

# 机载多脉冲激光雷达目标信号模拟器的研究

马鹏阁<sup>1,2,3</sup> 齐林<sup>1</sup> 羊毅<sup>2</sup> 金秋春<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 郑州大学激光与光电信息技术河南省重点实验室, 河南 郑州 450001  
<sup>2</sup> 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009  
<sup>3</sup> 郑州航空工业管理学院, 河南 郑州 450015

**摘要** 研究多脉冲激光雷达目标信号模拟器,用以评估回波数字信号处理算法及其实现平台的性能。结合信号能量与波形关系指出由激光雷达方程建立回波信号波形模型是不充分的。对空中目标回波脉冲展宽进行建模及数值仿真,得到不同倾角、目标距离及目标尺寸下的波形展宽时间数据。根据展宽前后能量保持不变的性质,利用高斯脉冲函数特征参数求解建立回波波形数学模型。基于目标距离误差及目标回波噪声统计特性建立回波仿真模型,提出了依信噪比发生回波观测信号的方法。对比两种模拟器的信噪比误差、最小模拟信噪比、连续工作时间等性能指标,总结了新型模拟器的优势。

**关键词** 激光技术;激光雷达;模拟器;回波脉冲展宽;回波波形仿真模型

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0128001

## Study on Airborne Multi-Pulse Ladar Target Signal Simulator

Ma Pengge<sup>1,2,3</sup> Qi Lin<sup>1</sup> Yang Yi<sup>2</sup> Jin Qiuchun<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Henan Key Laboratory of Laser and Electro-Optic Information Technology of Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China  
<sup>2</sup> Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang, Henan 471009, China  
<sup>3</sup> Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou, Henan 450015, China

**Abstract** Airborne multi-pulse ladar target signal simulator is studied to evaluate the performance of echo signal digital processing algorithms and hardware platform. It is pointed out that only using radar equation to establish the echo waveform model is inadequate for the relationship between waveform and energy. Air target echo pulse broadening is analyzed, and the waveform time broadening data are acquired under different angles, target distances and target sizes. Because the energy remains same before and after broadening, the echo waveform mathematic model is established through solving the characteristic parameters of Gaussian pulse function. Then the simulation model based on target distance error and echo pulse waveform error statistic characteristics is given, and the method to generate echo signal according to the signal-to-noise ratio (SNR) is proposed based on the standardization of echo noise root mean square (RMS) value. The performances about echo SNR error, minimum output SNR, and continuous working time of two laser simulators are compared.

**Key words** laser technique; laser radar; simulator; echo pulse broadening; echo waveform model

**OCIS codes** 280.3400; 280.5600; 120.0280

## 1 引言

机载脉冲激光雷达用于对远程目标的精确瞄

准。降低回波信号处理系统的最小可检测信噪比 (SNR)是提高作用距离的有效途径<sup>[1~3]</sup>。模拟激光

**收稿日期**: 2011-07-11; **收到修改稿日期**: 2011-09-29

**基金项目**: 国家自然科学基金(61071211、70971120)、光电控制技术国防科技重点实验室和航空科学基金联合资助项目(20085155008、20105155003)资助课题。

**作者简介**: 马鹏阁(1976—),男,博士研究生,副教授,主要从事激光雷达目标探测及信号处理技术等方面的研究。

E-mail: mapenge@163.com

**导师简介**: 齐林(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事光电信息与信号处理技术等方面的研究。

E-mail: ielqi@zzu.edu.cn

测距机采用比较器检测目标回波,其最小可检测信噪比约为 6.7,探测距离可达 20~30 km。多脉冲激光雷达采用数字信号处理器(DSP)对低信噪比下微弱目标回波进行积累<sup>[4]</sup>。目前,三脉冲激光雷达回波数字处理器的最小可检测信噪比低于 3<sup>[5]</sup>。随着数字信号处理器性能的发展,应用复杂信号处理算法可进一步降低可检测信噪比<sup>[6]</sup>。验证评估多脉冲回波信号处理算法及其硬件性能需要一个模拟真实目标信号的仿真平台。

目前,由激光器、准直光学系统、衰减片、同步及延迟电路以及仿真软件等组成的激光目标模拟器,可以模拟产生脉宽、辐射功率随气象条件、能见度及目标反射特性变化的激光脉冲<sup>[7]</sup>。在光路出口直接安装光电探测器,可输出模拟回波电信号。该模拟器基本上是脉冲激光雷达的一个全实物仿真模型,可用于设定光学仿真条件下回波处理器性能的实验室评估。然而由于其主波发生电路的限制,通常只作为单脉冲、静态目标模拟源使用。多脉冲数字激光雷达需要多脉冲、动态目标信号模拟源。其仿真模型应针对目标回波信号的波形加以建立。模拟回波应依据信噪比发生,便于评估低信噪比下回波处理器的检测性能。对各类型噪声、干扰及故障状况能够分别或综合模拟,以验证回波处理算法的稳健性与可靠性。来自外场采集的回波数据可进行回放,用以分析、改进回波处理算法。

针对数字激光雷达模拟器的需求,采用仿真软件与任意波形发生器构建半实物仿真系统是一种理想的选择。本文结合激光雷达方程与目标回波脉冲展宽分析建立了目标回波信号波形的数学模型。基于目标回波脉冲波形、目标距离的随机误差分布,利用对随机过程的抽取得到目标信号观测值,建立回波信号的仿真模型。最后,提出依据任意信噪比发生目标观测信号的实现方法。这些模型与方法为新型多脉冲激光目标信号模拟器的研制提供了理论基础。

## 2 目标信号数学模型

### 2.1 目标信号描述

脉冲激光雷达采取非相干目标探测方式。目标回波脉冲指示了激光路程的结束时刻  $t_1$ 。主波信号来自对发射激光的取样,经光电转换得到宽度 1  $\mu\text{s}$ 、幅度 +5 V 的脉冲。主波指示了激光路程的起始时刻  $t_0$ 。处理器从回波噪声中检出目标脉冲,结合光速  $c$ ,即可计算出目标距离

$$d = \frac{1}{2}c(t_1 - t_0). \quad (1)$$

对于三脉冲激光雷达,  $T$  为脉冲重复周期,  $\tau$  为主波时间间隔,  $N$  为帧数。主波是离散脉冲信号,可描述为

$$z(t) = \sum_{n=0}^N [\delta(t + nT) + \delta(t - \tau + nT) + \delta(t - 2\tau + nT)]. \quad (2)$$

回波信号  $r(t)$  由目标回波脉冲  $s(t)$  及噪声  $n(t)$  构成,每帧回波包括 3 个脉冲回波  $s_1(t), s_2(t), s_3(t)$ , 则回波为

$$\begin{cases} r(t) = s_1(t) + n_1(t), & 0 \leq t < \tau \\ r(t) = s_2(t) + n_2(t), & \tau \leq t < 2\tau \\ r(t) = s_3(t) + n_3(t), & 2\tau \leq t < 3\tau \\ r(t) = 0, & 3\tau \leq t < T \end{cases}. \quad (3)$$

### 2.2 激光雷达方程与回波波形的关系

根据大量子数描述物理系统可按经典理论处理的原理,采用直接探测的激光雷达系统可按照微波雷达的统计方法进行描述<sup>[8,9]</sup>。远程目标视为点目标,脉冲激光雷达方程为

$$P_R = \frac{P_T}{R^2 \theta_r^2} \frac{S_0 \rho}{\pi R^2} D_r^2 \eta_{\text{Atm}}^2 \eta_{\text{sys}}, \quad (4)$$

式中  $P_R$  为接收光功率,  $P_T$  为发射光功率,  $R$  为目标距离,  $\theta_r$  为激光束散角,  $\rho$  为点目标平均反射系数,  $D_r$  为接收孔径,  $\eta_{\text{Atm}}$  为单程大气传输系数,  $S_0$  为目标反射面积,  $\eta_{\text{sys}}$  为光学系统透射率。方程描述了到达光电探测器的回波功率与激光雷达发射功率、光束散角、光学系统透射率和接收视场等性能参数,传输介质的衰减以及目标有效反射截面、反射率等目标特性之间的关系<sup>[10]</sup>。

设回波脉冲宽度为  $\Delta t$ ,  $\Delta t$  内回波功率视为不变,回波脉冲能量为

$$E_R = \int_0^{\Delta t} P_R dt = P_R \Delta t, \quad (5)$$

由信号波形与能量的关系,有

$$\int_0^{\Delta t} s^2(t) dt = E_R = P_R \Delta t. \quad (6)$$

可以看出,能量是信号波形对时间的积分,当波形发生变化时探测能量仍然可保持不变。雷达方程给出了探测能量,却不能直接描述回波的波形。因此,建立回波信号波形的模型,需要分析回波波形的影响因素。

### 2.3 空中目标回波脉冲展宽分析与数值仿真

波形是幅度-时间的函数。机载激光雷达有较

大的目标搜索及跟踪视场,目标表面与载机光轴有一定的夹角,使得回波脉冲宽度相对于发射脉冲明显地被展宽<sup>[11]</sup>,回波的峰值降低。这导致回波脉冲波形发生变化,信噪比降低。建立空中目标回波脉冲展宽模型,通过数值仿真可获得回波脉冲波形的时间宽度数据。

如图 1 所示,载机位于  $O$  点,空中目标为  $AB$  ( $BT = l_1, TA = l_2, l_1 = l_2 = L$ )。载机光轴与目标交点为  $T$ ,激光束散角为  $\psi$ ,  $OT$  为目标距离  $R$ ,目标平面与光轴夹角为  $\alpha$ ,  $CD$  为光斑直径  $D$ ,光轴与  $OB$  夹角为  $\phi_1$ 、与  $OA$  夹角为  $\phi_2$ 。目标反射尺寸设为  $L$ 。

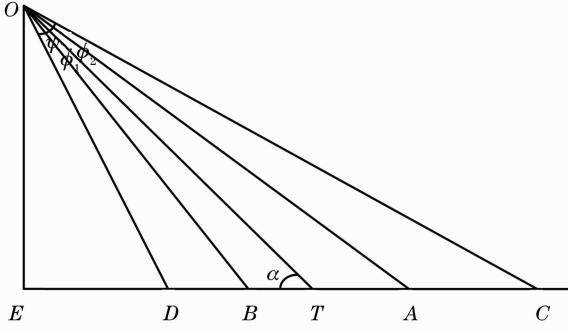


图 1 远程空中目标激光光斑示意图

Fig. 1 Schematic diagram of air target in laser spot

由  $D = 2R \tan(\psi/2)$ , 设  $\psi = 1$  mrad, 则  $D = R/1000$ 。对于尺寸约 20 m 的战机,  $R \geq 20$  km 时, 光斑大于目标,  $L = l_1 + l_2$ ;  $R < 20$  km 时,  $L = D$ 。

设回波脉冲波形上升段的时间展宽为  $\Delta t_1$ , 下降段展宽为  $\Delta t_2$ , 有

$$\Delta t_1 = 2(OT - OB)/c = \frac{2R}{c} \left[ 1 - \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \phi_1)} \right], \quad (7)$$

$$\begin{cases} OB \sin \phi_1 = BT \sin \alpha \\ \frac{R \sin \alpha}{\sin(\alpha + \phi_1)} \sin \phi_1 = 0.5L \sin \alpha, \\ \phi_1 = \arctan\left(\frac{\sin \alpha}{2R/L - \cos \alpha}\right) \end{cases} \quad (8)$$

$$\Delta t_2 = 2(OA - OT)/c = \frac{2R}{c} \left[ \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \phi_2)} - 1 \right], \quad (9)$$

$$\begin{cases} R \sin \phi_2 = 0.5L \sin(\alpha - \phi_2) \\ \phi_2 = \arctan\left(\frac{\sin \alpha}{2R/L + \cos \alpha}\right) \end{cases} \quad (10)$$

可以看出, 展宽时间与目标距离  $R$ 、目标尺寸及倾角  $\alpha$  有关, 数值分析如下:

1) 对于  $l_1 = l_2 = 10$  m, 随着距离从 1 km 增加至 80 km, 不同倾角下  $\Delta t_1 \approx \Delta t_2$ 。

2) 当  $R \geq 20$  km 时, 相同倾角的展宽时间保持不变, 但随倾角  $\alpha$  的增大而减小, 表 1 给出了几种典型角度下的展宽时间。

表 1 不同倾角的脉冲展宽时间

Table 1  $\Delta t_1$  at different  $\alpha$

$\alpha / (^{\circ})$	$\Delta t_1 / \text{ns}$
10	32.827
20	31.322
30	28.866
40	25.532
50	21.422
60	16.660
70	11.395
80	5.783

3) 当  $R < 20$  km 时, 相同倾角的展宽时间随着距离的增加而线性增加。图 2 给出了  $\alpha$  为  $15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}$  时脉冲展宽随距离变化的曲线。

4) 相同倾角下, 目标尺寸增大展宽时间也逐渐增大, 如图 3 所示。

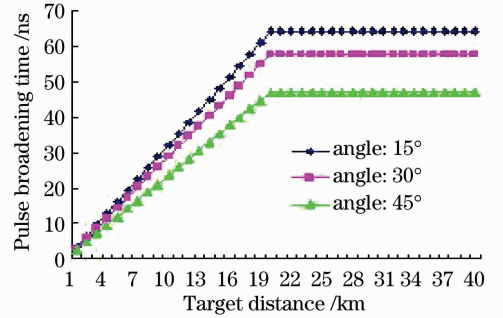


图 2  $\alpha$  为  $15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}$  时脉冲展宽随距离变化的曲线

Fig. 2  $\Delta t_1$  at different target distances with  $\alpha$  being  $15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}$

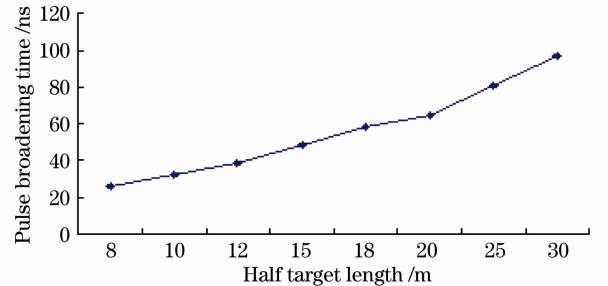


图 3  $\alpha = 15^{\circ}$  时不同目标尺寸的脉冲展宽

Fig. 3  $\Delta t_1$  at different target lengths

## 2.4 目标回波脉冲波形建模

激光雷达发射信号为宽度数十纳秒的多模高斯光脉冲<sup>[12]</sup>, 发射波形  $s(t)$  可建模为

$$s(t) = \sum_{n=1}^N A_n \exp\left[-\frac{(t - \mu_n)^2}{2\sigma_n}\right], \quad (11)$$

式中  $A_n$  和  $\mu_n$  分别为高斯脉冲幅度和时移,  $\sigma_n$  为脉冲宽度特征参数,  $N$  为发射高斯脉冲的个数。对于实际激光器,  $N$  可选为 3,  $\mu_n$  取  $2n\sigma_n/3$ ,  $n=0, 1, 2$ 。

目标回波脉冲波形是发射波形与目标响应函数的线性卷积<sup>[13]</sup>, 因此可认为是展宽后的高斯脉冲信号。描述高斯脉冲波形需确定幅度和脉宽两个特征参数。

如图 4 所示, 高斯函数曲线下 95.5% 的面积位于中心左右  $2\sigma$  的范围内。因此, 将脉冲宽度定义为  $4\sigma$ 。对于反射目标  $l_1=l_2$ , 有  $\Delta t_1=\Delta t_2=2\sigma$ 。

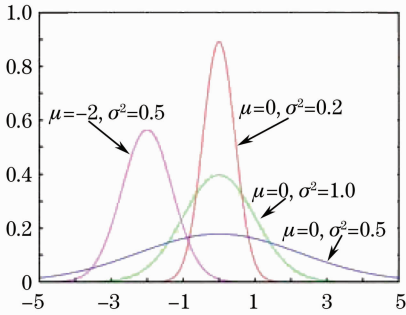


图 4 高斯脉冲信号波形曲线

Fig. 4 Gaussian signal waveform

给定激光发射功率、光束散角、目标反射率、光路及大气传输条件等参数, 由激光雷达方程确定回波功率  $P_R$ 。定义一个功率为  $P_R$  而未经展宽的回波高斯脉冲函数  $s_0(t)$  作为中间变量, 其脉宽与发射信号相同, 为  $\Delta t_0=4\sigma_0$ 。设高斯脉冲时移为 0, 由 (6) 式计算出  $s_0(t)$  的峰值  $A_0$ , 即可确定  $s_0(t)$  表达式。

经目标反射展宽后的回波函数设为  $s_r(t)$ , 由展宽前后光能量保持不变, 有

$$\int_{-2\sigma_0}^{2\sigma_0} s_0^2(t) dt = \int_{-2\sigma_r}^{2\sigma_r} s_r^2(t) dt = P_R \Delta t_0, \quad (12)$$

高斯函数  $s(t) > 0$ , 则

$$\int_{-2\sigma_0}^{2\sigma_0} A_0 \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_0^2}\right) dt = \int_{-2\sigma_r}^{2\sigma_r} A_r \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_r^2}\right) dt. \quad (13)$$

由发射脉冲宽度和展宽时间算出回波脉冲宽度

$$\sigma_r = (2\Delta t_1 + 4\sigma_1)/4. \quad (14)$$

再由能量关系 (12) 式计算回波脉冲幅度  $A_r$ , 从而确定目标回波波形函数  $s_r(t)$ 。

将多个回波波形参数 ( $A_r, \sigma_r, \mu_n$ ) 代入 (11) 式, 便可得到目标回波波形的完整数学模型。回波脉冲展宽对信噪比的影响为

$$\frac{R_{SN_r}}{R_{SN_0}} = \frac{A_r/f_{RMS}}{A_0/f_{RMS}} = \frac{A_r}{A_0} = \frac{\int_{-2\sigma_0}^{2\sigma_0} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_0^2}\right) dt}{\int_{-2\sigma_r}^{2\sigma_r} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_r^2}\right) dt}. \quad (15)$$

式中  $A_r$  为  $s_r(t)$  的峰值,  $A_0$  为  $s_0(t)$  的峰值,  $f_{RMS}$  为回波噪声均方根。

### 3 目标信号仿真模型

#### 3.1 目标回波脉冲波形噪声

光电探测器在某一时刻收到的光子数服从泊松分布, 但当光子数较多时, 由中心极限定理, 探测器有目标信号时的输出电流噪声呈高斯分布:

$$f_s(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(I-I_0)^2}{2\sigma_s^2}\right], \quad (16)$$

因此, 脉冲波形噪声可通过抽取服从  $N[I_0, \sigma_s^2]$  分布的子样  $\hat{n}_s(t)$  得到。结合提出的信号波形数学模型, 可得到目标回波脉冲的仿真波形  $\hat{s}_r(t)$ 。

#### 3.2 目标距离仿真

目标距离观测值是带有一定误差噪声的随机变量。因此, 对目标距离的仿真可对真实距离值加上零均值的高斯白噪声, 以产生距离的观测值。激光雷达测量的目标距离  $\hat{R}$  满足

$$\hat{R} = R + n_r, \quad R = R_0 + \hat{V}t, \quad (17)$$

式中  $R$  是真实距离,  $n_r$  是距离误差,  $R_0$  是设定初始跟踪时刻的距离,  $\hat{V}$  是目标的速度。  $\hat{V}=0$  为静态目标,  $\hat{V}=V_0$  为匀速动态目标,  $\hat{V}=V_0+at$  则为机动目标。  $R$  服从  $N[0, \sigma_r^2]$  分布, 即

$$E[n_r] = 0, E[n_r^2] = \sigma_r^2. \quad (18)$$

标准方差  $\sigma_r$  与回波脉冲宽度  $\tau$ 、信噪比以及光速  $c$  存在如下关系:

$$\sigma_r = \frac{c\tau}{2\sqrt{2}\sqrt{R_{SN}}} = \frac{c\tau}{2\sqrt{2}} \frac{D^2}{D_0^2\sqrt{R_{SN_0}}}, \quad (19)$$

式中  $R_{SN}$  是信噪比,  $R_{SN_0}$  是初始跟踪时刻的信噪比。抽取服从  $N[0, \sigma_r^2]$  分布的子样  $n_r$ , 可以获得模拟目标距离的观测值  $\hat{R}$ 。

要指出的是, 对于空中目标, 特别是迎头对飞目标, 由于速度较快, 需要计算同一帧内连续多个脉冲回波的目标距离变化, 并加入仿真模型。

#### 3.3 目标回波观测信号的发生

回波观测信号依信噪比发生。光电探测器输出的回波电流中包含目标回波  $i_s$ , 也包含背景噪声  $i_{nb}$ 、信号散粒噪声  $i_{ns}$ 、探测暗电流噪声  $i_{nd}$  及探测器

热噪声  $i_{nT}$  等。回波信噪比定义为目标回波峰值电流与总噪声电流均方根之比<sup>[14]</sup>：

$$R_{SN} = \frac{I_s}{I_n} = \frac{i_s}{\sqrt{i_{nb}^2 + i_{ns}^2 + i_{nd}^2 + i_{nT}^2}} \quad (20)$$

实际应用中,探测器输出的电流信号转换为电压信号,回波信噪比又定义为目标回波脉冲波形的峰值  $V_{max}$  与回波噪声均方根值之比：

$$R_{SN} = \frac{V_{max}}{f_{RMS}}, \quad f_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (n_i - \bar{n})^2} \quad (21)$$

回波噪声观测值  $\hat{n}(t)$  通过抽取服从  $N[0, \sigma_n^2]$  的零均值高斯分布子样得到。对于零均值高斯白噪声,  $\bar{n}$  为 0, 有

$$kf_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (kn_i)^2} \quad (22)$$

噪声观测样本是由软件发生的,其均方根值是随机的。首先,对噪声样本数值依(22)式进行修正,使对应数/模(D/A)输出的噪声均方根值为 100 mV。然后,依据仿真模型产生回波脉冲波形数据。再按设定信噪比对脉冲波形的幅值作修正,如信噪比为 2,则使峰值对应于 200 mV。最后,将回波脉冲波形放到目标观测距离所在位置,得到一帧观测数据。当产生足够帧数的数据时,经 D/A 转换发生回波观测信号。

### 3.4 目标主波信号仿真

目标主波信号为激光雷达的时统信号,规定了多脉冲回波的时序关系。在实际仿真中,模拟大功率激光器发射时对主波信号(包括回波)的干扰脉冲及实际工作中有可能出现的错误主波时序,可以检验回波处理器的适应能力及可靠性。

### 3.5 目标仿真模型的扩展

新型多脉冲激光模拟器采用半实物仿真方案。虚拟仿真软件根据设定的光电参数模型生成目标回波及主波数据文件,发送给由现场可编程门阵列

(FPGA)控制的高速数模转换器(DAC)发生波形。目标数据根据回波处理算法开发验证的需要产生,可分别或综合模拟多种类型的干扰、噪声以及故障状况。外场采集的回波数据经格式变换后可由模拟器进行回放。模拟器灵活的扩展性为回波处理器的研制提供了有力的测试保障。

## 4 两种脉冲激光模拟器的性能对比

回波处理器的最小可检测信噪比测试需要信噪比稳定的模拟回波。通过实验,对两种目标模拟器的输出回波进行信噪比测试分析。光学模型模拟器集成 1064 nm 波段和 1570 nm 波段小功率激光器,辐射 1000  $\mu$ W 光脉冲,经衰减片后由光电探测器输出回波电信号。采用 TDS5104B 示波器测试输出信噪比及误差。更换衰减片,测试信噪比及其误差的均值。再由信号模拟器发生相同信噪比均值的回波,记录信噪比误差。图 5 显示两种模拟器在低信噪比时的误差均较大。信号模拟器总体误差较小,最小模拟信噪比为 1,而光学模型模拟器只能模拟信噪比大于 4.6 的信号。

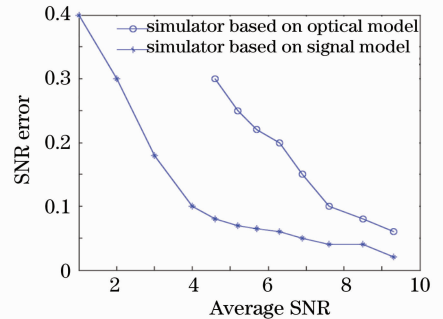


图 5 回波的信噪比误差对比曲线

Fig. 5 Comparison of two echo SNR error curves

表 2 从连续工作时间、模拟目标类型、便携性、脉冲展宽特性模拟、波形回放、故障状况及各类噪声干扰的仿真模拟等方面对比了两种模拟器的性能指标。

表 2 两种模拟器的性能指标对比

Table 2 Performance comparison between two kinds of simulators

Performance specifications	Simulator based on optical model	Simulator based on signal model
Target simulation principle	Optical attenuation (attenuation factor)	Arbitrary waveform generator (SNR)
Continuous working time /min	1 (depending on laser radiator)	10 (depending on the file length)
Target category	Static target	Static and dynamic targets
Portability and ease of use	Bad	Good
Simulation of target pulse broadening	No	Yes
Simulation of fault conditions	No	Yes
High-power laser interference simulation	No	Yes
Noise simulation by classification	No	Yes
Playback of the field capture waveforms	No	Yes

图 6(a)显示了光学模型激光模拟器输出经光电转换后在示波器上观测到的波形(SNR 为 7.6)。图 6(b)为由目标信号模拟器直接发生的相同信噪

比模拟回波。可以看出,图 6(b)的回波波形已明显被展宽,更接近真实目标脉冲回波图 6(c)的宽度及波形<sup>[15]</sup>,置信度更高。

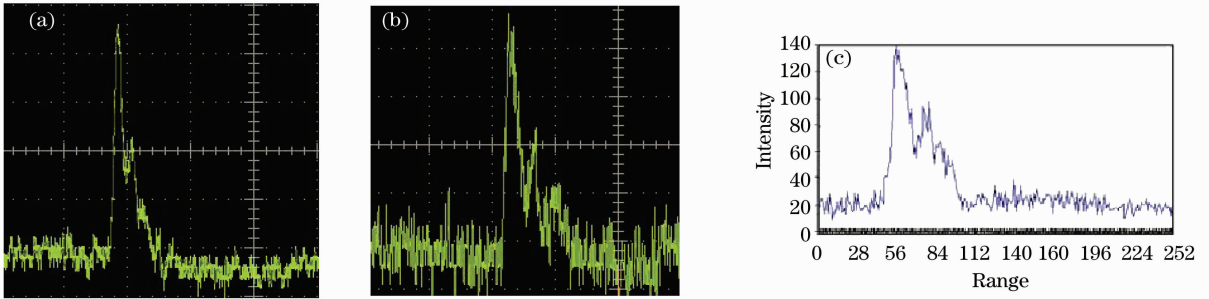


图 6 模拟器发生回波波形对比。(a)光学模型模拟器;(b)信号模拟器;(c)真实回波

Fig. 6 Comparison of echo waveforms generated by two simulators. (a) Optical model simulator output; (b) signal model simulator output; (c) true echo waveform

## 5 结 论

依据文中模型研制的多脉冲激光雷达目标信号模拟器,与上位机数据通信速度达到 24 MB/s,可以 200 MHz 采样率发生脉冲重复频率 1~50 Hz、目标距离 1~150 km、信噪比 1~9 的目标主、回波信号。在与三脉冲回波数字信号处理器交联测试中,通过分别发生高频和低频有色噪声,验证开发了回波信号小波滤波算法。利用模拟器对外场中可能发生的状况进行实验并对外场采集数据做回放测试,提高了激光雷达故障应对能力和可靠性。外场实验表明,经过实验室内评估完善的回波处理器对于外场复杂环境的适应性更好,缩短了外场实验时间。

## 参 考 文 献

- 1 Ma Pengge, Liu Yi, Qi Lin *et al.*. Wavelet filter algorithm for echo signal of pulsed lidar at low SNR[J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, **18**(4): 26~29  
马鹏阁,柳毅,齐林. 低信噪比下脉冲激光雷达回波信号小波滤波算法[J]. *光电与控制*, 2010, **18**(4): 26~29
- 2 H. T. Fang, D. Huang. Noise reduction in lidar signal based on discrete wavelet transform[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **233**(1-3): 67~76
- 3 Li Qi, Wang Yongzhen, Wang Qi *et al.*. Noise suppression algorithm of coherent lidar range image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 581~584  
李琦,王永珍,王骥等. 相干激光雷达距离像的噪声抑制算法研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 581~584
- 4 Xia Guifen, Zhao Baojun, Han Yueqiu. Target detection in three pulse laser radar[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(3): 138~140  
夏桂芬,赵保军,韩月秋. 三脉冲激光雷达的目标检测[J]. *光电工程*, 2006, **33**(3): 138~140
- 5 Ping Qingwei, He Peikun, Zhao Baojun *et al.*. Study on digital signal processor of the high resolution middle and long range laser ranger[J]. *Laser & Infrared*, 2003, **33**(4): 261~264  
平庆伟,何佩琨,赵保军等. 高分辨中远程激光测距机的数字信

- 号处理研究[J]. *激光与红外*, 2003, **33**(4): 261~264
- 6 Ping Qingwei, He Peikun, Zhao Baojun. Target detection algorithm of laser echo[J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(2): 218~220  
平庆伟,何佩琨,赵保军. 激光回波的目标检测算法[J]. *激光技术*, 2004, **28**(2): 218~220
- 7 Yang Yi, Ni Xuxiang, Lu Zukang *et al.*. A pulse laser simulator [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, **27**(6): 43~47  
羊毅,倪旭翔,陆祖康等. 脉冲激光模拟器[J]. *光电工程*, 2000, **27**(6): 43~47
- 8 Huang Bo, Qiu Qi. A calculation of minimal detectable power of laser radar in space[J]. *J. UEST of China*, 2003, **33**(1): 35~37  
黄波,邱琪. 空间激光雷达最小接收光功率的计算[J]. *电子科技大学学报*, 2003, **33**(1): 35~37
- 9 Chen Weibiao, Zhou Jun, Liu Jiqiao *et al.*. Doppler lidar and its all solid-state single frequency laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(1): 57~60  
陈卫标,周军,刘继桥等. 多普勒激光雷达及其单纵模全固态激光器[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(1): 57~60
- 10 A. V. Jelalian. *Laser Radar System* [M]. Boston: Artech House, 1992
- 11 Wang Zhendong, Yang Yi, Zhang Honggang. Numerical simulation for influence of the target properties on the receiving bandwidth of airborne lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(2): 308~312  
王振东,羊毅,张红刚. 目标特性对机载激光雷达接收带宽影响的数值仿真[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(2): 308~312
- 12 Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong *et al.*. Research on ranging property of laser radar and its range accuracy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0514001  
姜海娇,来建成,王春勇等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0514001
- 13 Zhou Hui, Li Song. Waveform simulator of return signal for laser altimeter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1402~1406  
周辉,李松. 激光测高仪接收信号波形模拟器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1402~1406
- 14 Yang Yi, Lu Zukang, Hu Leili. Numerical simulation of ranging performance for an airborne laser range finder [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 76~78  
羊毅,陆祖康,胡磊力. 机载激光测距机测距性能的数值仿真[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 76~78
- 15 F. K. Knight, D. I. Klick, D. P. Ryan-Howard *et al.*. Three-dimensional imaging using a single laser pulse [C]. *SPIE*, 1989, **1103**: 174~189