

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0331-04

距离选通激光三维成像系统的仿真研究

李思宁 刘 妍 张繁辉 刘 敏 陆 威

(哈尔滨工业大学光电电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 基于激光成像应用背景,重点围绕距离选通激光成像仿真系统展开了研究。通过探讨距离选通激光成像原理,设计了成像系统的仿真方案;分析并研究了系统的各个子模块,进而获得了实现系统的相关技术指标;选用 LabVIEW 软件,构建了仿真系统的各个模块:大气模块、目标模块、噪声模块、收发系统参数模块、信号处理和显示模块;在各仿真模块的基础上集成了距离选通激光成像仿真系统,获得了不同距离和不同模型下的探测成像结果,在远距离 10 km 的情况下,成像距离分辨率达到 1.5 m。最后,通过实际的成像验证实验,验证了距离选通激光成像仿真系统的实用性。

关键词 激光成像;仿真系统;距离选通成像;LabVIEW 软件

中图分类号 TN958.98 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0331

Simulation Research of Laser Three-Dimensional Imaging System Based on Range Gated Technology

Li Sining Liu Yan Zhang Fanhui Liu Min Lu Wei

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Based on the application background of laser imaging radar, the paper mainly researches the technology of gate viewing imaging laser radar. Firstly, through the discussion of the principle of gated imaging laser radar, the simulation scheme of the imaging system is designed. Secondly, each section of the imaging system has been researched, and then the system related technical indicators can be obtained. Thirdly, according to the actual engineering design, the simulation system is built by LabVIEW, including several modules such as atmosphere module, object module, noise module, laser transmitting module, laser receiving module, data processing module and image display module. Finally, the simulation system is integrated on the basis of each module, and then the simulation results can be acquired including the different range results and different model imaging results. And at the range of 10 km, the imaging range resolution can reach 1.5 m. The actual range gated imaging experiment result proves that the simulation system is practical.

Key words laser imaging; simulation system; range gated imaging; LabVIEW software

1 引 言

激光成像系统在军事和工业领域有着广泛的应用前景,其发展一直受到各国的高度关注。非扫描激光成像系统具有体积小、高帧频和大视场的特点,成为激光成像系统发展的主流方向^[1,2]。目前非扫描激光成像主要有 4 种:FM-CW 激光成像、雪崩光电二极管(APD)阵列激光三维成像、条纹管激光成像和距离选通激光成像^[3~9]。其中距离选通激光成像技术是一种较适合于工程化应用的非扫描激光成像技术,该成像技术具有成像分辨率高、器件实现较为成熟、抑

制大气后向散射能力较强等优点。距离选通激光成像系统的仿真研究将为该体制下成像系统的深入研究奠定基础,并对其工程化具有积极的促进作用。

本文选用距离选通成像体制,在此基础上完成激光成像系统理论部分的论证,并对整个方案做出设计。距离选通技术是利用脉冲激光器和选通 CCD,以时间的先后分开不同距离上的散射光和目标的反射光,使由被观察目标反射回来的辐射脉冲刚好在 CCD 选通工作的时间内到达 CCD 并成像。激光器发射很强的短脉冲,脉冲激光对目标进行照

射,由目标反射的激光返回到 CCD。当激光脉冲处于往返途中时,CCD 选通门关闭,这样就挡住了大气中悬浮微粒所引起的后向散射光。当反射光到达 CCD 时,选通门开启,让来自目标的反射光进入 CCD。选通门开启持续时间与激光脉冲一致,这样形成的目标图像主要与在距离选通时间内的反射光有关。

2 仿真设计与实现

针对所要研究的内容,将仿真系统细分为目标模块、噪声模块、大气模块、收发系统参数模块、信号处理模块和显示模块,具体的仿真系统的技术方案如图 1 所示。

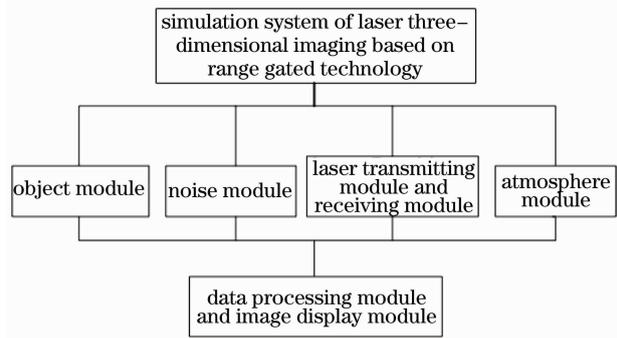


图 1 仿真系统的技术方案图

Fig. 1 Simulation system solution

选用美国国家仪器的 LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) 软件作为仿真平台。LabVIEW 是一种图形化的编程语言,它广泛地被工业界、学术界和研究实验室所接受,视为一个标准的数据采集和仪器控制软件,使用它进行原理研究、设计、测试并实现仪器系统时,可以大大提高工作效率,得到工业界和学术界的普遍认可和好评,特别适合从事科研、开发的科学家和工程技术人员使用。

2.1 激光雷达方程

首先分析基于距离选通的激光成像雷达适用的作用距离方程。经典的激光雷达距离方程可以写为^[10]

$$P_r = P_t \eta_t \cdot \frac{\Gamma}{\Omega R^2} \cdot \frac{\eta_r A_r}{4\pi R^2} \cdot T^2, \quad (1)$$

式中 P_r 为接收激光功率, P_t 为发射激光功率, η_t 为发射光学系统效率, Γ 为目标的散射截面积, R 为作用距离, η_r 为接收光学系统效率, Ω 为激光发射立体角, A_r 为激光接收面积, T 为激光大气透过率。

设 τ 为激光脉冲宽度, E_r 为探测器接收的激光

脉冲能量,则有

$$E_r = P_r \cdot \tau. \quad (2)$$

从上述方程出发,研究激光成像涉及到的各个参数及其影响,并通过分析成像系统的信噪比来说明距离选通激光成像的可行性。

2.2 目标模块

为合理设计激光成像系统,从实用的角度出发,根据给定目标的几何结构和测试状态计算激光雷达截面(Laser radar cross section, LRCS) Γ ^[11]。

目标的激光雷达截面 Γ 可以表示为

$$\Gamma = G \cdot A \cdot \rho = \frac{4\pi}{\Omega_s} \cdot A \cdot \rho, \quad (3)$$

式中 G 为目标增益, A 为激光实际照射目标的面积, ρ 为目标反射率, Ω_s 为目标的后向散射立体角。根据实际情况,假设目标为扩展目标,基于朗伯定理,取目标的后向散射立体角 Ω_s 为 π 。则有

$$\Gamma = 4A \cdot \rho. \quad (4)$$

完全漫反射和完全镜面反射实际上是不存在的。但仍然存在很多可近似地按漫反射和镜面反射处理的情况。

2.3 噪声模块

在直接检测方式下,探测器接收到大量光子,并产生大量的光电子,其噪声出现的概率密度函数可以用高斯概率密度函数来表示。在线性放大条件下,探测器的信号噪声、暗电流噪声、背景噪声和热噪声等噪声之和仍然具有高斯分布的统计特性^[12]。本文的噪声模型采用的是高斯分布来模拟实际噪声,设定高斯噪声的方差为探测系统的噪声等效功率,均值为 0。所以在此情况下添加噪声,可以在成像探测器上获得含有高斯噪声的图像。

2.4 大气模块

大气传输环境对激光成像雷达系统的性能影响较大,雾、雨、雪等天气会使得激光成像的质量变差。在设计激光成像雷达仿真系统的时候,应考虑天气因素及大气环境对激光雷达性能的影响。激光的大气传输特性与激光波长和大气条件有关。激光辐射单色性高、发散小、密度大,假定光传输路径上大气均匀或分层均匀,设作用距离为 R ,则激光雷达方程中的大气透过率为

$$T = \exp[-\sigma(\lambda)R], \quad (5)$$

式中 λ 为激光波长。

而大气总的衰减系数可表示为

$$\sigma(\lambda) = \sigma_{ms} + \kappa_{ma} + \sigma_{as} + \kappa_{aa}, \quad (6)$$

式中 σ_{ms} 为分子散射系数, κ_{ma} 为分子吸收系数, σ_{as} 为气

溶胶散射系数, κ_{na} 为气溶胶吸收系数。在实际仿真中, 可以采用大气仿真软件 BETASPEC 来计算激光束在大气传输中的透过率和后向散射系数。

2.5 收发系统参数模块

该模块涉及到激光收发系统的各个参数, 如激光器脉冲能量、重复频率、脉冲宽度、收发光学系统的视场角, 接收望远镜直径、功耗、重量、体积, 探测器门宽, 探测器分辨率、作用距离、探测灵敏度和成像帧频等。这些参数的初始指标可以通过预先的计算和设计确定。

下面分析信噪比提高值 Δf_{SNR} 。设存在距离选通和非距离选通两种情况, 两者信噪比相除, 就可得到信噪比提高值。

存在距离选通成像时, 系统信噪比

$$f_{SNR-g} = \frac{E_r}{E_{bg} + E_b + E_n},$$

式中 E_r 为回波脉冲能量, E_{bg} 为背景噪声能量, E_b 为激光大气后向散射能量, E_n 为探测器噪声能量。

非距离选通成像时, 成像系统信噪比

$$f_{SNR-ng} = \frac{E'_r}{E'_{bg} + E'_b + E_n},$$

同理, 式中 E'_r 为非选通情况下回波脉冲能量, E'_{bg} 为非选通情况下背景噪声能量, E'_b 为非选通情况下激光大气后向散射能量。

代入相关参数, 可以计算得到 $E_r = E'_r, E'_{bg} \gg$

$E_{bg}, E'_b \gg E_b$ 。所以:

$$\Delta f_{SNR} = \frac{f_{SNR-g}}{f_{SNR-ng}} \gg 1,$$

这说明距离选通成像技术在提高信号探测能力上具有显著优点。

2.6 信号处理模块和显示模块

该模块是激光成像的核心部分, 通过获得强度切片像, 使得多幅切片像合成在一起后得到一幅完整的三维像。目标强度像需要通过仿真实验可以获得, 而目标距离像的获得需要通过目标图像重构等图像处理方法。同时, 在信号处理过程中, 激光发射和接收信号都会随着探测距离的改变而发生变化, 相应的其他信号都集中地通过显示模块得以表示。

最后, 在各仿真模块实现的基础上集成得到距离选通激光三维成像仿真系统, 该仿真系统主要分为参数区、成像区和信号区。

3 仿真结果和成像验证实验

构建完仿真系统后, 针对同一模型, 开展了不同距离的仿真实验并获得了相关的仿真实验结果, 如图 2(a) 为 798 m 处成像, 图 2(b) 为 2397 m 处成像。同时, 针对不同模型, 在距离目标 998 m 处, 分别对汽车和楼房的模型进行成像仿真, 得到如图 3 所示的成像结果。

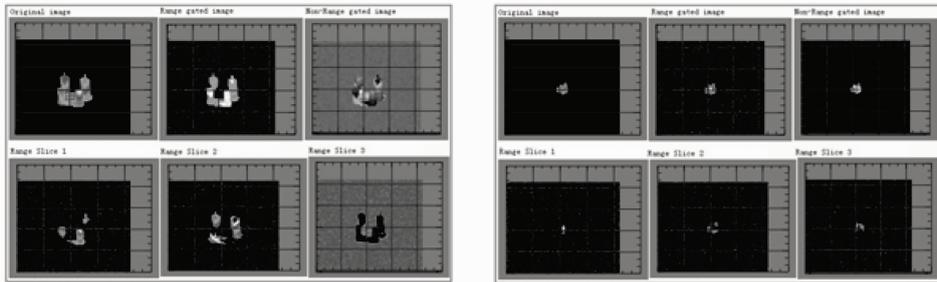


图 2 798 m(a)和 2397 m(b)处的仿真像

Fig. 2 Simulation image at 798 m (a) and 2397 m (b)

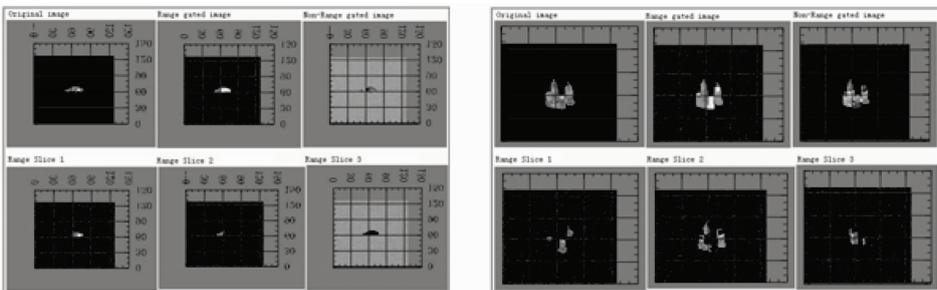


图 3 汽车(a)和大楼(b)目标的仿真像

Fig. 3 Simulation image of the car (a) and the building (b)

距离选通成像和非距离选通成像的区别在于前者可以获得目标三维距离像,而后者仅能得到目标强度像,不能够满足实际成像系统的要求。在上述仿真实验中,仿真成像的分辨率大小均为 128×128 。由图2可知,在视场角和其他成像系统参数不变的情况下,随着成像距离的由近到远,所成像的大小变得越来越小,所成像也越来越模糊。图3的成像结果说明,成像仿真系统对具有不同形状的目标同样适用,只要目标在视场范围内且能够探测到,都可以通过距离选通仿真系统获得该目标三维距离信息。当采用的激光波长为532 nm,输出的单脉冲能量为100 mJ,激光脉宽为10 ns,激光重复频率为100 Hz,探测器门宽为10 ns时,通过仿真实验,仿真系统的距离分辨率达到1.5 m,其作用距离为10 km。

为实际验证仿真系统,开展了实际的成像实验,实验目标为700 m处的高、矮楼,两楼间隔为7.5 m。实验中分别对高楼和矮楼进行了距离选通成像,其成像结果见图4和图5所示。通过和仿真实验成像结果对比可知,理论和实验符合较好。距离选通成像验证实验初步验证了仿真系统的实用性和距离选通成像的技术可行性。

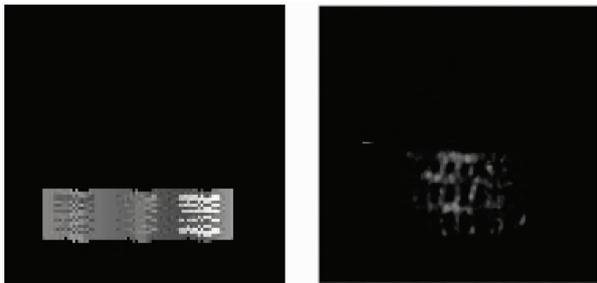


图4 矮楼仿真像和实际成像对照

Fig. 4 Simulation image and actual image of the short building

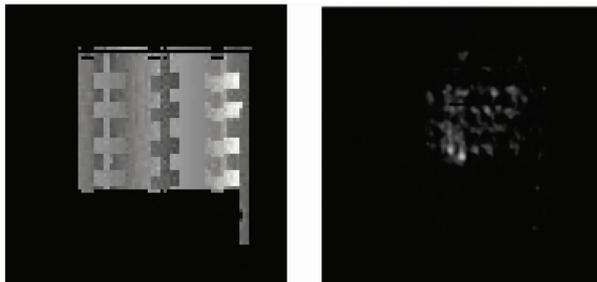


图5 高楼仿真像和实际成像对照

Fig. 5 Simulation image and actual image of the tall building

4 结 论

基于LabVIEW仿真平台,设计并构建了距离选通激光成像仿真系统,通过实际的成像实验结果初步验证了仿真系统的实用性及其理论模型的正确性。下一步工作将通过实验继续验证距离选通激光成像仿真系统,完善该仿真系统并扩大其适用的范围。距离选通激光成像仿真系统将为实物设计中出现的问题提供预见性参考,为实物系统提供可靠性测评标准,对成像系统的深入研究具有重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Anthony D. Gleckler, Asher Gelbart, James M. Bowden. Multispectral and hyperspectral 3D imaging lidar based upon the multiple slit streak tube imaging lidar [C]. *SPIE*, 2001, **4377**: 328~335
- 2 Andrew J. Nevis. Automated processing for streak tube imaging lidar data[C]. *SPIE*, 2003, **5089**: 119~129
- 3 Barry Stann, Mark Giza, Dale Robinson *et al.*. A scannerless imaging lidar using a laser diode illuminator and FM/CW radar principles[C]. *SPIE*, 1999, **3707**: 421~431
- 4 Brian F. Aull, Andrew H. Loomis, Douglas J. Young *et al.*. Three-dimensional imaging with arrays of Geiger-mode avalanche photodiodes[C]. *SPIE*, 2004, **5353**: 105~116
- 5 Li Sining, Guang Yuhao, Zang Junheng *et al.*. Analysis and design of data processing system based on streak tube imaging lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 943~946
李思宁, 广宇昊, 臧俊恒等. 条纹管激光成像雷达数据处理系统分析与设计[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 943~946
- 6 Wei Jingsong, Cheng Yuanli, Xu Qiang *et al.*. Imaging by single-slit streak tube laser lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 496~500
魏靖松, 程元丽, 徐强等. 单狭缝条纹管激光雷达的成像[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 496~500
- 7 Xu Xiaowen, Guo Jin, Yu Qianyang *et al.*. Key technique of laser range gated imaging[J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(6): 603~605
徐效文, 郭劲, 于前洋等. 激光距离选通成像关键技术[J]. *激光技术*, 2003, **27**(6): 603~605
- 8 Li Quan, Liu Zejin, Shu Bohong *et al.*. Scheme design for laser range gated imaging system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(1): 33~36
黎全, 刘泽金, 舒柏宏等. 主动成像系统距离选通实验方案设计[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(1): 33~36
- 9 Yuan Pusheng, Liu Qi. Non-scanning 3-D range-gated imaging lidar experimental system [J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(2): 147~150
原蒲升, 刘琦. 无扫描3-D距离选通成像激光雷达实验系统[J]. *大气与环境光学学报*, 2008, **3**(2): 147~150
- 10 G. W. Kamerman. *The Infrared and Electro-Optical System Handbook*[M]. SPIE Press, 1993, **6**: 10~99
- 11 Chen Jinling, Shi Chuan, Xu Zhengfeng *et al.*. Design of simulation software for lidar system[J]. *China Measurement & Testing Technology*, 2007, **33**(5): 106~108
陈金令, 石川, 徐征峰等. 直接探测激光雷达系统的仿真软件设计[J]. *中国测试技术*, 2007, **33**(5): 106~108
- 12 Zhang Yu, Tang Meng, Chen Zhongxian *et al.*. Modeling and simulation of lidar for direct detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(6): 572~575
张宇, 唐勳, 陈钟贤等. 直接探测激光雷达系统的建模与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(6): 572~575