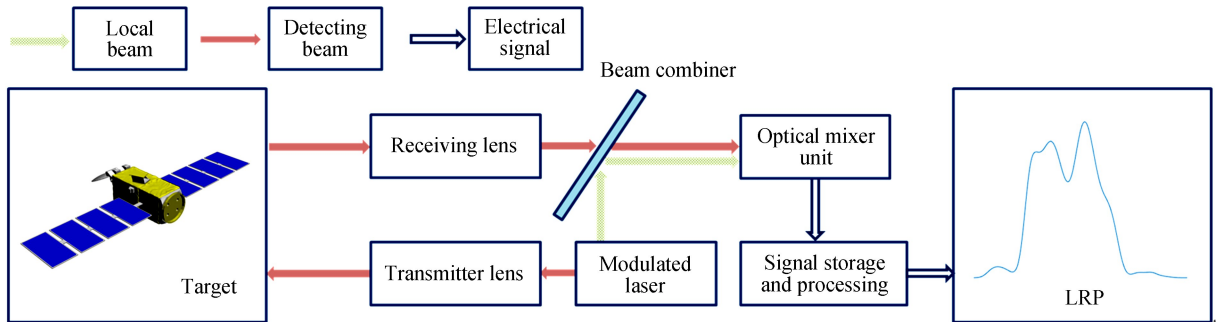


图 1 激光 LRP 外差探测示意图  
Fig.1 Schematic of heterodyne detection of LRP

### 1.1 点目标情况

设入射光辐射电场  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = U(\mathbf{r}, t) \exp(j\omega t) \quad (1)$$

式中,  $U(\mathbf{r}, t)$  为电场复振幅,  $\omega$  为频率,  $\mathbf{r}$  为位置信息, 由点目标返回的信号光到达光电探测器后输出电流  $i(t)$  为

$$i(t) = \int_S |U(\mathbf{r}, t)|^2 dS \quad (2)$$

式中,  $S$  为光电探测器的探测面积.

对于线性调频连续激光信号, 可设发射信号  $S(t)$  为

$$S(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) E \exp[j(2\pi f_c t + \pi K t^2)] \quad (3)$$

$$\text{rect}(u) = \begin{cases} 1 & |u| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & |u| > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $E$  表示信号幅度,  $f_c$  表示调频中心频率,  $K$  表示调频斜率,  $T_p$  为脉冲宽度, 调频带宽  $B = K \times T_p$ ,  $t \in [-T_p/2, T_p/2]$  表示时间。

接收到时延为  $\tau$  的回波信号为

$$S_r(t) = S(t - \tau) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{T_p}\right) E_s \exp\{j[2\pi f_c (t - \tau) + \pi K (t - \tau)^2]\} \quad (5)$$

式中,  $E_s$  表示回波信号经过一定衰减后到达光电探测器表面的信号幅度。

令发射信号经过一定时延  $\tau_{\text{ref}}$  得到本振信号为

$$L(t) = S(t - \tau_{\text{ref}}) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau_{\text{ref}}}{T_p}\right) E_L \exp\{j[2\pi f_c (t - \tau_{\text{ref}}) + \pi K (t - \tau_{\text{ref}})^2]\} \quad (6)$$

式中,  $E_L$  表示发射信号经过一定衰减后到达光电探测器表面的本振信号幅度。

根据光电探测器的平方律特性, 其输出电流为

$$I(t) = \alpha |S_r(t) + L(t)|^2 \quad (7)$$

式中,  $\alpha$  表示光电探测器的功率放大系数, 则有

$$I(t) = \alpha [S_r(t) + L(t)] [S_r(t) + L(t)]^* = \alpha [|S_r(t)|^2 + |L(t)|^2 + S_r(t)L(t)^* + S_r(t)^*L(t)] \quad (8)$$

将  $S_r(t)$  与  $L(t)$  代入式(8), 可将  $\text{rect}\left(\frac{t - \tau}{T_p}\right)$  与  $\text{rect}\left(\frac{t - \tau_{\text{ref}}}{T_p}\right)$  看作近似相等, 得到

$$I(t) = \alpha \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{T_p}\right) \{E_s^2 + E_L^2 + 2E_s E_L \cos[2\pi K (\tau - \tau_{\text{ref}})t + \phi_s]\} \quad (9)$$

式中,  $\phi_s = 2\pi f_c (t - \tau_{\text{ref}}) - \pi K (\tau^2 - \tau_{\text{ref}}^2)$ 。

滤除直流分量后得到交流分量为

$$I'(t) = 2\alpha \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{T_p}\right) E_s E_L \cos[2\pi K (\tau - \tau_{\text{ref}})t + \phi_s] \quad (10)$$

使其通过希尔伯特变换器后并取共轭, 得到

$$S_r(t) = A \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{T_p}\right) \exp\{-j[2\pi K (\tau - \tau_{\text{ref}})t + \phi_s]\} \quad (11)$$

式中,  $A$  表示希尔伯特变换器输出信号幅度。

将  $\phi_s$  代入式(11), 可得<sup>[16]</sup>

$$\begin{aligned} S_r(t) &= A \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{T_p}\right) \exp\{-j[2\pi K (\tau - \tau_{\text{ref}})t + 2\pi f_c (\tau - \tau_{\text{ref}}) - \pi K (\tau^2 - \tau_{\text{ref}}^2)]\} = \\ &A \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{T_p}\right) \exp\{-j2\pi K (\tau - \tau_{\text{ref}}) (t - \tau_{\text{ref}}) + j\pi K (\tau - \tau_{\text{ref}})^2 - j2\pi f_c (\tau - \tau_{\text{ref}})\} \end{aligned} \quad (12)$$

此时, 得到的信号  $S_n(t)$  与将回波信号与本振信号共轭相乘即  $S_r(t)L(t)^*$  得到的形式一致, 因此, 可将激光信号的外差接收看作是对回波信号的解线频调处理<sup>[17]</sup>, 再对信号  $S_n(t)$  进行傅里叶变换即可得到目标的 LRP。

采用线性调频激光探测体制, 理论上激光雷达一维距离成像的分辨率为  $\Delta R = c/2B$ , 其中  $c$  为光速,  $B$  为激光调频带宽; 而实际上分辨率与发射激光参数、探测器带宽、响应时间以及信号采集系统带宽等有关, 但探测距离的远近并不影响系统的距离分辨率。

## 1.2 三维目标情况

由于采用的电磁波段不同, 微波波段的散射点模型不能很好地描述在光波段目标的散射特性, 需要建立精确的目标三维模型, 基于点目标理论分析, 可以拓展到三维目标模型的情况, 即三维目标的回波相当于多

个点回波的相干叠加,对于三维目标的计算,主要是通过卷积模型进行近似计算,目标模型尺寸、外形、姿态、表面材质以及与探测点的距离均可以在三维模型中设置,采用此方法,即可完成对任意目标的仿真。

采用文献[18]的仿真方法,建立特定目标的三维模型,对其表面进行合理的面元划分,将模型导入 OpenGL 进行处理后可分别得到目标的二维距离像、面元与视线方向的夹角余弦值等信息,采用相应的双向反射分布函数(Bidirectional Reflection Distribution Function, BRDF)模型,可以计算出目标在视线方向的反射率分布  $R_{\text{reflec}}$ ;根据目标探测的卷积理论<sup>[19]</sup>,目标回波等于探测激光信号与目标反射率分布的卷积,从而可计算出目标在任意姿态下的 LRP,三维目标的 LRP 可表示为

$$W_{\text{LRP}} = S(t) \otimes R_{\text{reflec}} \quad (13)$$

式中,符号  $\otimes$  表示卷积运算。

具体仿真流程如图 2 所示,该方法通过改变发射激光参数、目标模型、尺寸、姿态以及表面材质等信息,得到不同目标在多种情形下的目标 LRP。

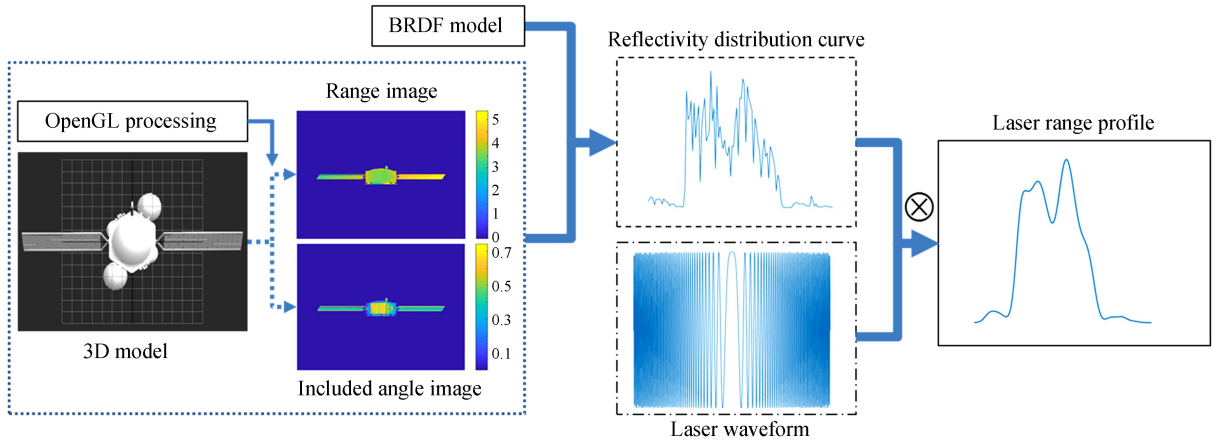


图 2 三维目标 LRP 探测示意图

Fig.2 Schematic of LRP detection of 3-D target

其中,瑞典国防研究院提出的激光单站探测 BRDF 模型能够反映多种材料的散射特性,具体见文献[20]中式(12),本文选取此模型进行仿真计算,选取四种典型表面材料,具体参数见表 1,  $A$  为镜面反射幅度分量,  $s$  为镜面反射系数,且  $s < 1$ ,  $B$  为漫反射幅度分量,  $m$  为漫反射系数。

表 1 激光单站探测 BRDF 模型参数取值

Table 1 The value of BRDF model coefficients of single-station laser detection

	$A$	$s$	$B$	$m$
Diffuse surface	0	0	1	0.5
Specular surface	1	0.3	0	0
Mixed surface 1	0.5	0.2	0.5	0.8
Mixed surface 2	0.5	0.4	0.2	0.05

## 2 实验验证及仿真分析

### 2.1 仿真分析

为了准确描述探测过程激光照射及目标姿态,分别建立观察坐标系  $O-XYZ$ 、圆锥体目标初始坐标系  $O'-X'Y'Z'$  以及其本体坐标系  $O'-xyz$ ,探测系统位于  $O$ ,选取圆锥体目标为研究对象,圆锥体几何中心位于  $O'$ ,在本体坐标系  $O'-xyz$  中,圆锥体锥角始终指向  $+z$  方向;将观测坐标系  $O-XYZ$  沿  $+Z$  方向平移距离  $R$  后得到目标初始坐标系  $O'-X'Y'Z'$ ,初始状态下目标本体坐标系  $O'-xyz$  与初始坐标系  $O'-X'Y'Z'$  重合,如图 3(a)所示.仿真实验中目标姿态确定:将目标本体坐标系  $z$  轴旋转至指向观察坐标系  $-Z$  方向,将  $x$  轴与  $Y'$  重合、 $y$  轴与  $X'$  重合,设定此状态下  $+z$  方向与  $-Z$  方向夹角为  $\theta = 0^\circ$ ,圆锥体的半锥角为  $\beta$ ,距探测点的距离为  $R = 10$  km.

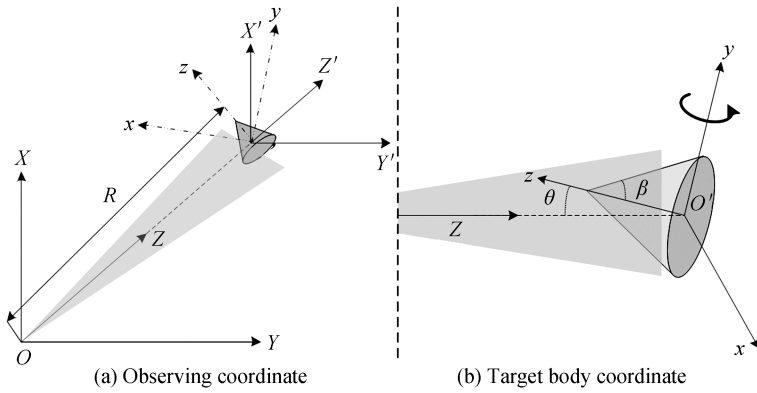


图3 仿真坐标系示意图  
Fig.3 Sketch of coordinates setting up

仿真部分未做说明时默认目标表面材质为朗伯体,其反射率分布满足  $\rho/\pi$ ,其中, $\rho$  为目标半球反射率,对于不吸收辐射的目标体,取值为 1.

分别分析在目标尺寸、调频带宽、目标姿态以及表面材质变化时所引起的目标 LRP 的变化<sup>[21]</sup>.为了对比说明,给出了目标相应条件下 RRLRCS 以及脉冲激光探测 LRP 进行比较分析.本节的仿真结果中横坐标均减去探测距离  $R=10\text{ km}$ ,即目标回波起点从横坐标为“0”处开始.

2.1.1 目标尺寸的影响

图 4(a)~(c)分别给出了圆锥体的半锥角  $\beta=30^\circ$ 、 $\theta=0^\circ$ ,圆锥体的高  $h$  分别为 0.1 m、0.2、0.5 m、1 m 时的 RRLRCS、脉冲激光 LRP 以及调频连续波 LRP 的分布图,其中,纵坐标表示相对幅度,横坐标表示距离,带宽  $BW=5\text{ GHz}$ ,脉冲激光脉宽  $\tau=330\text{ ps}$ .由图 4(a)分析可知,在其他参数不变时,目标 RRLRCS 分布范围能够清晰地反映目标沿视线方向的尺寸信息,分析其幅度分布趋势可在一定程度上推断目标外形;由图 4(b)分析可知,目标脉冲激光探测体制下,距离分辨率  $\Delta R$  由脉宽  $\tau=330\text{ ps}$  决定,此时  $\Delta R=0.0495\text{ m}$ ,目标 LRP 同样能够较为清楚地反映目标在视线方向的尺寸大小以及外形信息,与图4(a)相比,由于激光脉冲与

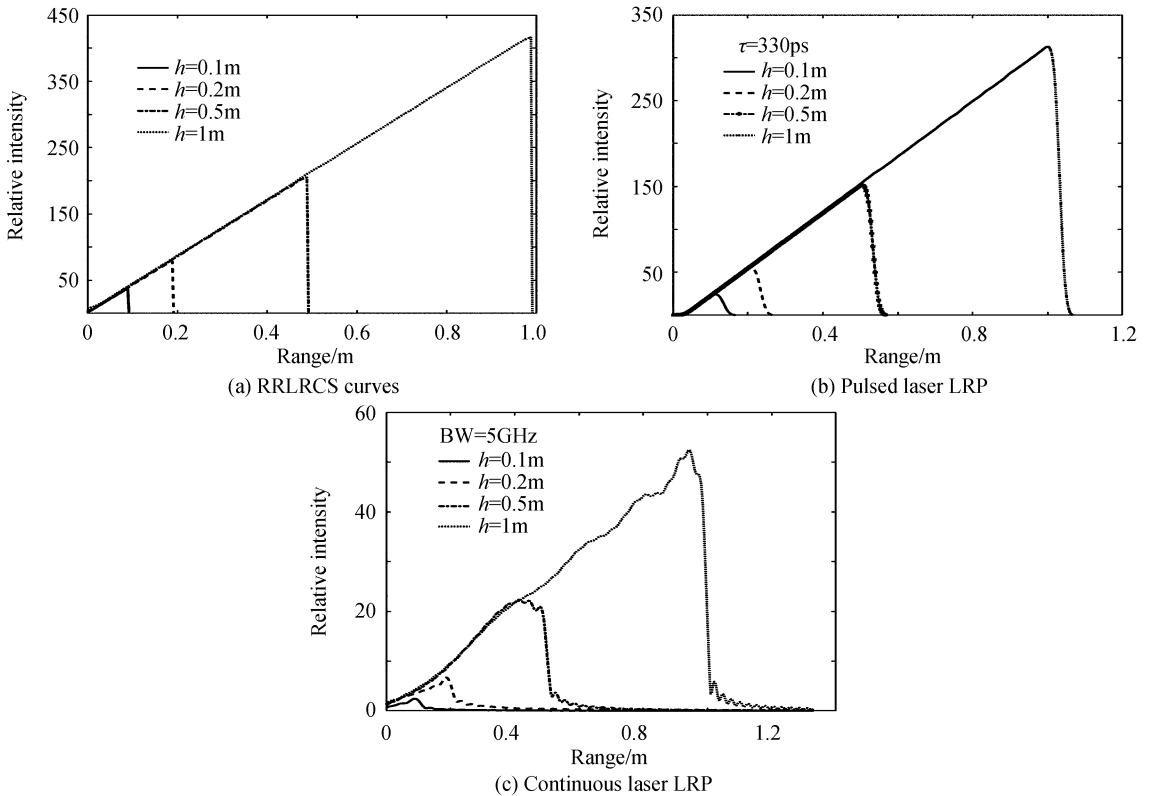


图4 目标尺寸对激光一维距离像的影响( $\beta=30^\circ$ ,  $\theta=0^\circ$ )  
Fig.4 The impact of the target size on LRP ( $\beta=30^\circ$ ,  $\theta=0^\circ$ )

RRLRCS 卷积后,目标脉冲 LRP 产生了波形展宽,且目标尺寸越小,该现象越明显;由图 4(c)分析可知,调频连续波 LRP 也能够反演出目标在视线方向的几何特征,但其波形出现了旁瓣以及不规整的现象,这主要是由调频连续波的特性决定的,可通过滤波方法进行适当处理,但不能完全消除.由分析知,在同样的姿态下,不同尺寸同种目标的 LRP 呈现出一定的规律性和相似性.

### 2.1.2 调频带宽的影响

图 5(a)、(b)分别给出了圆锥体  $\beta=30^\circ$ 、 $\theta=0^\circ$ 、 $h=1$  m 时的脉冲 LRP 以及调频连续波 LRP 的分布.图 5(a)给出了脉宽  $\tau$  为 1.6 ns、550 ps、330 ps、180 ps 时的脉冲 LRP;图 5(b)给出了调频带宽分别为 1 GHz、3 GHz、5 GHz、9 GHz 时调频连续波 LRP;两种体制下对应的距离分辨率为 0.25 m、0.083 m、0.05 m、0.027 m.由图 5(a)分析可知,激光脉宽  $\tau$  较大时,LRP 的脉冲展宽效应较为明显,距离分辨率不高,随着  $\tau$  的减小,距离分辨率  $\Delta R$  更高,根据 LRP 分布能够更准确地反演目标的长度信息;发射激光脉冲的峰值功率固定不变,因此随着脉宽减小,LRP 的幅度也相应减小;由图 5(b)分析可知,调频连续波 LRP 在对应分辨率下,其波形展宽现象要相应小于脉冲 LRP 情况,随着带宽的增加  $\Delta R$  更高,且波形存在旁瓣现象,与脉冲 LRP 相比,在设置连续激光振幅不变时,不同带宽下的 LRP 幅度大致相同.

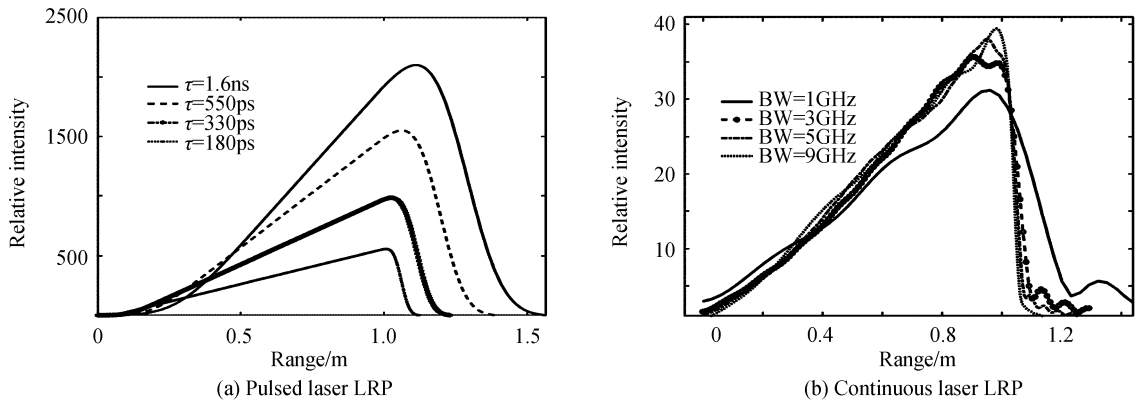
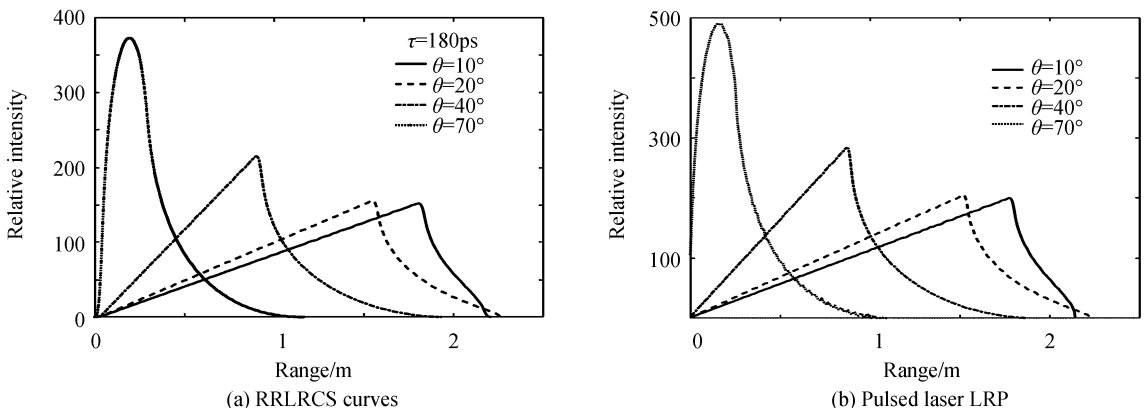


图 5 调频带宽对激光一维距离像的影响( $\beta=30^\circ$ ,  $\theta=0^\circ$ ,  $h=1$  m)

Fig.5 The impact of the frequency modulation bandwidth on LRP ( $\beta=30^\circ$ ,  $\theta=0^\circ$ ,  $h=1$  m)

### 2.1.3 目标姿态的影响

图 6(a)~(c)分别给出了圆锥体  $\beta=30^\circ$ 、 $h=2$  m、 $\theta=10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $70^\circ$  时的 RRLRCS、脉冲激光 LRP 以及调频连续波 LRP 的分布图.由图 6(a)分析可知,目标姿态的变化会引起 RRLRCS 的变化,在一定范围内,  $\theta$  变化越大, RRLRCS 变化越显著;以图 6(a)为参照,图 6(b)中脉冲激光 LRP 以及图 6(c)中调频连续波 LRP 均能够与 RRLRCS 波形相吻合,目标姿态发生变化时其对应的 LRP 同时发生改变,这能够反映其在不同姿态下的几何外形信息.根据图 6 总体来看,当分辨率  $\Delta R$  足够高时,同一种目标不同姿态的 LRP 具有较大的差异,且直接探测和相干探测两种体制均可以获得与 RRLRCS 十分接近的目标 LRP,从而可以对目标的 RRLRCS 进行测量及分析.



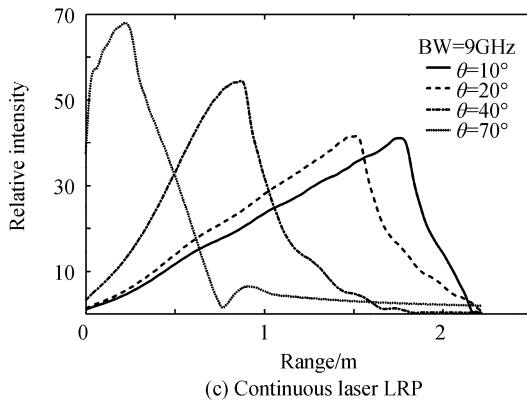


图 6 目标姿态对激光一维距离像的影响( $\beta=30^\circ, h=2\text{ m}$ )  
 Fig.6 The impact of the target attitude on LRP ( $\beta=30^\circ, h=2\text{ m}$ )

### 2.1.4 表面材质的影响

图 7(a)、(b)分别给出了圆锥体  $\beta=30^\circ, h=1\text{ m}, \theta=0^\circ, \tau=180\text{ ps}$ , 且其表面材质 BRDF 参数分别如表 1 所示的漫反射体、镜面反射、混合表面 1、2 时的脉冲激光 LRP 以及调频连续波 LRP 的分布图.图 7(c)、(d)给出了对应参数下  $\theta=30^\circ$  时各种表面的脉冲激光 LRP 以及调频连续波 LRP 的分布图.由图 7(a)、(b)分析可知,漫反射表面的 LRP 幅度最大,两种混合表面 LRP 幅度相当,且形状相似;由于  $\beta=30^\circ, \theta=0^\circ$ , 此时探测系统视线方向与圆锥体侧面面元的夹角为  $60^\circ$ ; 因此,当表面材质散射特性近似为镜面反射时,探测系统无法接收到目标回波.由图 7(c)、(d)分析可知,不同材质条件下的脉冲激光 LRP 以及调频连续波 LRP 波形较为相似;与图 7(a)、(b)对比,由于姿态角的改变,对应材质的脉冲激光 LRP 以及调频连续波 LRP 均发生了相应改变.

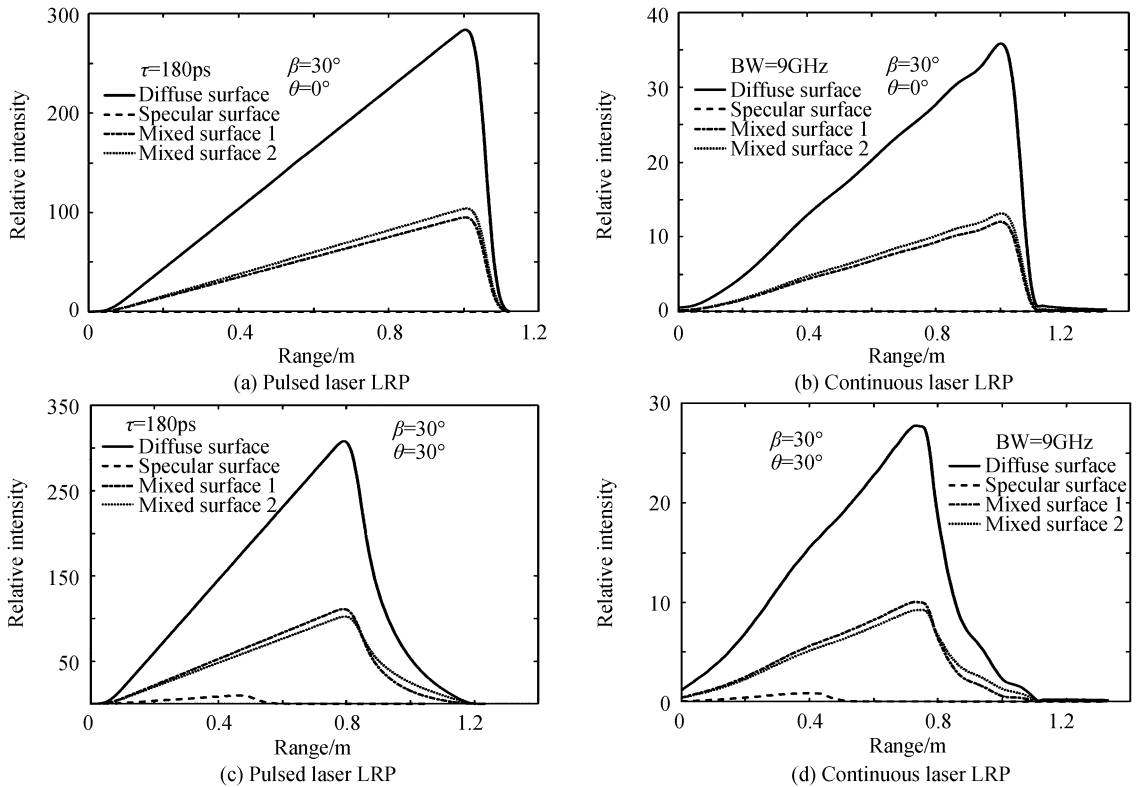


图 7 表面材质对激光一维距离像的影响  
 Fig.7 The impact of the surface material on LRP

## 2.2 实验验证

如图 8 所示,激光经过腔长调制后转换为线性调频的连续光波,通过单模光纤耦合器后分为两部分,一

部分直接作为相干探测的本振光,另一部分作为发射光通过发射-接收光学镜头照射目标,目标回波信号返回发射-接收光学镜头,经过光纤延时线后与本振光经单模光纤耦合器,之后在平衡探测器中产生混频效应,输出混频后的差频电信号,再通过低通滤波、快速傅里叶等信号处理过程后即可得到对应光纤延时线长度与自由空间光程距离之和的目标回波信息,即目标激光一维距离像。线性调频激光信号的光相干混频以及解线频调过程是在平衡探测器中完成的,简化了系统结构<sup>[3]</sup>。实验中发射信号与回波信号的隔离装置由偏振分光镜和波片组成,此收发隔离方式可调整回波偏振态,使信号光与本振光具有完全相同的偏振方式,提高光混频效率。其他光路部分则完全采用光纤器件搭成,简化了光路的结构,更重要的是抑制光线在系统内部传输时产生的退偏现象,提高了外差探测效率。激光源调频带宽为 4 GHz,圆锥体高为 30 cm,底面直径为 15 cm,长方体尺寸为 21 cm×12 cm×17 cm;目标放置于电动转台上,绕其几何中心旋转,且目标表面覆盖 3M 反射膜以增加其反射率,目标与探测系统的距离约为 5 m。

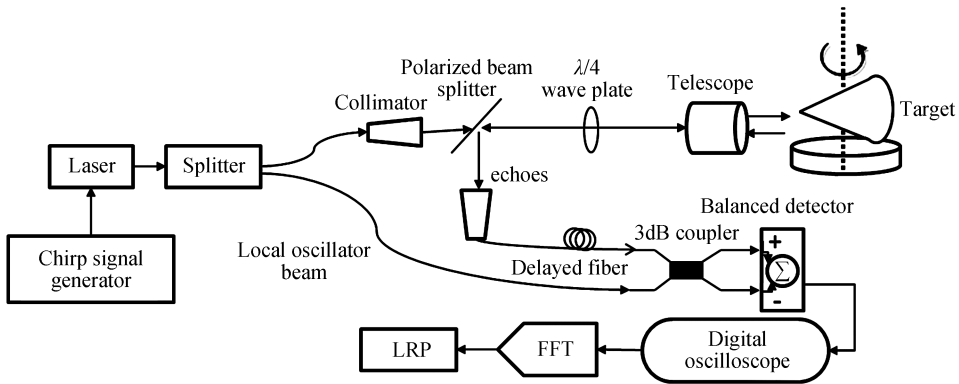


图 8 相干探测激光一维距离像示意图  
Fig.8 Diagram of target LRP by coherent detection

图 9(a)给出了当激光脉冲沿圆锥体中轴线方向由锥角向底面方向入射时实验与仿真得到的 LRP 对比;图 9(b)给出了探测方向与长方体对称轴夹角为 40°时的实验与仿真得到的 LRP 对比。实验数据波形的不规则起伏现象主要是由激光散斑效应引起的,另一方面,调谐激光器的非线性同样会降低探测系统的实际分辨率,调频非线性可以通过选用激光器线性度较好的调谐范围来降低其对分辨率的影响,而激光的散斑效应实际中很难控制和消除。由于仿真模型中未考虑散斑效应以及激光源调频非线性对 LRP 的影响,因此仿真结果的分辨率以及曲线光滑度要好于实验数据,根据图 4 对比仿真和实验数据,能够初步验证该仿真方法的正确性和有效性。

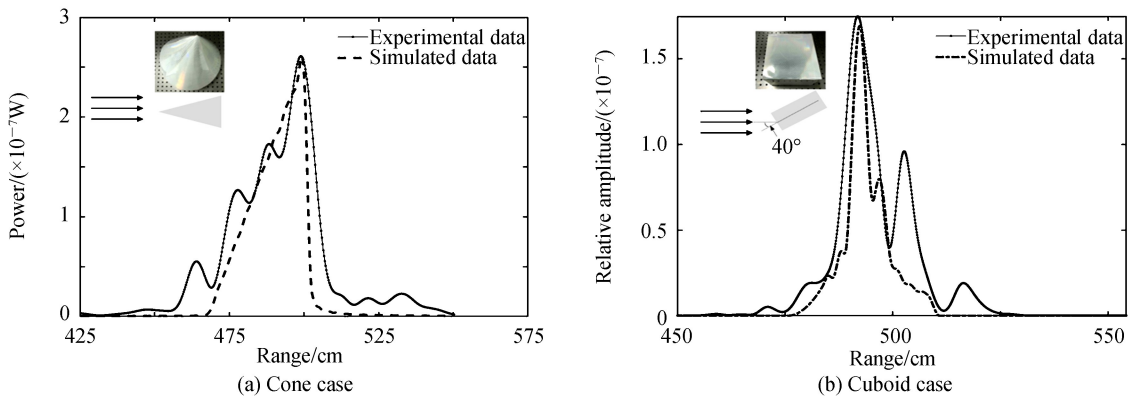


图 9 目标激光一维距离像仿真和实验对比  
Fig.9 Experimental and simulated LRP of targets

### 3 结论

本文在建立点目标 LRP 光外差探测模型的基础上,进一步通过三维建模的方式获取了三维目标的 LRP,通过分析圆锥体目标尺寸、姿态、调频带宽以及表面材质等参数变化对目标 RRLRCS、脉冲激光 LRP



以及调频连续波 LRP 的影响,得出结论:1)与脉冲激光 LRP 相比,调频连续波 LRP 由于探测体制的原因,回波会出现旁瓣,当分辨率相同时,二者均能准确地反映目标的几何特征,性质相似;2)发射大带宽或窄脉冲激光,从而使距离分辨率足够高时,可通过获取脉冲激光 LRP 以及调频连续波 LRP 用于测量目标的 RRLRCS;3)在其他条件不变时,目标表面材质的变化对于其 LRP 会产生重要影响.研究结果可为目标特性分析、识别提供参考.

## 参考文献

- [1] SHIRLEY LYLE G, PETER A LO. Bispectral analysis of the wavelength dependence of speckle: remote sensing of object shape[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, **11**(3):1025-1046.
- [2] SHIRLEY LYLE G, GREGORY R HALLERMAN. Applications of tunable lasers to laser radar and 3D imaging[R]. Massachusetts Institution of Technology Lexington Lincoln Lab, 1996.
- [3] WANG Ming-jun, WU Zhen-sen, LI Yan-hui, et al. High resolution range profile identifying simulation of laser radar based on pulse beam scattering characteristics of targets[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2009, **96**: 193-204.
- [4] LI Yan-hui, WU Zhen-sen, GONG Yan-jun. Laser range profile of the sphere[C]. SPIE, 2010, **7850**: 78501J.
- [5] LI Yan-hui, WU Zhen-sen. Targets recognition using subnanosecond pulse laser range profiles[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(16): 16788-16796.
- [6] MOU Yuan, WU Zhen-sen, LI Zheng-jun, et al. Geometric detection based on one-dimensional laser range profiles of dynamic conical target[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(35): 8335-8341.
- [7] STEINVALL O, SJÖQVIST L, HENRIKSSON M, et al. Photon counting lidar work at FOI[C]. SPIE, 2012, **8375**, 83750C.
- [8] STEINVALL O. A review of laser range profiling for target recognition[J]. *Encyclopedia of Modern Optics*, 2018, **4**: 474-495.
- [9] STEINVALL O, MICHAEL T, FOLKE B, et al. Laser profiling for airborne target classification[J]. SPIE, 2018, **10636**: 1063602.
- [10] STEINVALL O, TULLDAHL M, et al. Laser range profiling for small target recognition[J]. *Optical Engineering*, 2016, **56**(3): 031206.
- [11] YANG Yan-ling, LI Yan-chao, GAO Long, et al. Numerical simulation of balanced heterodyne detection for coherent lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(10):1918-1922.  
杨彦玲, 李彦超, 高龙, 等. 相干激光雷达平衡外差探测方法的数值仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(10):1918-1922.
- [12] YU Xiao, HONG Guang-lie, LING Yuan, et al. Homodyne detection of distance and velocity by chirped-amplitude modulated lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6):0606002.  
于啸, 洪光烈, 凌元, 等. 啁啾调幅激光雷达对距离和速度的零差探测[J]. 光学学报, 2011, **31**(6):0606002.
- [13] LI Yan-hui, WU Zhen-sen, GONG Yan-jun, et al. Laser one-dimensional range profile[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(10):6988-6993.  
李艳辉, 吴振森, 宫彦军, 等. 目标激光脉冲一维距离成像研究[J]. 物理学报, 2010, **59**(10):6988-6993.
- [14] LI Yan-hui, WU Zhen-sen, GONG Yan-jun. Ultra-short pulse laser one-dimensional range profile of a cone[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, **637**(1): S149-S152.
- [15] LI Yan-hui, WU Zhen-sen, GONG Yan-jun, et al. Analytical model of a laser range profile from rough convex quadric bodies of revolution[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, **29**(7): 1383-1388.
- [16] LI Xiang. Research of optical heterodyne detection in inverse synthetic aperture lidar[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.  
李祥. 逆合成孔径激光雷达光外差探测关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- [17] ZHANG Yan, CHEN Yong, ZHOU Ding-fu, et al. Research on the key technology of synthetic aperture laser radar with high resolution[J]. *Laser Journal*, 2014, **35**(11):1-3.  
张艳, 陈涌, 周鼎富, 等. 高分辨率合成孔径激光雷达关键技术分析[J]. 激光杂志, 2014, **35**(11):1-3.
- [18] CHEN Jian-biao, SUN Hua-yan, ZHAO Yan-zhong, et al. Simulation and analysis on laser range profiles for complex targets[C]. SPIE, 2018, **10789**: 1078920.
- [19] LIN Fang, WANG Jin-cheng, LEI Wu-hu, et al. Detection of barycenter of planar target based on laser reflective tomography[J]. *Optics Communications*, 2017, **402**:540-544.
- [20] STEINVALL O. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(24): 4381-4391.
- [21] LÜ Ya-kun, WU Yan-hong, XUE Jun-shi, et al. Inverse synthetic aperture laser imaging algorithm for measuring target[J]. *Acta Photonics Sinica*, 2018, **47**(11):1128003.  
吕亚坤, 吴彦鸿, 薛俊诗, 等. 机动目标逆合成孔径激光雷达成像算法[J]. 光子学报, 2018, **47**(11):1128003.