

新型机载多脉冲激光雷达目标信号模拟器

马鹏阁^{1,2}, 金秋春¹, 柳毅², 齐林³

(1. 郑州航空工业管理学院, 河南 郑州 450015; 2. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009;
3. 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)

摘要: 研制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。首先, 介绍了目标信号的主要组成以及回波信噪比的两种定义。接着, 基于激光雷达方程及 $1.064\ \mu\text{m}$ 激光器的辐射激光的光电接收实验, 获取信号波形并对目标回波信号组成进行分析, 结合空中目标的回波脉冲展宽建立了机载脉冲激光雷达目标回波信号模型。之后, 提出了依据电压信噪比产生回波观测信号的方法。最后, 给出了基于“FPGA+高速 D/A+USB2.0 数据传输”的目标信号模拟器软硬件实现, 可为回波信号处理器提供信噪比为 1-9 的静、动目标回波及主波信号。

关键词: 回波信号处理; 多脉冲激光雷达; 信噪比; 回波信号模拟

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)08-2068-05

New airborne multi-pulse LADAR target signal simulator

Ma Pengge^{1,2}, Jin Qiuchun¹, Liu Yi², Qi Li³

(1. Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China; 2. Science and Technology on Electro-optic Control Laboratory, Luoyang 471009, China; 3. Henan Key Laboratory of Laser and Electro-optic Information Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The airborne multi-pulse LADAR target signal simulator was studied based on signal model to evaluate the performance of laser echo signal processing algorithms and their digital hardware platform. Firstly, the main elements of target signal model and two definition of SNR were pointed out. Subsequently, based on the ladar equation and $1.064\ \mu\text{m}$ laser radiation photoelectric receiver experiment, the signal waveform was obtained and the target signal composition was analyzed. The echo signal model was further established by the analysis of air target echo pulse broadening. Then, the method to generate echo signal according to SNR was proposed based on the RMS value standardization of echo noise samples. Finally, the implement of target signal simulator was given based on FPGA and high-speed D/A and USB2.0 data transmission, which could provide the echo signal and sync-signal of static and dynamic targets with the SNR of 1-9.

Key words: echo signal processing; multi-pulse LADAR; signal to noise ratio; echo signal simulation

收稿日期: 2011-12-22; 修订日期: 2012-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(61071211, 70971120); 光电控制技术重点实验室和航空科学基金联合资助项目(20105155003)

作者简介: 马鹏阁(1976-), 男, 副教授, 主要从事激光雷达目标探测及信号处理技术方面的研究。Email: mapenge@163.com

0 引言

目前,机载光电探测系统中采用多脉冲激光雷达对远程目标实施精确测距。通过在一个脉冲重复周期内间隔数百微秒对同一位置目标连续照射多次可以得到多个脉冲回波信号。将多个回波直接相加,能使回波信噪比提高^[1-2]。因此,多脉冲激光回波信号处理系统应是数字化的。由ADC对多脉冲回波进行采样,再利用DSP对一帧中 N 个目标回波做累加、滤波以提高信噪比,进而检测出目标^[3-5]。基于DSP硬件平台应用复杂信号处理算法可进一步提高信噪比,实现对远程激光目标的检测^[6]。

在一定信噪比下,评估回波信号处理算法及其硬件实现平台进行目标检测的有效性、可靠性及实时性等指标,需要一个模拟真实目标环境的仿真平台。目前,已有的激光目标模拟器为光学模拟器,可以模拟产生脉宽、辐射功率随发射脉冲、气象条件、能见度及目标反射特性变化的激光脉冲^[7-8]。加装光电探测器后能够得到反映光功率变化的模拟回波电信号。但是,这样的回波信号不是依据信噪比发生的,不适用于对回波数字信号处理算法与系统性能的量化评估。

针对回波数字信号处理器研制的需要,文中研究建立激光目标信号的数学模型,结合波形、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,及目标信号的仿真模型。最后,给出了基于回波噪声RMS统计值的标定模拟发生任意信噪比目标回波信号的方法,以及采用任意波形发生器方案的目标模拟器的实现。

1 目标信号模型

1.1 目标信号组成

激光回波数字信号处理器的输入由主波、回波、复位、单/多脉冲状态等信号组成。主波是对发射激光采样的一小束出射光经光电转换得到宽度为 $1\ \mu\text{s}$ 、幅度为 $+5\ \text{V}$ 的脉冲信号。主波脉冲指示了激光路程的起始时刻。回波是光电接收机输出的电信号,包含回波噪声和目标信号。目标回波脉冲对应光程的结束时刻。回波处理器从噪声中检测出目标脉冲,即可计算出目标距离。复位、单/多脉冲状态信号用于启

动和状态指示。

1.2 信噪比定义

光电探测器输出的回波电流信号中除了目标回波信号 i_s 之外,还包括背景噪声 i_{nb} 、信号闪烁噪声 i_{ns} 、暗电流闪烁噪声 i_{nd} 及探测器热噪声 i_{nT} 等。回波信噪比定义为目标回波信号峰值电流与总噪声电流均方根之比^[9]:

$$SNR = \frac{i_s}{\sqrt{i_{nb}^2 + i_{ns}^2 + i_{nd}^2 + i_{nT}^2}} \quad (1)$$

实际应用中探测器输出的电流信号经前置放大电路转换为电压信号。回波信噪比也可定义为目标回波脉冲的最大值 V_{max} 与回波噪声均方根值(RMS)之比:

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

1.3 目标回波脉冲波形

根据大量子数描述的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^[10]。远程目标视为点目标,脉冲激光雷达方程为:

$$P_R = \frac{P_T}{R^2 \theta_T^2} \times \frac{\sigma}{4\pi R^2} \times \frac{\pi D_r^2}{4} \times \eta_1 \eta_2, \theta_T = \frac{k_a \lambda}{D} \quad (3)$$

式中: P_R 为接收光功率; P_T 为发射光功率; R 为目标距离; θ_T 为激光发散角; k_a 为口径透光常数; λ 为发射激光波长; σ 为光源出光口径; D_r 为目标散射截面积; D 为接收孔; η_1 为大气传输系数; η_2 为光学系统传输系数。

一定时间内的光学系统及传播环境可认为是时不变的,由发射功率与接收功率的线性关系可知发射信号的幅度与回波幅度也应是成线性的。激光雷达发射脉冲 $s(t)$ 通常为宽度数十纳秒的高斯脉冲信号。因此,目标回波 $r(t)$ 也为高斯脉冲类型。

图1显示了实验中通过衰减片控制光功率逐渐减小的 $1.064\ \mu\text{m}$ 激光器辐射脉冲经光电转换连接示波器TDS5104采集的波形。图1(a)、(b)的脉冲宽度均为 $80\ \text{ns}$ 。图1(a)信号的幅度较高,激光脉冲集聚表现为一个高斯脉冲。但当功率衰减到一定程度(见图1(b))时,可以发现脉冲波形显现出多模的特点。也就是说,激光器发射的光脉冲实际上包含了多个高斯光脉冲。

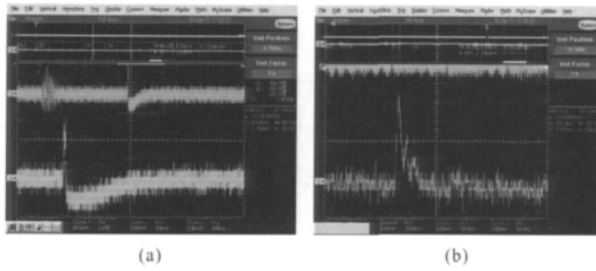


图 1 实际接收的激光脉冲波形
Fig.1 Waveforms generated by target signal simulator

因此,发射脉冲信号 $s(t)$ 建模为:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N A_n \exp\left(-C_n \frac{(t-B_n)^2}{2}\right) \quad (4)$$

式中: A_n 和 B_n 分别为高斯脉冲幅度和时移; C_n 为脉冲宽度的系数; N 为高斯脉冲个数。因此,目标回波信号 $r(t)$ 为:

$$r(t) = g(t) \times s(t) + n(t) \quad (5)$$

式中: $g(t)$ 为系统传递函数,其对回波信号的影响体现在对幅度的衰减以及脉冲时间的展宽; $n(t)$ 为噪声信号,可建模为高斯白噪声^[11]。

1.4 空中目标的回波脉冲展宽

机载激光雷达光轴与目标飞机表面有一定的夹角,使得目标回波脉冲的宽度相对于发射脉冲明显被展宽,而峰值则有所降低。

目标脉冲展宽导致接收信噪比降低。目标回波脉冲波形可看作多个高斯脉冲经展宽后的叠加。

如图 2 所示,设载机位于 O 点, AB 为空中目标飞机的长度(BT 长为 l_1 , TA 长为 l_2), 载机光轴与目标交点为 T , 激光发散角为 Ψ , OT 为目标距离 R , 目标平面与光轴夹角为 α , CD 为光斑边界, 光轴与 OB 夹角为 ϕ_1 、与 OA 夹角为 ϕ_2 , 且 $\phi_1 + \phi_2 < \Psi$ 。

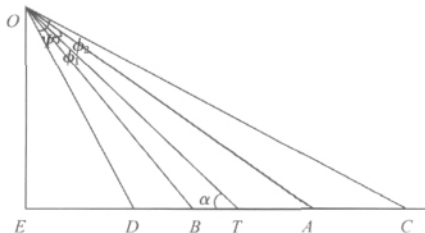


图 2 远程空中目标激光光斑示意图
Fig.2 Schematic diagram of air target in laser spot

设回波能量从 0.1 倍峰值上升到峰值的时间展宽宽度为 Δt_1 , 由峰值下降至 0.1 倍峰值时间展宽宽

度为 Δt_2 。

由图 2 的几何关系可以得到:

$$\Delta t_1 = 2(OT - OB)/c = \frac{2R}{c} \left[1 - \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \phi_1)} \right] \quad (6)$$

$$\phi_1 = \arctan\left(\frac{\sin \alpha}{R/l_1 - \cos \alpha}\right) \quad (7)$$

$$\Delta t_2 = 2(OA - OT)/c = \frac{2R}{c} \left[\frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \phi_2)} - 1 \right] \quad (8)$$

$$\phi_2 = \arctan\left(\frac{\sin \alpha}{R/l_2 + \cos \alpha}\right) \quad (9)$$

可以看出, Δt_1 及 Δt_2 与目标距离 R 、目标尺寸及倾角 α 有关。当目标距离远大于空中目标的尺寸时, OT 与 OB 的光程差只取决于目标自身尺寸及倾角 α 。

数值计算分析的结果显示 R 的影响实际可以忽略。对于 $\alpha = 15^\circ$, $l_1 = 10$ m, 随着距离从 10 km 增加至 80 km, $\Delta t_1 \approx 64.394$ ns。

$l_1 = l_2 = 10$ m 时, $\Delta t_1 \approx \Delta t_2$, 不同倾角 α 下的脉冲展宽如表 1 所示。而且, 随着角度 α 的增大回波脉冲展宽逐渐减小。

表 1 不同倾角的脉冲展宽时间

Tab.1 Δt_1 at different α

$\alpha / (^\circ)$	10	20	30	40
$\Delta t_1 / \text{ns}$	32.827	31.322	28.866	25.532
$\alpha / (^\circ)$	50	60	70	80
$\Delta t_1 / \text{ns}$	21.422	16.66	11.395	5.783

表 2 给出 $\alpha = 15^\circ$ 不同目标尺寸的 Δt_1 , 可以看出: 随着 l_1 的增大 Δt_1 线性增加。由设定目标尺寸、目标倾角、目光电接收机带宽等参数即可确定空中目标回波脉冲展宽参数 Δt_1 与 Δt_2 。

表 2 不同目标尺寸时的脉冲展宽时间

Tab.2 Δt_1 at different target length

l_1 / m	8	10	12	15
$\Delta t_1 / \text{ns}$	25.758	32.197	38.637	48.296
l_1 / m	18	20	25	30
$\Delta t_1 / \text{ns}$	57.955	64.394	80.493	96.591

2 目标信号模拟

2.1 目标回波信号的发生

多脉冲激光雷达目标模拟器根据设定的目标回

波帧数 N 、脉冲重复周期 T 、主波脉冲间隔 τ 、目标距离 t_0 、激光雷达系统参数、大气传播环境及目标特性等参数,产生主波信号、含有目标脉冲及噪声干扰具有设定信噪比的模拟回波信号以及控制激励信号,提供给回波数字信号处理系统进行目标模拟测距。各帧回波观测信号依信噪比发生。

首先,产生噪声数据并计算其 RMS 值。回波噪声的观测值 $\hat{n}(t)$ 由抽取服从 $N[0, \sigma_n^2]$ 的零均值高斯分布子样得到。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (n_i - \bar{n})^2} \quad (10)$$

然后,根据设定信噪比 SNR ,计算出目标回波信号的幅值 $A = RMS \times SNR$ 。再由目标回波信号模型产生幅度为 A 、宽度为 $\Delta t_1 + \Delta t_2$ 的目标回波脉冲信号。之后,将符合信噪比要求的目标脉冲波形放置到目标观测距离所在位置,产生完整的目标回波观测数据。最后,经由 D/A 转换发生目标回波观测信号。主波是数字信号,可由可编程逻辑器件按时序关系发生。

2.2 目标模拟器的实现

2.2.1 目标模拟器硬件设计

图 3 给出了激光目标信号模拟器的组成。测控

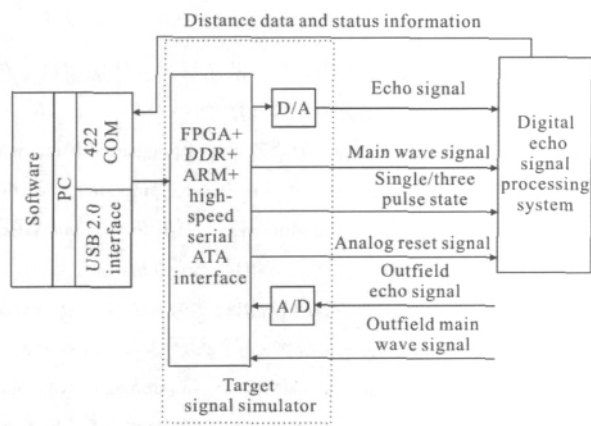


图 3 目标信号模拟器的组成框图

Fig.3 Block diagram of target signal simulator

软件根据设定参数产生一定帧数的目标回波观测数据,经 USB2.0 传送给目标模拟器的 FPGA 并缓存在 DDR 存储器中。FPGA 在发生主波信号的同时,同步将回波数据以 200 MB/s 的速度经 LVDS 接口发送给 DAC,产生目标回波信号。目标信号模拟器可用

于外场信号的数据采集。FPGA 本身具备与串行硬盘连接的高速接口,板载一个 ARM 嵌入式处理器以运行 linux 操作系统,用于对硬盘中数据文件的管理。存储在硬盘中的回波数据可经 USB 传输至上位机保存、重新回放。

2.2.2 激光目标模拟器控制软件

控制软件根据界面所设定的目标距离、信噪比、重复频率、脉冲间隔、脉冲宽度、脉冲类型及要产生的数据帧数等参数,生成静态回波数据帧;或者增加设定目标起始距离、目标终止距离、目标移动速度等参数生成动态目标态回波数据帧。生成数据保存为文件,经 USB2.0 接口传输给 FPGA,采集的数据则由 FPGA 经 USB 上传至 PC。USB 通信功能封装在 cy7c68013a_lib.dll 动态链接库文件中,具有打开关闭设备、发送数据、上传数据、控制命令等 USB 驱动函数。回波处理器的测距信息经 422 串口回传给上位机,与设定参数比较,计算评估检测概率、捕获时间、检测精度以及最小可检测信噪比等性能指标。流程如图 4 所示。

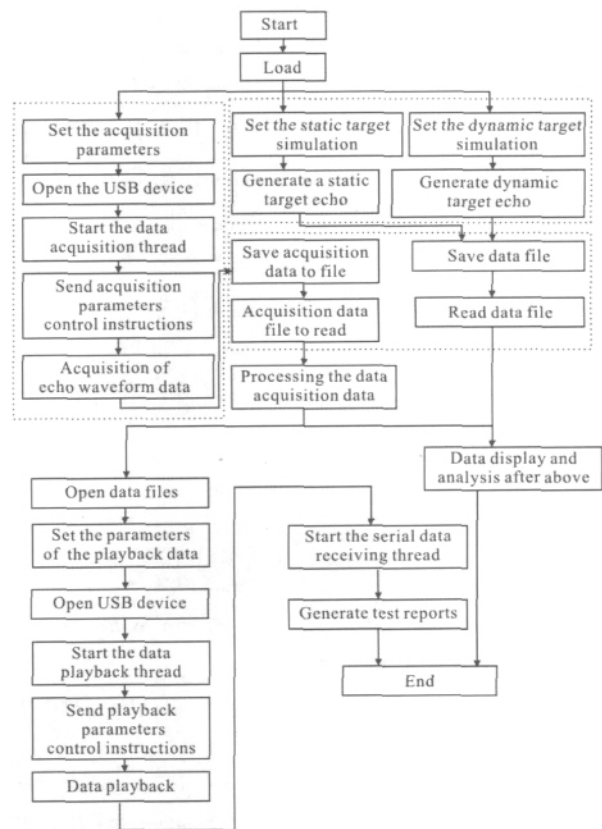


图 4 静、动态目标模拟及数据采集软件工作流程

Fig.4 Diagram of static and dynamic target simulator and data collection software

2.2.3 目标模拟信号波形

图 5 给出了由示波器 TDS5104 采集的目标信号模拟器发生的设定信噪比为 2、RMS 为 100 mV 的目标回波信号。实际测量发生的目标信号噪声 RMS 为 101.0 mV, 最大幅值为 196 mV, SNR 为 1.94。

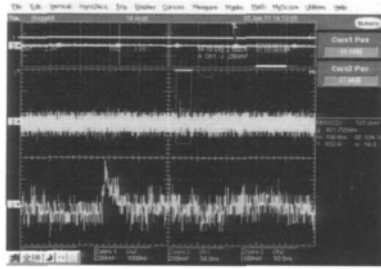


图 5 模拟器发生的目标回波信号
Fig.5 Target echo signal of simulator

3 结论

文中提出的新型多脉冲激光雷达目标信号模拟器, 与上位机数据通信速度能够达到 24 MB/s, 能以 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。与现有脉冲激光雷达模拟器比较, 具有以下优点:(1) 可模拟任意信噪比静、动态目标;(2) 可对外场回波信号进行采集、存储及事后回放;(3) 能够模拟目标特性对回波脉冲展宽的影响;(4) 能够模拟故障信号状态;(5) 连续工作时间不受激光器发热限制;(6) 设备的移动不存在重新调整光轴等问题。经过与三脉冲回波数字信号处理器交联测试, 可以在实验室内对算法及平台性能进行测试与评估, 从而提高算法的适应性, 缩短外场试验时间。

参考文献:

- [1] Xia Guifen, Zhao Baojun, Han Yueqiu. Target detection in three pulse laser radar [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(3): 138-140. (in Chinese)
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.
- [2] Ping Qingwei, He Peikun, Zhao Baojun. Target detection algorithm of laser echo [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(2): 218-220. (in Chinese)
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.
- [3] Ma Pengge, Liu Yi, Qi Lin. Wavelet filter algorithm for echo signal of pulsed lidar at low SNR [J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, 18(4): 26-29. (in Chinese)
马鹏阁, 柳毅, 齐林. 低信噪比下脉冲激光雷达回波信号小波域滤波算法[J]. 光电与控制, 2010, 18(4): 26-29.
- [4] Li Qi. Noise suppression algorithm of coherent lidar range image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(5): 581-584. (in Chinese)
李琦. 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.
- [5] Fang Haitao, Huang D S. Noise reduction in lidar signal based on discrete wavelet transform [J]. *Optics Communications*, 2004, 233(1-3): 67-76.
- [6] Ping Qingwei, He Peikun, Zhao Baojun. Study on digital signal processor of the high resolution middle and long range laser ranger[J]. *Laser & Infrared*, 2003, 33(4): 261-264. (in Chinese)
平庆伟, 何佩琨, 赵保军. 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.
- [7] Yang Yi, Ni Xuxiang, Lu Zukang, et al. A pulse laser simulator[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2000, 27(6): 43-47. (in Chinese)
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] Li Songming, Xu Rongfu, Zhao Changming. Intelligent measuring system for performance parameters of laser range finder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(4): 211-213. (in Chinese)
李松明, 徐荣甫, 赵长明. 智能激光测距机性能测试系统[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(4): 211-213.
- [9] 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. (in Chinese)
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.
- [10] Huang Bo, Qiu Qi. A calculation of minimal detectable power of laser radar in space [J]. *Journal of UEST of China*, 2003, 33(1): 35-37. (in Chinese)
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.
- [11] Lu Guanghua, Peng Xueyu, Zhang Linrang, et al. Random Signal Processing[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002. (in Chinese)
陆光华, 彭学愚, 张林让, 等. 随机信号处理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.