

文章编号: 0258-7025(2010)12-2986-07

# 外差成像激光雷达电子跟踪器半实物 仿真平台设计与实现

王 骐 李连江 陆 威

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 为检验与评估激光雷达系统组成模块及器件的性能指标及各个模块及器件协同工作系统效率,建立了外差成像激光雷达电子跟踪器半实物仿真平台。在虚拟设计思想指导下,采用半实物仿真模式设计电子跟踪器仿真平台,并根据激光雷达方程将电子跟踪器仿真平台模块化。基于朗伯散射理论建立了仿真目标场景库模块;基于激光束空间分布理论建立了信号模拟器模块;基于微弱信号检测理论建立了中放模块、数据采集逻辑控制模块和成像及数据分析模块。将五大模块系统集成构成电子跟踪器半实物仿真平台,并进行联调实验评估模块协同工作系统效率;应用中频放大器代替中放模块进行真实器件性能指标评估实验。实验结果表明,电子跟踪器半实物仿真平台能够重现成像激光雷达工作过程,可分析各个模块协同工作效率;能够评估激光雷达组成器件性能指标,并根据具体应用需求给出分析结果,为激光雷达系统组成模块及器件的性能指标评估提供了一种可靠的分析手段。

**关键词** 激光雷达;激光雷达仿真;半实物仿真;电子跟踪器

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103712.2986

## Design and Realization of Electronic Tracking Devices of Heterodyne Imaging Ladar System

Wang Qi Li Lianjiang Lu Wei

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Opto-Electronic, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** In order to test and evaluate the performance of the composition of laser radar systems, modules and components, and the co-working efficiency of modules and components, a heterodyne laser radar imaging of electronic tracking devices loop simulation platform is established. The electronic tracking device is composed of simulative target scene library module, signal simulator module, intermediate frequency amplifier, data acquisition logistic control module, imaging and data analyze module. The main features of electronic tracking devices of heterodyne imaging ladar system include: testing the various components of the laser radar system performance indices; efficiency analysis of heterodyne laser radar systems, and providing advices to improve the efficiency of proposed system. The results show that electronic tracking device loop simulation platform can reproduce the working process of imaging laser radar, analyze the co-working efficiency of the various modules; assess the performance of laser radar devices, and provide practical analysis results based on specific application requirements which provides a reliable analytical tods to evaluate the performance of the modules and device of laser radar system.

**Key words** laser radar; ladar simulation; hardware in the loop simulation; electronic tracking devices

### 1 引言

近年来随着激光雷达技术研究的深入,计算机仿真技术在成像激光雷达研究中的应用日益受到各国科研人员的重视,并成为成像激光雷达研究和设

计中的一个有效手段<sup>[1~4]</sup>。比如美国空军地球物理实验室开发的 Irma 仿真系统已经发展到 5.1 版<sup>[5]</sup>,其主要功能是侧重于计算斑纹效应、相干检测和极化效应等理论问题。还有荷兰皇家气象学会和欧洲

**收稿日期**: 2010-03-10; **收到修改稿日期**: 2010-06-20

**作者简介**: 王 骐(1942—),男,教授,博士生导师,主要从事低激发阈值、小型化 X 光激光研究以及高清晰三维激光成像信号处理和激光主动成像虚拟设计等方面的研究。E-mail: qiwang@hit.edu.cn

航天局(ESA)共同开发了激光雷达技术性能分析模拟器(LIPAS)<sup>[6]</sup>,其主要功能是科学模型结果显示、二维映射、针对输入文件实时进行数据处理。可见,现有激光雷达系统仿真软件主要功能是对激光雷达系统物理特性进行分析,并未对各组成模块及其器件进行性能分析,不能为激光雷达系统设计及研制提供具体的辅助设计参考意见;并且缺乏对激光雷达系统单独模块或真实器件性能指标的检验机制。

本文针对这些问题,建立了外差成像激光雷达电子跟踪器半实物仿真平台。外差成像激光雷达电子跟踪器半实物仿真平台是针对外差体制成像激光雷达建立的半实物仿真系统。主要功能是检测电子跟踪器各器件功能是否符合设计要求,并通过检测对设计指标提出要求。它由仿真目标场景库模块、信号模拟器模块、中频(IF)放大器、数据采集逻辑控制模块和成像及数据分析模块构成。利用开放式图形库(Open GL)建立三维仿真目标场景,三维目标坐标参数可设(软件);利用泰克公司的 AFG3252 任意函数发生器建立信号模拟器(软硬件相结合);

利用泰克公司的示波器 DPO7104 建立数据采集模块和成像模块。

## 2 外差成像激光雷达电子跟踪器设计方案及模块分析

基于移动平台的成像激光雷达系统结构如图 1 所示,通常由激光成像器、电子跟踪器和随动系统三部分组成。激光成像器由激光发射器、光学系统、扫描系统、偏频锁定系统和探测器组成,主振激光发射到空间目标,并收集由目标返回的散射光——即信号回波。回波信号在探测器光敏面上与本振光混频,产生外差信号并经前置放大器输出;电子跟踪器对前置放大信号进行滤波、整形、放大形成中频信号,A/D 采集模块获得离散中频信号,目标识别模块对离散中频信号进行像的处理、识别并获得目标形心偏差信号;随动系统通过对比目标形心偏差,给出飞行路线矫正信息,反馈到激光成像器,激光成像器根据反馈信息调整飞行路线。

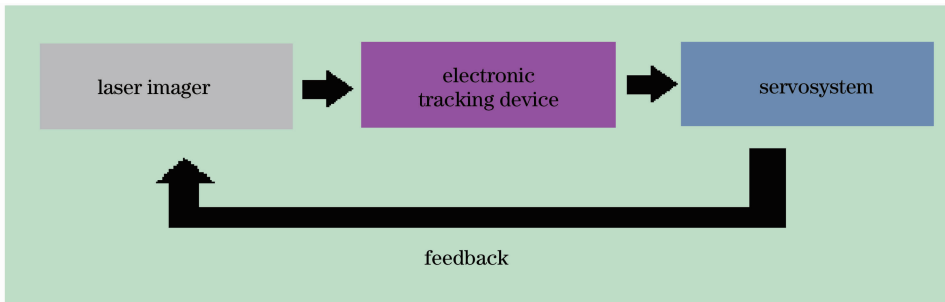


图 1 成像激光雷达系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of imaging laser radar system

半实物仿真是指在数学仿真中,把部分仿真模型用实物代替的一种实时仿真。优点是能直接真实地反映具体器件的性能指标及其对系统的影响,更具实际应用价值。外差成像激光雷达电子跟踪器半实物仿真平台是针对外差体制成像激光雷达建立的半实物仿真系统。由仿真目标场景库模块、噪声库模块、信号模拟器模块、中频放大器和数据采集成像模块构成。

### 2.1 仿真目标场景库

仿真目标场景库主要包含目标场景的强度信息和距离信息。目标模型是利用计算机三维图形技术建立的,这样的目标模型包含真实目标的完整三维几何信息。为了从目标模型中得到所需要的信息,必须了解真实目标的特性。从统计意义来说,有两类最简单的目标,即镜式目标和漫散射目标。前者

有确定的定义,而后的反射场幅度具有瑞利分布特性。为了弄清镜式和漫散射目标的回波电平,必须确定目标特征信号。

在雷达系统中,目标散射的平均功率通常用雷达截面  $\sigma$  表示。在光频段,通常所采用的截面定义是用所谓漫散射标准来表示。根据这种规定,该截面等于非吸收平面——理想的朗伯平面面积。假设生成的目标模型都是非吸收性理想朗伯反射体。朗伯反射体的散射强度为<sup>[7]</sup>

$$I_r = P_i \rho_0 \cos \theta / r^2, \quad (1)$$

式中  $P_i$  为入射功率,  $\rho_0$  为表面反射率,  $r$  为目标距离。激光雷达的距离为<sup>[5]</sup>

$$R_{CN} = \frac{\eta P_T}{h\nu_0 B} \frac{\rho A_R}{\pi r^2} \epsilon \exp(-2\alpha r), \quad (2)$$

式中  $P_T$  为发射峰值功率,  $A_R$  为接收面积,  $\alpha$  为大气

衰减系数,  $\rho$  为目标反射率。由于这里的噪声主要指光学系统内部的固有噪声, 因此, 噪声是一定值。在这个前提之下, 由(2)式得到的载噪比与回波信号的强度值成比例, 而强度像即目标表面反射回来的强度回波信号强度。这样就可以从目标模型中提取出强度信息。距离信息可以直接从目标模型中提取。利用获得的强度信息和距离信息就可以生成仿

真目标场景库了。

图 2 是对 F16 进行的仿真目标库的提取, 其中强度像和距离像的大小可根据需要设定, 其中强度像和距离像的图像大小都是  $128 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 。

通过对三维目标模型的转换, 建立的目标场景库生成系统, 能对激光雷达系统的各种物理特性仿真提供真实可靠的前级输入, 具有重要的物理意义。



图 2 仿真目标的三维图像(a), 强度像(b)和距离像(c)

Fig. 2 Three-dimensional simulation of the target (a), intensity images (b) and range images (c)

## 2.2 噪声库模块

由于目标表面相对于激光波长来说相当地粗糙, 且激光具有相干性, 因此当激光照射目标表面时, 其回波会产生散斑现象, 散斑对激光雷达强度图像影响严重, 它造成强度图像灰度的急剧起伏<sup>[8~11]</sup>。同时, 雷达采用外差接收, 其必然还会受

到本振散粒噪声的影响。

一个严重的散斑降低同时伴随着一个强的噪声峰值导致测量距离值远离真实值, 从而形成反常距离。以  $r$  表示测量距离值,  $r^*$  表示真实距离值, J. H. Shapiro 给出了将  $r$  作为一连续随机变量, 在  $r=R$  时有  $r^*=R^*$  成立的概率密度函数<sup>[10]</sup>

$$P_{r|r^*}(R | R^*) = [1 - P_r(A)] \frac{\exp\left[-\frac{(R - R^*)^2}{2(\delta R)^2}\right]}{[2\pi(\delta R)^2]^{1/2}} + \frac{P_r(A)}{\Delta R}, \quad R_{\min} \leq R, \quad R^* \leq R_{\max} \quad (3)$$

式中  $P_r(A)$  为反常概率, 也就是距离反常出现的概率;  $\delta R$  为局部距离精度;  $\Delta R$  为距离测量范围,  $\Delta R = R_{\max} - R_{\min}$ 。距离反常概率表达式为<sup>[12]</sup>

$$P_r(A) \approx \frac{1}{R_{CN}} \left( \ln N - \frac{1}{N} + 0.577 \right), \quad R_{CN} \gg 1, \quad N \gg 1 \quad (4)$$

利用随机抽样方法或统计试验法(蒙特-卡罗方法)<sup>[13]</sup> 仿真激光雷达系统随机噪声生成的物理过程。利用(3)式给出的条件概率函数对仿真目标场景加噪, 在 20 dB 条件下对图 2 中的仿真目标加噪

的结果如图 3 所示。至此, 已经获得了仿真场景加噪距离信息和加噪强度信息。

## 2.3 信号模拟器模块

信号模拟器主要功能是重现激光雷达回波信

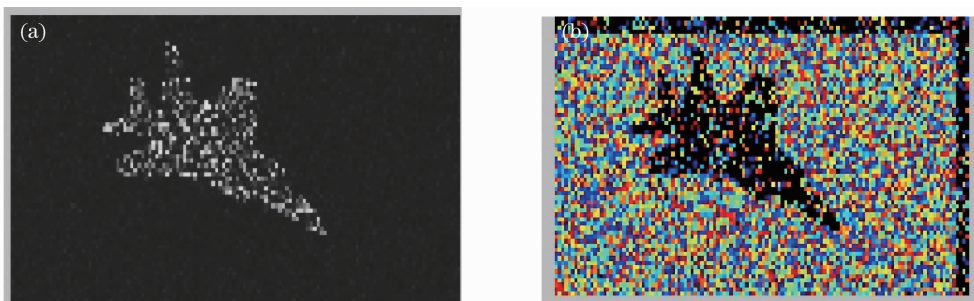


图 3 20 dB 时, 噪声强度像(a)和距离像(b)

Fig. 3 Noise intensity image(a) and noise range image(b) at 20 dB

号。根据前级输入,即仿真目标场景库提供的目标强度信息和距离信息,重现目标回的各种特征:回波脉冲波形、脉宽、重复频率和脉冲传播时序等。利用泰克公司的 AFG3252 任意函数发生器控制回波信号的输出时序和加载强度信息和距离信息。输出到中频放大器的回波信号时序图如图 4 所示。

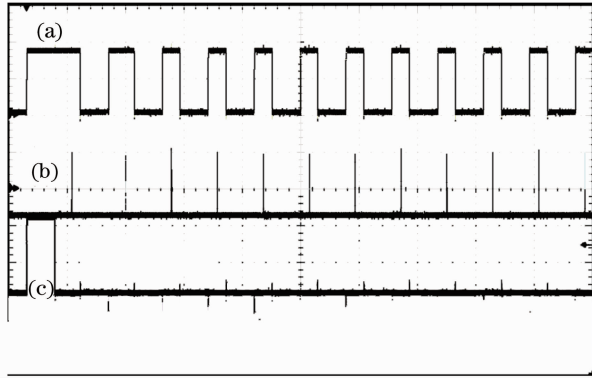


图 4 回波信号时序图。(a)点同步信号,(b)目标回波信号(包含加噪强度信息和距离信息),(c)帧同步信号

Fig. 4 Return signal timing diagram. (a) point synchronization signal, (b) return signal, (c) frame synchronization signal

### 2.4 数据采集成像模块

信号模拟器回波信号经过中频放大器滤波、放大输入到数据采集成像模块。数据采集成像模块主要功能包括:数据采集,以点同步为起始位置采集回波信号;数据处理;成像;要求具备多通道数据采

集功能,多帧数据高速缓存功能。采用泰克公司的 DPO 7104 示波器为硬件平台,在其基础上进行二次开发,利用其分段缓存功能进行高速数据采集,软件实现数据处理和成像功能。

### 3 外差成像激光雷达电子跟踪器半实物仿真平台验证与初步应用

以仿真飞机为例说明电子跟踪器半实物仿真平台工作流程如图 5 所示,首先从目标库中选择目标[图 6(a)],根据工作环境、激光雷达体制给仿真目标加噪<sup>[14~16]</sup>;然后利用信号模拟器对加噪后的真目标进行数模转换,形成激光雷达回波信号;信号采集模块对回波信号进行模数转换,获得仿真目标的强度和距离信息;最后进行成像实验和后续图像处理。仿真实验结果如图 6 所示,这证明电子跟踪器半实物仿真平台系统集成正常,能够以此平台为基础重现激光雷达系统工作过程。

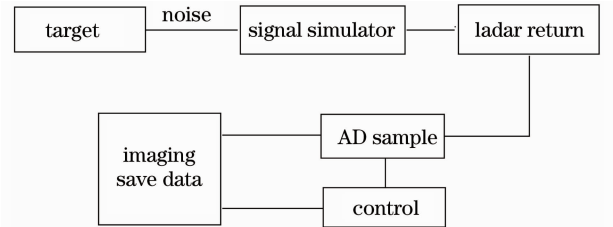


图 5 电子跟踪器半实物仿真平台运行流程

Fig. 5 Electronic tracking devices-the-loop simulation platform for running processes

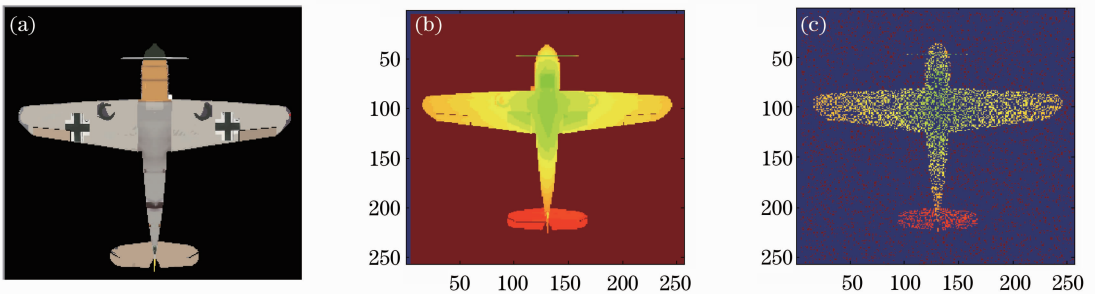


图 6 飞机模型(a),无噪声的飞机距离像(b)和含噪声的飞机距离像(距离选通)(c)

Fig. 6 Plan model (a), plan range image without noise and (b) plan range image with noise (c)

将仿真平台与激光雷达前端对接进行成像实验。外差成像激光雷达电子跟踪器半实物仿真平台是针对外差激光雷达建立的半实物仿真系统,首先要验证其是否能够仿真激光雷达系统。设计了如图

7 所示的实验方案,以电子跟踪器半实物仿真平台代替激光雷达系统探测器后的各模块,应用真实激光雷达系统回波信号评估该仿真平台工作能力,并说明模块化的优势。实验结果如图 8 所示。

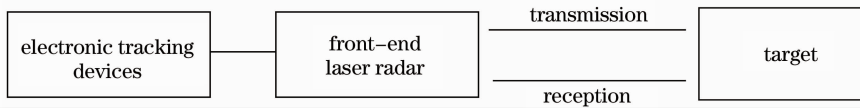


图 7 电子跟踪器与激光雷达前端对接实验框图

Fig. 7 Simulator and front-end laser radar docking experimental diagram

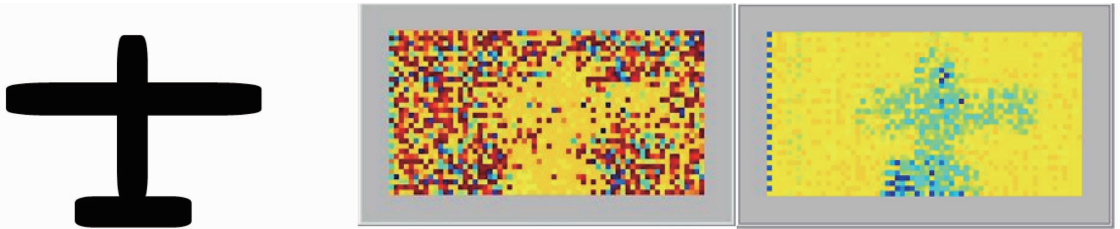


图 8 仿真器与激光雷达前端对接成像实验结果

Fig. 8 Experimental results of imaging of simulator and front-end laser radar docking

可见,电子跟踪器针对真实激光雷达回波可以正确获得目标强度像和距离像。证明电子跟踪器设计方案可行,独立模块参数明确,功能完整,具备激光雷达系统仿真功能。

1) 中频放大器是衔接激光雷达系统模拟模块和数字模块的关键组成部件。中频放大器性能直接影响成像激光雷达系统的信噪比、成像质量及探测距离。根据工作原理中频放大器分为两类:自动增益控制(AGC)中频放大器和对数增益中频放大

器<sup>[17]</sup>。应用电子跟踪器半实物仿真平台对中频放大器进行性能分析与测试。测试框图如图 9 所示,把电子跟踪器半实物仿真平台中的模拟中频放大器换成真实中频放大器即可。应用真实激光雷达回波信号检测中频放大器的各项性能指标。为检验中频放大器对回波信号脉宽及波形的影响,为此,信号模拟器产生的激光雷达回波仿真信号只考虑了散斑噪声和散粒噪声,暂不考虑目标表面起伏特性会造成回波信号脉宽展宽以及波形畸变。

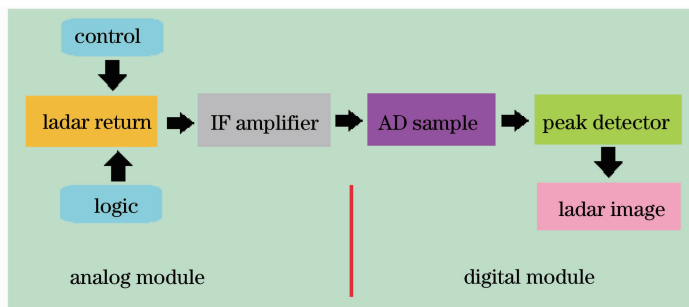


图 9 电子跟踪器半实物仿真平台结构框图

Fig. 9 Block diagram of semi-physical simulation platform

首先对自动增益控制中频放大器进行测试,测试结果如图 10 所示。可以看出,当回波信号与噪声能够区分时[如图 10(b)所示],AGC 中频放大器正常工作,检波输出波形清晰,保证回波不发生畸变,不影响目标回波强度信息;脉冲位置相对于前置放大信号延迟很小,不影响目标回波距离信息。当回波信号微弱时[如图 10(a)所示],AGC 中频放大器应没有输出信号,但是,由于其采样自动增益控制放大回波信号,回波信号微弱时,AGC 中频放大器将满量程放大,产生自激现象。这将大大增加虚警概率,并且还有可能损坏后续器件。

如下结论:AGC 中频放大器输出信号信噪比好,但是当回波信号微弱时会产生自激现象,不能正常工作。

对对数中频放大器进行测试,结果如图 11 所示,对数中频放大器输出结果噪底很高,这是由于该中频放大器采用对数放大中频原理,这拉近了最大值与最小值的距离,能够保证器件不产生自激现象,但是降低了信噪比;并且从图中可以看出,信号与背景噪声的对比度不高,严重限制了激光雷达系统远距离探测的能力。脉宽宽、波形畸变,将直接影响目标回波信息的真实性。

因此,对于自动增益控制中频放大器可以得出

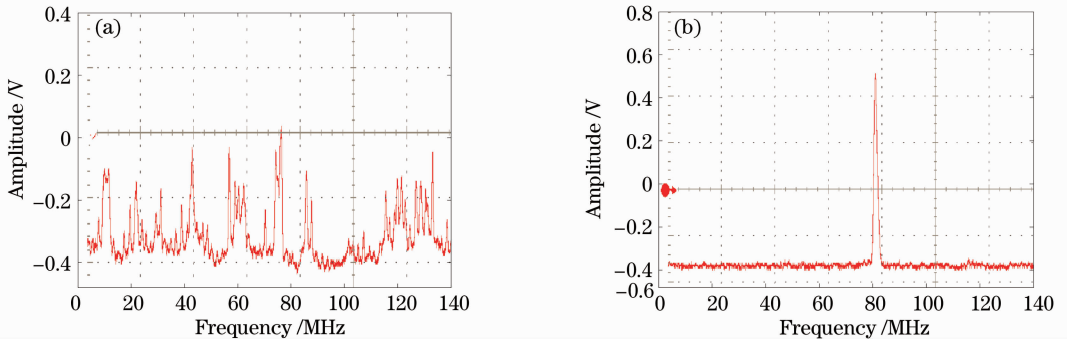


图 10 自动增益控制中频放大器测试结果。(a)自激现象,(b)正常工作状态

Fig. 10 IF AGC amplifier test results. (a) selfexcitation phenomena, (b) normal condition

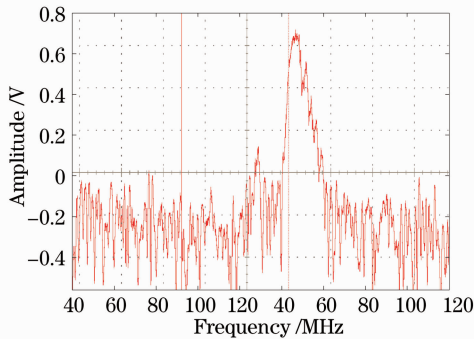


图 11 对数中频放大器测试结果, 噪底高, 脉冲宽

Fig. 11 Logarithmic IF amplifier test results

综合分析两类中频放大器,中频放大器设计方案应选择增加幅度钳制电路的 AGC 中频放大器。这样既保证了激光雷达系统性能,又保证在回波信号微弱时,不产生自激现象。

2) 随着 A/D 模数转换工艺水平的提高,可以选择高速采集卡以获得更准确的数据。但是,无限制的提高采集速率显然是不现实的,并且会大大增加成本。本文基于电子跟踪器半实物平台研究如何选择适合的采样速率问题。首先,以多个采样率对回波信号进行采集成像实验,如图 12 所示。已知回波差频信号频率为  $f_c = 120$  MHz,从欠采样一直变化到过采样。

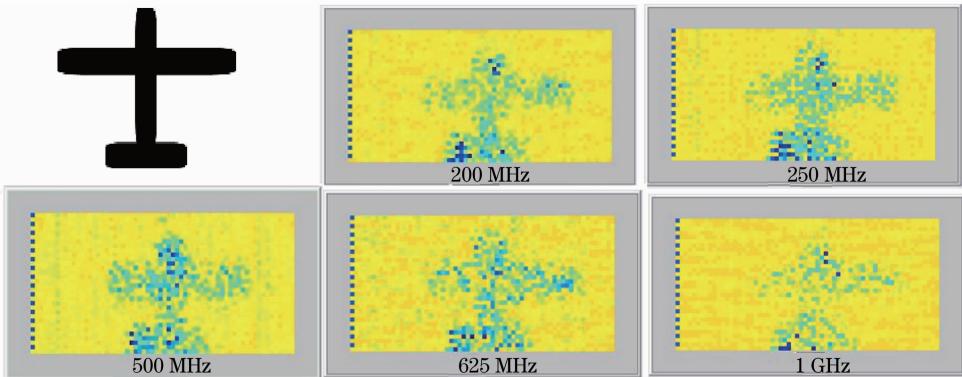


图 12 不同采样率采集成像结果

Fig. 12 Acquisition imaging results of different sampling rates

由采样定理可知  $f_s > 2f_c$ ,由于激光雷达回波信号具有中心频率有频移、窄脉宽等特点,应选择更高一些的采样率,基于电子跟踪器半实物仿真平台实验测试结果,选择  $f_s = 500$  MHz,这既保证了能够真实可靠地重现激光雷达回波信号,又不会由于采样率过高增大采样难度。

### 4 结 论

采用半实物仿真模式建立了电子跟踪器仿真平台,并将电子跟踪器仿真平台模块化,使得电子跟踪

器仿真平台各模块可以与激光雷达系统需检验模块或器件灵活互换,通过比较电子跟踪器仿真平台标准模块与待检器件各项性能指标,能够直观、清晰地给出待检器件恰当的评价,弥补了激光雷达仿真领域里器件级仿真不足的缺陷。可见,电子跟踪器半实物仿真平台在激光雷达系统设计领域有着很好的应用前景。

### 参 考 文 献

1 J. K. Bounds. The infrared airborne radar sensor suite [R].

- Research Laboratory of Electronics at the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., RLE Technical Report No. 610, 1996, 12
- 2 J. Peng, L. Wei, Q. Wang. Broadband amplitude-modulated laser source with high output power for FM/cw lidar transmitter [J]. *J. Russian Laser Research*, 2009, **30**(3): 253~259
  - 3 Q. Wang, J. B. Liu, S. N. Li. Analysis of detectable range of multiple-slit streak tube imaging lidar [J]. *J. Russian Laser Research*, 2009, **30**(3): 296~303
  - 4 Amnon Yariv. *Optical Electronics in Modern Communications* [M]. New York: Oxford University Press, 1997. 356~360
  - 5 J. Savage. Irma 5.1 multisensor signature prediction model [C]. *SPIE*, 2005, **5811**: 199~211
  - 6 S. M. Veldman, H. A. Knobbout, A. Stoffelen *et al.*. Lidar performance analysis simulator-LIPAS [C]. ESA SP-1196(4), 2000, 4~6
  - 7 C. G. Bachman. *Laser Radar Systems and Techniques* [M]. Hu Guilian Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 1982. 1~3  
C. G. 巴克曼. 激光雷达系统与技术 [M]. 胡桂兰 译. 北京: 国防工业出版社, 1982. 1~3
  - 8 Li Ziqin, Wang Qi, Li Qi *et al.*. Noises mechanism of range image in coherent laser radar and the range anomalies suppression [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 356~360  
李自勤, 王 琪, 李 琦 等. 相干激光雷达距离像噪声机理及距离反常抑制 [J]. 中国激光, 2005, **32**(3): 356~360
  - 9 Wei Xiaocheng, Li Qi, Wang Qi *et al.*. Multi-target tracking algorithm emulation based on coherent lidar range image [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(s1): 111~114  
魏小程, 李 琦, 王 琪 等. 多目标相干激光雷达距离像跟踪算法仿真 [J]. 中国激光, 2006, **33**(s1): 111~114
  - 10 Xueke Ding, Jian Rong, Hong Bai *et al.*. Theoretical analysis and simulation of conjugate heights for dual-conjugate AO system in lidar [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1): 1~4
  - 11 Chen Deyi, Wang Zhonglong. Intensity correlation time of the single-mode laser with the noise cross-correlation intensity modulated by time period [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 119~124  
陈德彝, 王忠龙. 噪声交叉关联程度受时间周期调制下单模激光的光强关联时间 [J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 119~124
  - 12 T. J. Green, Jr., J. H. Shapiro. Maximum-likelihood laser radar range profiling with the expectation-maximization algorithm [J]. *Opt. Eng.*, 1992, **31**(11): 2343~2354
  - 13 G. J. M. Parker, G. J. Barker, D. L. Buckley. A probabilistic index of connectivity (PICo) determined using a Monte-Carlo approach to streamlines [C]. In: Proceedings of the ISMRM Workshop on Diffusion MRI: Biophysical Issues, 2002: 245~255
  - 14 Lei Dajun, Yang Hua, Dong Hui *et al.*. Experimental studies of noise-like pulses in a dispersion-managed fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 630~634  
雷大军, 杨 华, 董 辉 等. 色散管理光纤激光器中类噪声脉冲的实验研究 [J]. 中国激光, 2009, **36**(3): 630~634
  - 15 Zhang Rongzhu, Cao Xiangke, He Yao. Analysis and detection of the laser noise [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 274~276  
张蓉竹, 曹翔科, 何 耀. 激光器噪声信号的探测与分析 [J]. 光学学报, 2009, **29**(s1): 274~276
  - 16 Liu Kui, Yang Rongguo, Zhang Hailong *et al.*. Noise suppression of single frequency fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1852~1856  
刘 奎, 杨荣国, 张海龙 等. 单频光纤激光器的噪声抑制 [J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1852~1856
  - 17 Q. H. Duong, Q. Le, C. W. Kim. A 95-dB linear low-power variable gain amplifier [J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2006, **53**(8): 1648~1650