

空中目标激光雷达一维距离像仿真及实验研究

陈剑彪¹, 孙华燕², 赵延伸²

¹装备学院研究生院, 北京 101416;

²装备学院光电装备系, 北京 101416

摘要 介绍了空中目标激光雷达一维距离像的回波模型,分析了影响探测系统性能的因素,仿真分析了大气衰减、接收系统噪声和激光散斑效应对目标成像分辨率的影响。用原理性实验验证了分析结果,得出了结论。基于此给出了建议。

关键词 遥感; 激光雷达; 一维距离像; 仿真模型

中图分类号 TN24 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.072802

Simulation and Experimental Research on One-Dimensional Lidar Range Profile of Airborne Target

Chen Jianbiao¹, Sun Huayan², Zhao Yanzhong²

¹ Department of Graduate Management, Equipment Academy, Beijing 101416, China;

² Department of Optical and Electronic Equipment, Equipment Academy, Beijing 101416, China

Abstract An echo model of one-dimensional lidar range profile of airborne targets is introduced. The factors which affect the property of the detecting system are analyzed. The influences of atmospheric attenuation, receiving system noise and laser speckle effect on the resolution of target images are analyzed and simulated. The analysis results are verified by the principle experiment and the conclusion is obtained. Based on this, the suggestions are presented.

Key words remote sensing; lidar; one-dimensional range profile; simulation model

OCIS codes 280.3400; 200.4560; 100.3008

1 引言

随着激光技术和光电探测技术的发展,目标一维距离像可通过激光探测获得。光波频率远高于微波频率,因此激光雷达获得图像的分辨率比微波雷达的高,得到的目标特征信息更多。段乙好等^[1]采用组合模型法对激光雷达的回波波形进行分解,进而获取目标的特征信息。目前,关于目标一维距离像的识别研究主要集中在数据预处理、特征提取,及识别方法等方面^[2-4]。但它们多数都假定已获取目标一维距离像,未具体研究获取一维距离像的方法。文献[5-8]利用三维建模方法获取海面目标的一维距离像,建立了丰富的目标模型,设计了功能较完整的仿真软件,仿真结果与实验结果符合较好。

本文以目标一维距离像为研究对象,介绍了激光雷达一维距离像的探测原理,开展了空中目标三维建模及其一维距离像的成像仿真研究,并进行了原理性验证实验,为下一步利用目标激光雷达一维距离像进行目标识别提供理论参考。

收稿日期: 2016-12-23; **收到修改稿日期:** 2017-03-07

作者简介: 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

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、数字图像处理等方面的研究。

E-mail: shy221528@vip.sina.com

2 激光雷达一维距离像模型

高分辨率一维距离像是目标散射点回波在探测视线方向上相干叠加产生的,反映了目标在电磁波辐照区域各散射点的几何关系,通过特征提取可获得目标的结构特征信息。由电磁散射理论可知,在高频区,目标局部位置电磁散射强度的矢量和可以描述目标的电磁散射特性。 d 个散射点描述的目标回波信号^[9]为

$$y(f, \theta) = \sum_{k=1}^d A_k(f, \theta) \exp \left[-j \frac{4\pi f r_k(\theta)}{c} \right] + u, \quad (1)$$

式中 f 为电磁波频率, θ 为目标的姿态角, k 为散射中心编号, d 为目标散射中心总数, A_k 为散射中心激光回波的幅度, r_k 为探测系统与散射点之间的距离, c 为光速, u 为噪声。当满足远场条件时, 散射点在探测视线方向的纵向距离分布可用 $r_k(\theta)$ 近似描述。

激光雷达一维距离像成像目标大多表面粗糙,用散射点不足以细致地表征其散射特征^[10]。需考虑探测激光的时、空域能量分布,结合目标本身的散射特征来建立目标激光雷达一维距离像的回波模型^[11]。对于单站激光雷达目标探测系统,可忽略相位因素及多普勒效应,只考虑大气衰减的影响。

对于空间中的某一点,受到强度为 $I(x, y, z, t)$ 的高斯激光脉冲照射:

$$I(x, y, z, t) = I_0 g(x, y) s(z), \quad (2)$$

$$s(z) = s \left[t - \frac{2R(x, y)}{c} \right], \quad (3)$$

式中 I_0 为发射激光振幅, t 为激光传播时间, $R(x, y)$ 为目标某一点距离激光源的距离, $g(x, y)$ 和 $s(z)$ 为激光在空间域和时域的能量分布,均为高斯分布。

假设目标满足远场条件,光探测器接收到的目标反射光光强(轴向)为

$$I_r = \frac{\Omega}{R^2} \int I(x, y, z, t) \rho_b(x, y, z) dx dy, \quad (4)$$

式中 ρ_b 为目标表面双向反射分布函数(BRDF), R 为目标与探测系统间的距离, Ω 为目标受激光照射的表面。

由(2)~(4)式可知,探测器接收到的目标时域回波波形为

$$P_r(t) = \eta_s I_r \frac{A_r}{R^2} T_a^2 = \frac{\Omega}{R^2} \int g(x, y) \rho_b(x, y, z) s \left[t - 2R(x, y)/c \right] dx dy \eta_s A_r T_a^2, \quad (5)$$

式中 η_s 为系统效率, T_a^2 为大气衰减因子, A_r 为探测器有效接收截面面积, I_r 为探测器有效接收光强。距离分辨率为

$$\Delta R = \frac{c \Delta \tau}{2}, \quad (6)$$

式中 $\Delta \tau$ 为发射脉冲的脉宽。

3 影响探测系统性能的因素

激光雷达探测系统的性能受到多方面因素(如激光源的光束质量、平台稳定性、接收系统噪声,及大气传输效应等)的影响。本文只考虑大气传输效应、接受系统噪声、激光散斑效应三个因素的影响。

3.1 大气传输效应

激光雷达系统的实际探测能力与激光大气传输效应有密切联系,大气传输对光束的影响主要包括大气中的物质微粒对光束产生的吸收、散射,以及大气湍流的影响^[12-13]。本文主要考虑大气的吸收和散射引起的衰减效应。大气衰减遵从比尔-朗伯特(Beer-Bonguer)定律:

$$P_\lambda(R) = P_\lambda(0) \exp[-T(\lambda)R], \quad (7)$$

式中 $P_\lambda(0)$ 和 $P_\lambda(R)$ 分别为波长为 λ 的单色光束在出发点和传播距离 R 后的功率。大气衰减因子为

$$T(\lambda) = \exp[-\alpha(\lambda)R] \exp[-\beta(\lambda)R], \quad (8)$$

式中 $\alpha(\lambda)$ 为吸收系数, $\beta(\lambda)$ 为散射系数。

3.2 接收系统噪声

接收系统噪声主要来源于光电探测器、各级放大器以及背景光^[14]。

背景光噪声主要来自目标对环境光的反射以及大气散射的太阳光, 平方根噪声电流为

$$I_{\text{BN}} = (2qi_{\text{B}}\Delta f_{\text{n}})^{1/2}, \quad (9)$$

式中 q 为电子电荷, i_{B} 为背景电流之和, Δf_{n} 为探测器带宽。

探测器噪声主要由热噪声、散粒噪声、产生-复合噪声, 及 $1/f$ (f 为接收信号的中心频率) 调制噪声组成, 平方根噪声电流为

$$I_{\text{DN}} = (2qi_{\text{D}}\Delta f_{\text{n}})^{1/2}, \quad (10)$$

式中 i_{D} 为单位增益下探测器的暗电流。

前置放大器噪声主要由运算放大器中阻抗负载的电子热抖动以及热噪声组成, 平方根噪声电流为

$$I_{\text{PN}} = I_{\text{N}} (\Delta f_{\text{s}})^{1/2}, \quad (11)$$

式中 I_{N} 为输入噪声等效电流, Δf_{s} 为接收器信号带宽。

探测系统信噪比(SNR)为光电探测器接收到的激光信号功率与噪声功率的比值, 表示为

$$\chi_{\text{SNR}} = \frac{\overline{I_{\text{s}}^2}}{\overline{I_{\text{BN}}^2} + \overline{I_{\text{DN}}^2} + \overline{I_{\text{PN}}^2}}, \quad (12)$$

式中 $\overline{I_{\text{s}}^2}$ 为均方信号电流, $\overline{I_{\text{BN}}^2}$ 为均方背景噪声电流, $\overline{I_{\text{DN}}^2}$ 为均方探测器噪声电流, $\overline{I_{\text{PN}}^2}$ 为均方前置放大器噪声电流。

3.3 激光散斑效应

激光散斑场是相干激光束被随机散射介质调制后, 在三维空间中形成的包含许多呈随机分布的亮暗斑点的光场。激光散斑噪声会严重影响成像的细节信息, 降低成像的清晰度和分辨率。

由于散斑场是一个随机场, 常用统计学的方法来描述。散斑强度的概率密度函数^[15]为

$$P(I) = \frac{1}{\bar{I}} \exp(-I/\bar{I}), \quad \bar{I} = \int_S I \text{d}S, \quad (13)$$

式中 I 为空间某一点受到的激光辐照的强度, S 为受辐照目标的面积。由(13)式可知, 散斑场的光强分布为负指数函数, 散斑图像中暗斑多于亮斑。

闻东海等^[16]研究了抑制激光散斑噪声的方法。由于本文不考虑横向分辨率, 散斑噪声对非成像探测的影响要弱于对成像探测的影响, 主要表现为轴向光强的随机起伏。散斑效应与表面材料的大小、粗糙度、激光波长、入射角等有关, 利用基尔霍夫衍射积分公式, 可以计算出自由空间中的散斑效应。利用滤波器理论, 可以模拟特定粗糙表面的散斑效应。

图 1, 2 分别为表面粗糙度和散斑场分布的仿真结果。仿真参数如下: 材料表面的相干长度 $x = 0.05 \text{ mm}$, $y = 0.05 \text{ mm}$, 表面粗糙度的均方根 σ 分别为 $0.1 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$, 激光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$, 照明面积为 0.01 m^2 。当 x, y 方向的相干长度相等时, 表面粗糙度分布呈各向同性。比较图 1, 2 可知, 当 σ 取较大值

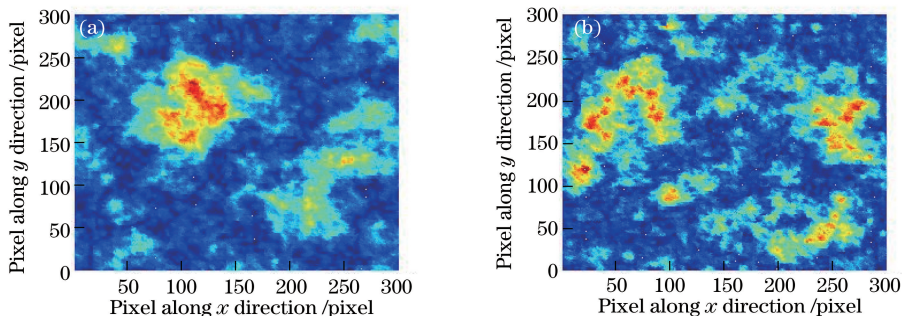


图 1 材料表面粗糙度分布仿真结果。(a) $\sigma = 0.1 \mu\text{m}$; (b) $\sigma = 1 \mu\text{m}$

Fig. 1 Simulation results of roughness distribution on material surface. (a) $\sigma = 0.1 \mu\text{m}$; (b) $\sigma = 1 \mu\text{m}$

时,表面粗糙度的分布呈现更多的起伏,同时激光散斑分布更加分散,图像对比度较低;当 σ 取较小值时,激光散斑分布比较集中,图像对比度较高。

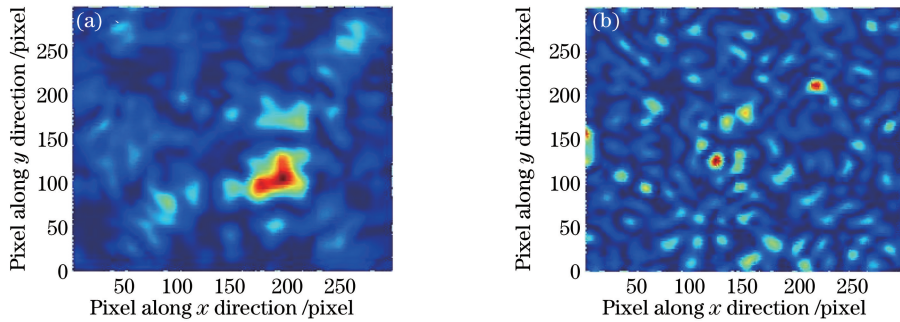


图2 激光散斑分布仿真结果。(a) $\sigma=0.1 \mu\text{m}$; (b) $\sigma=1 \mu\text{m}$

Fig. 2 Simulation results of laser speckle distribution. (a) $\sigma=0.1 \mu\text{m}$; (b) $\sigma=1 \mu\text{m}$

4 目标一维距离像的仿真设计

4.1 仿真流程

对空中目标进行激光雷达一维距离像成像仿真的具体流程为:1) 使用软件 3DS MAX 初步建立目标的三维模型,导出构成模型点的空间坐标、面元的法向量,生成目标的三维位置和面元信息矩阵;2) 利用 OpenGL 软件编程,建立适当的坐标系,利用已得到的目标模型的空间位置信息,判断每个面元在探测视线方向上的可见性,对目标表面进行消隐,得到逼真的三维模型效果,将该模型编成软件界面,可实时导出各个姿态下目标的每个面元到探测器的距离和面元法向量矩阵;3) 结合目标表面 BRDF^[17],将所有参数代入(5)式可得到目标一维距离像。流程图如图3所示。

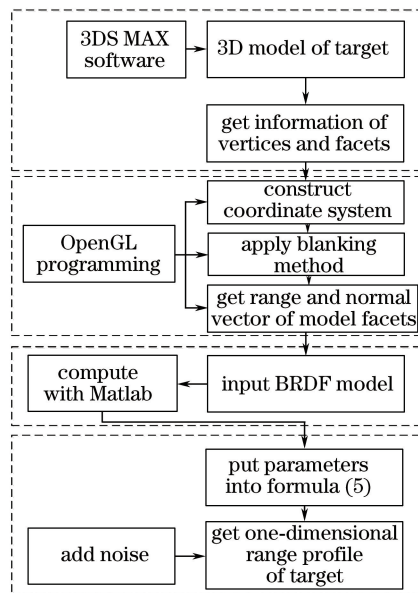


图3 一维距离像仿真流程

Fig. 3 Flow chart of simulation of one-dimensional range profile

4.2 目标三维模型

利用 3DS MAX 建立目标三维模型,综合考虑计算复杂度和所需的模型精度,对模型进行合理的网格划分。图4(a)、(b)分别为目标三维模型的点、面模型。

4.3 坐标系设置

建立合适的三维模型后,再通过 OpenGL 编程对目标模型进行操作。OpenGL 使用的是右手笛卡尔坐

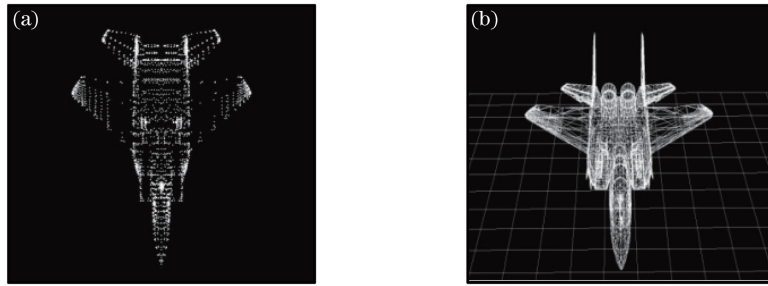


图4 目标三维模型。(a)点模型;(b)面模型

Fig. 4 Three-dimensional model of target. (a) Vertex model; (b) facet model

标系统,如图5所示,其中原点位于软件屏幕中心。为准确描述目标的姿态信息及激光的入射方向,在目标上建立了观测坐标系 $O-XYZ$ 和体轴坐标系 $o-xyz$ ^[18],目标的3个姿态角 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 的取值范围均为 $0\sim 360^\circ$ 。在初始状态下,体轴坐标系 $o-xyz$ 与观测坐标系 $O-XYZ$ 重合,原点均为目标的几何中心, z 轴指向探测系统, y 轴为目标的对称轴,如图5(a)所示。依次将体轴坐标系绕 X 轴顺时针转动 θ_1 、绕 Y 轴顺时针转动 θ_2 、绕 Z 轴顺时针转动 θ_3 后,得到当前观测时刻的体轴坐标系,如图5(b)所示。将目标垂直于屏幕方向进行平移,可得到不同距离下的目标模型。

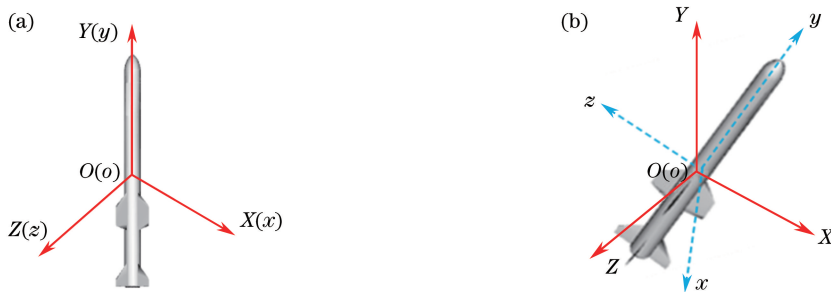


图5 三维坐标系设置。(a)观测坐标系;(b)体轴坐标系

Fig. 5 Three-dimensional coordinate system. (a) Observation coordinate system; (b) body-axis coordinate system

4.4 模型参数提取

通过 OpenGL 进行消隐来模拟真实情况下的三维目标,设计了可快速提取目标模型所有姿态下表面信息的仿真软件。将目标模型在某一距离上的每个点的距离信息和表面余弦信息导出并用二维灰度图像表示,结合 BRDF 模型,依据(5)式,将所有参数导入 Matlab 软件,进行运算后得到目标一维距离像。

5 仿真实例

设定目标为某型战斗机模型,发射激光脉冲脉宽为 1 ns (距离分辨率为 0.15 m),设定尺寸缩放因子 V 对目标模型的尺寸进行缩放,用于比较不同尺寸目标的一维距离像,当 $V=1$ 时,目标自身散射点恰好能够被距离分辨率为 0.15 m 的探测系统分辨。图6(a)为仿真得到的目标在某姿态下的散射特征沿探测视线方向的投影分布,可以反映目标的几何特征、散射点分布特征,从中可以提取目标的特征信息,且随着目标姿态的改变其特征会相应变化。

将目标模型散射特征在探测视线方向的投影分布与高斯激光脉冲波形进行卷积,可得到某姿态下目标模型的一维距离像,如图6(b)所示。无噪声干扰时,目标一维距离像是其散射特征经高斯波形平滑后的结果,可以十分精确地反映目标本身的散射特征。图6(c)为考虑大气衰减、接收系统噪声以及散斑效应影响的情况下,仿真得到的目标在同一姿态下的一维距离像。可以看到,目标模型的一维距离像幅度整体减小,这主要是大气衰减引起的;原本一些较弱的散射点被噪声和散斑效应淹没,比较强的散射点的特征得到保留,但也有一定畸变,这说明噪声等因素严重干扰了目标一维距离像的成像。

当尺寸缩放因子 $V=2$,即目标尺寸缩小为之前的 $1/2$,此时得到的目标一维距离像如图6(d)所示。由

图可知,当目标尺寸缩小时,其一维距离像被高斯脉冲波形进一步平滑,一些投影后距离较近的散射点相互重叠不能被分辨,且峰尖展宽,导致分辨率降低。因此,目标尺寸与探测系统的距离分辨率共同决定了目标一维距离像的成像精确度。同样考虑噪声及衰减因素的影响,目标在同一姿态下的一维距离像如图 6(e)所示,对于尺寸更小的目标,噪声和衰减的干扰效果更明显。

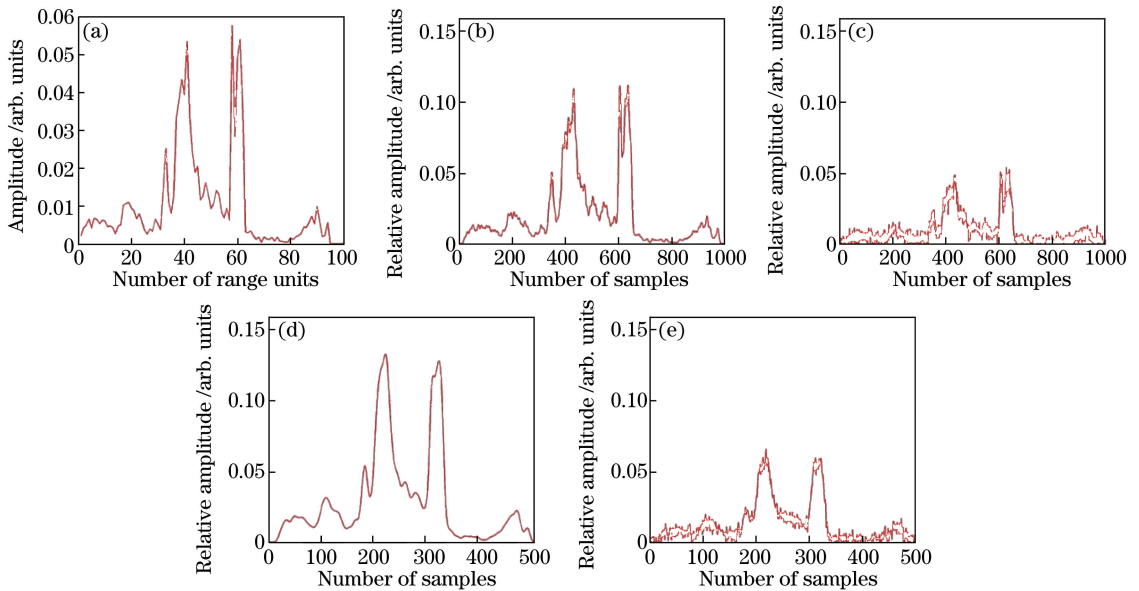


图 6 目标一维距离像的仿真结果。(a) 散射特征;(b) 与高斯脉冲卷积结果($V=1$);
(c) 考虑干扰因素($V=1$);(d) 与高斯脉冲卷积结果($V=2$);(e) 考虑干扰因素($V=2$)

Fig. 6 Simulation results of target one-dimensional range profile of target. (a) Scattering characteristics; (b) convolved result with Gaussian pulse ($V=1$); (c) when distraction factors considered ($V=1$); (d) convolved result with Gaussian pulse ($V=2$); (e) when distraction factors considered ($V=2$)

6 实验验证

6.1 实验目的

为了得到实际情况下目标的一维距离像,研究其特征,并验证本文通过仿真及分析所得出的结论,设计了原理性验证实验。

6.2 实验方案

实验装置示意图如图 7 所示。测试目标为离激光光源距离不同但被照射面积相同的三个角反射器 A、B、C,受激光照射的面积分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 ,A 与 B、B 与 C 之间的距离分别为 d_1 、 d_2 ,将三者等效为目标的三个独立散射点,通过调节 d_1 和 d_2 来模拟长度不同的目标,通过调节 S_1 、 S_2 、 S_3 来模拟不同回波强度的目标散射点。

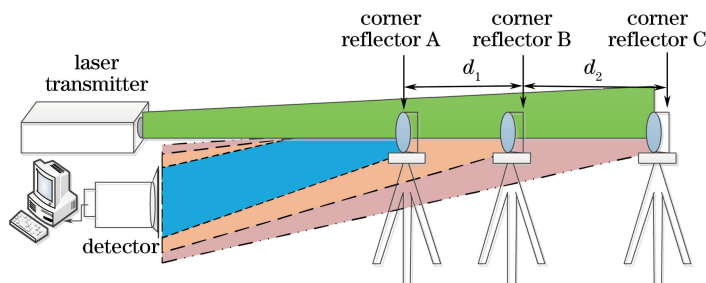


图 7 实验装置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of experimental setup

6.3 结果及分析

表1为三组不同 d_1 、 d_2 组合参数。本实验选用的激光发射脉冲脉宽为40 ns,由(6)式可知,理论距离分辨率 $\Delta R=6$ m,由于实验距离短,实际距离分辨率近似为理论值。图8(a)、(b)、(c)分别为实际采集得到的角反射器的回波波形,分别对应表1中Set 1、Set 2、Set 3。

表1 实际采样参数

Table 1 Actual sampling parameters

Parameter	Set 1	Set 2	Set 3
d_1 /m	37.9	8.6	4
d_2 /m	37.4	65.9	69.1

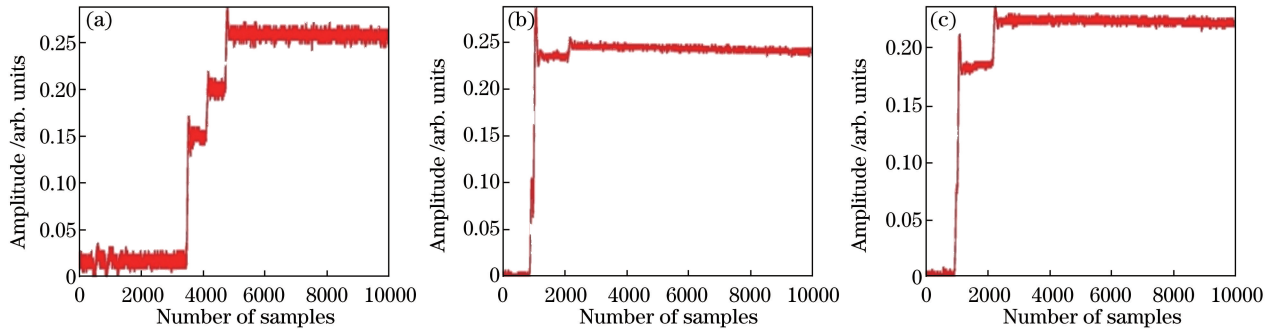


图8 目标回波波形。(a) $d_1=37.9$ m, $d_2=37.4$ m; (b) $d_1=8.6$ m, $d_2=65.9$ m; (c) $d_1=4$ m, $d_2=69.1$ m

Fig. 8 Echo waveform of target. (a) $d_1=37.9$ m, $d_2=37.4$ m; (b) $d_1=8.6$ m, $d_2=65.9$ m; (c) $d_1=4$ m, $d_2=69.1$ m

对于第一组回波, d_1 和 d_2 远大于系统的距离分辨率 ΔR , 因此可以轻易分辨出三个角反射器 A、B、C 的回波(分别对应三个峰尖), 如 8(a) 所示; 对于第二组回波, $d_1=8.6$ m, 接近系统距离分辨率, 因而恰好能分辨出角反射器 A、B 的回波, 如图 8(b) 所示; 继续减小 d_1 , 同时减小 S_2 , 得到的回波如图 8(c) 所示, 此时, d_1 小于 ΔR , A、B 两者的回波重叠不能辨识, 而由于减小了 S_2 , C 的回波强度更为显著。从图 8 中看到, 每个回波波形都拖着长长的“尾巴”, 这主要是探测器下降时间较长造成的, 即滞后效应, 这将使接收到的脉冲信号的下降沿延迟几微秒, 导致目标回波产生畸变和失真, 影响系统的分辨性能。

由以上实验结果可以得到如下结论:

- 1) A、B、C 三者回波是否可以分辨受到 d_1 和 d_2 与探测系统距离分辨率 ΔR 的影响;
- 2) 实际条件下受高斯脉冲的平滑效应以及探测器滞后效应的影响, A、B、C 三者的回波是否可以被分辨与散射点的回波强度有关;
- 3) 为保证探测系统的距离分辨率, 应选用上升时间和下降时间较快的高速光电探测器。

7 结 论

开展了目标激光雷达一维距离像的仿真研究及分析, 分析了影响探测系统性能的因素, 进行了目标一维距离像的实验研究, 仿真结果与实验结果相吻合。经实验验证, 在实际成像过程中, 目标激光雷达一维距离像的分辨效果与散射点间距是否大于探测系统距离分辨率有关, 也受各散射点的回波强度的影响。在探测尺寸较小的目标时, 应选用高速光电探测器以保证探测系统的距离分辨率足够小。

参 考 文 献

- [1] Duan Yihao, Zhang Aiwu, Liu Zhao, *et al.* A combination method of wavelet transform and generalized Gaussian model for airborne laser scanning waveform decomposition[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 122802.
段乙好, 张爱武, 刘 诏, 等. 一种用于机载激光雷达波形分解的小波变换与广义高斯模型组合法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 122802.
- [2] Morris H C, Monica M. Wavelet feature extraction of HRR radar profiles using generalized Gaussian distributions for

- automatic target recognition[C]. SPIE, 2005, 5809: 165-175.
- [3] Fu Yaowen. Research on fusion recognition of radar target[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.
付耀文. 雷达目标融合识别研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003.
- [4] Zhao Feng, Zhang Junying, Liu Jing. Radar target recognition based on kernel optimal transformation and cluster centers[J]. Control and Decision, 2008, 23(7): 735-740.
赵峰, 张军英, 刘敬. 基于核最优变换与聚类中心的雷达目标识别[J]. 控制与决策, 2008, 23(7): 735-740.
- [5] van den Heuvel J C, Schoemaker R M, Schleijsen R M A. Identification of air and sea surface targets with a laser range profiler[C]. SPIE, 2009, 7323: 73230Y.
- [6] van den Heuvel J C, van Eijk A M J, Bekman H H P T. Laser applications in the littoral: Search lidar and ship identification[C]. SPIE, 2008, 7090: 709004.
- [7] Henriksson M, Olofsson T, Grönwall C, *et al.* Optical reflectance tomography using TCSPC laser radar[C]. SPIE, 2012, 8542: 85420E.
- [8] Steinvall O K, Chevalier T, Grönwall T. Errata: Simulation and modeling of laser range profiling and imaging of small surface vessels[J]. Optical Engineering, 2014, 53(2): 029801.
- [9] Zhou Wanxing. BMD radar target recognition technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 27-29.
周万幸. 弹道导弹雷达目标识别技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 27-29.
- [10] Li Yanhui, Wu Zhensen, Gong Yanjun, *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.
- [11] Steinvall O K, Carlsson T. Three-dimensional laser radar modelling[C]. SPIE, 2001, 4377: 23-34.
- [12] Rao Ruizhong. Modern atmospheric optics and applications[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2006, 1(1): 2-13.
饶瑞中. 现代大气光学及其应用[J]. 大气与环境光学学报, 2006, 1(1): 2-13.
- [13] Cynthia Y Y, Aarons J M, Fredrick T. Phase fluctuations in moderate to strong turbulence[C]. SPIE, 2003, 4976: 141-148.
- [14] Guo Sai, Ding Quanxin, Yang Yi. Noise suppression technologies used for avalanche photodiode[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(3): 69-73.
郭赛, 丁全心, 羊毅. 雪崩光电探测器的噪声抑制技术研究[J]. 光电与控制, 2012, 19(3): 69-73.
- [15] Chen Suting, Hu Haifeng, Zhang Chuang. Surface roughness modeling based on laser speckle imaging[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(23): 234203.
陈苏婷, 胡海锋, 张闯. 基于激光散斑成像的零件表面粗糙度建模[J]. 物理学报, 2015, 64(23): 234203.
- [16] Wen Donghai, Jiang Yuesong, Hua Houqiang, *et al.* Algorithm for speckle reduction of laser radar polarization active image[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1130-1134.
闻东海, 江月松, 华厚强, 等. 激光雷达主动偏振图像散斑抑制算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1130-1134.
- [17] Zhang Hao, Li Jianzhou, Chen Xu. Research of integration calculation of complex target's laser radar cross section[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 021404.
张昊, 李建周, 陈旭. 复杂目标激光雷达散射截面一体化计算研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 021404.
- [18] Sun He, Yao Yuan, Xu Zhengping, *et al.* Simulation modeling of scanning lidar echo signal based on coordinates transformation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 011004.
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): 011004.