

# 增益调制非扫描激光雷达距离像的仿真及实验验证

唐 勳 赵 远 张 宇 靳辰飞 张 勇 吴 杰 孙秀冬

(哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 仿真研究有助于增益调制非扫描激光雷达系统设计的优化, 并对其构成和成像原理进行分析。建立了增益调制非扫描激光雷达的理论模型, 提出一个用于雷达成像的标准目标, 根据所建立的理论模型和成像过程, 编制了仿真软件, 对增益调制非扫描激光雷达系统进行仿真模拟, 并与实验结果进行对比。仿真实验结果与实验结果的一致性表明, 仿真模型比较贴近实际, 有助于增益调制非扫描激光雷达系统的方案设计和参数优化。

**关键词** 激光技术; 激光雷达; 增益调制; 系统仿真; 非扫描

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0414001

## Simulation and Experimental Verification of Gain-Modulated Scannerless Lidar Range Image

Tang Meng Zhao Yuan Zhang Yu Jin Chenfei Zhang Yong Wu Jie Sun Xiudong

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** Simulation research helps to aid and optimize the designing of gain-modulated scannerless lidar, and helps to analyze the configuration and imaging principle. A theoretical model of the gain-modulated scannerless imaging lidar system is established. A simulation software for gain-modulated scannerless lidar is programmed according to the theoretical model. Simulation results and experimental results show that it is helpful for the designing and parameter optimizing of gain-modulated scannerless lidar.

**Key words** laser technique; lidar; gain-modulated; system simulation; scannerless

**OCIS codes** 040.1520; 040.5160; 140.5670; 280.3640; 280.4570

### 1 引 言

成像激光雷达在军事、气象、导航及遥感等领域具有重要的应用前景。成像激光雷达从成像体制上可以分为扫描成像和非扫描成像两大类。其中非扫描成像激光雷达不需要光机扫描装置, 具有成像速度快、帧频高、功耗低、体积小等优点, 越来越显示其优越性, 也成为近年来的研究热点<sup>[1~8]</sup>。增益调制非扫描激光雷达是近年来发展起来的一种新型非扫描激光雷达。它采用泛光场或阵列照明, 直接照明目标, 同时在接收端用增益调制的增强型 CCD (ICCD) 接收回波, 经两帧或多帧比较计算得到目标

距离信息。增益调制非扫描激光雷达采用了成熟的阵列成像元件 ICCD, 具有技术成熟、价格低廉等优势, 是非扫描激光雷达的重要发展方向之一<sup>[5~8]</sup>。

由于采用增益调制的非扫描激光雷达系统成像原理新颖, 整体结构复杂, 器件性能种类指标繁多, 使得雷达设计研制难度增大。各单元器件的选择和整体设计都需要大量的实验结果作依据。计算机仿真可以减轻实验工作的压力, 对于优化系统设计、降低实验成本、减少失败风险和预测能力等方面都有着重要作用。因此, 本文研制了增益调制非扫描脉冲成像激光雷达仿真软件。首先通过对系统成

**收稿日期**: 2010-09-13; **收到修改稿日期**: 2010-12-06

**基金项目**: 总装预研基金(9140A01040307HT0125)资助课题。

**作者简介**: 唐 勳(1976—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事光电信号探测器件及仿真方面的研究。

E-mail: tangmeng1976@126.com

**导师简介**: 孙秀冬(1963—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光电探测及光信息存储领域的研究。

E-mail: xdsun@hit.edu.cn

像原理的分析,建立了系统各部分的仿真模型。结合仿真模型和目标,实现了仿真过程,可以得到目标的距离图像和强度图像。区别于以往的扫描成像激光雷达的单点仿真模型<sup>[9,10]</sup>和雪崩二极管(APD)阵列成像雷达仿真模型<sup>[11]</sup>,本文的仿真模型首先针对每一个成像单元获得的图像灰度值独立进行计算,并在每个成像单元上加入符合其分布规律的随机噪声,最后考虑了成像系统的调制传递函数对成像效果的影响。调整仿真软件中雷达各部分的参数,可以方便直观地获知这些参数如何影响雷达的成像,从而优化系统设计。

## 2 系统建模

### 2.1 系统构成和成像原理

采用脉冲激光器作发射光源,经发射光学系统整形照明整个视场,ICCD 阵列探测器作为成像探测器组成的增益调制非扫描激光雷达系统结构如图 1 所示:计算机通过控制器,使激光器发出激光脉冲,经发射光学系统照射到目标表面,并取其中一部分激光经由 PIN 型光电二极管反馈回计算机,作为计时起点。同时控制调节调制器让 ICCD 工作在指定的增益模式。当目标表面反射回来的激光,被接收光学系统接收,分别经过光电阴极、选通门、微通道板(MCP)及荧光屏,经光纤耦合被 CCD 转换为图像,在计算机中存储和显示。

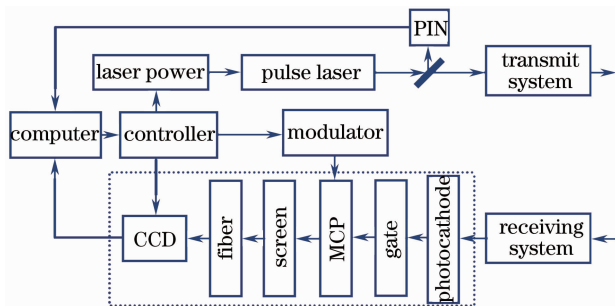


图 1 增益调制型非扫描脉冲成像激光雷达系统原理结构

Fig. 1 Structure of gain-modulated scannerless pulse imaging lidar

系统在脉冲工作方式下可以完成两帧强度像构建一幅距离像的功能。激光器发射脉冲的同时,利用电压调制使 ICCD 的增益随时间单调线性变化,回波脉冲到达像增强器的时刻所对应的增益就和脉冲的往返时间成线性关系,脉冲的往返时间对应于目标点的距离,最终在 CCD 获得的图像包含了两种信息:目标回波强度分布信息和目标各点回波的增

益信息,即距离信息。下一帧在某个给定的常数增益下,对目标成一幅强度像,这帧像中只包含目标回波的强度分布信息。两帧图像做比较,将图像中的强度信息去掉,再经过数学解算,就得到了目标的距离信息。系统的工作时序如图 2 所示。

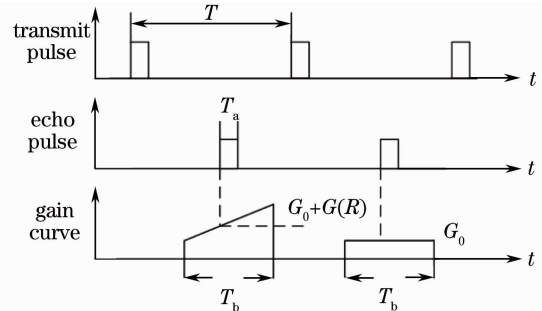


图 2 增益调制非扫描成像激光雷达时序图

Fig. 2 Time sequences of gain-modulated scannerless imaging lidar

### 2.2 系统仿真模型的建立

#### 2.2.1 单脉冲仿真成像的几何模型

先考虑系统在一个激光脉冲作用下的输出图像。单脉冲成像过程的几何模型如图 3 所示。激光器发出一个脉冲光,经大气入射至目标。再经目标反射,被探测器接收,经图像处理,得到此脉冲的图像。根据阵列成像器件的分辨率,把目标划分为  $m \times n$  单元,分别对每个单独的成像单元计算,组合起来就得到了单脉冲的雷达成像。

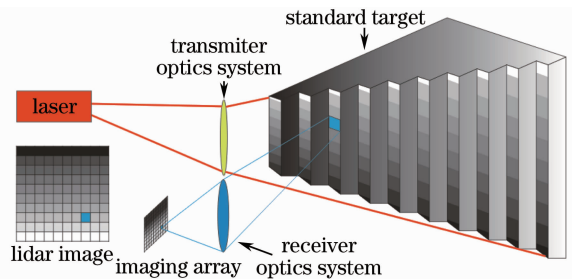


图 3 雷达成像系统的几何模型

Fig. 3 Viewing geometry molding of imaging lidar system

#### 2.2.2 成像目标模型

仿真程序中,采用两个二维数组描述目标:距离数组和反射率数组,数组的大小与 CCD 像元数一致。数组的元素分别对应目标相对于探测器的距离和目标表面的反射率。也可以用数字化后的实际目标作为仿真程序的成像目标。将目标按照对接收视场等立体角原则划分为若干单元,单元数与接收机的 ICCD 像原数一致,可以在软件初始化时调节。

考察对目标的成像和测距性能,就可以对实际

目标成像结果做出预测,并对雷达的成像性能和成像质量进行分析。

### 2.2.3 能量增益模型

若 CCD 像元数为  $m \times n$ ,将系统输出成像划分为  $m \times n$  等份,分别计算 CCD 输出的各单独像元输出的灰度值。在不计图像噪声和系统光学传递函数的情况下,由发射激光脉冲引起的 CCD 单元图像灰度值为

$$I_{\text{ccd}ij} = \text{int} \left( \frac{N_{\text{e}ij}}{C_{\text{FW-ccd}}} \times 2^{N_{\text{AD}}} \right), \quad (1)$$

式中

$$N_{\text{e}ij} = \frac{P_t \tau_t \eta_{\text{atm}} \alpha_{\text{atm}}^{2R_{ij}} \eta_{\text{post}} \eta_{\text{ost}} \rho_{ij} D_r^2 \lambda^2 K_1 \eta_m U_p e G_m \eta_p \eta_{\text{ccd}} \eta_{\text{fiber}}}{8R_{ij}^2 m n h^2 c^2} \quad (2)$$

为 CCD 单元光电子数,  $P_t$  为激光器峰值功率,  $\tau_t$  为脉冲激光器脉宽,  $\eta_{\text{atm}}$  为与照明方式有关的照明效率,  $\alpha_{\text{atm}}$  为大气传输的吸收和散射系数,  $D_r$  为接收系统

口径,  $\eta_{\text{ost}}$  为发射光学系统效率,  $\eta_{\text{osr}}$  为接收光学系统效率。  $K_1$  为光电阴极光电转换量子效率,  $\eta_m$  为光电阴极-微通道板耦合效率,  $G_m$  为 MCP 增益,  $U_p$  为微通道板末端和荧光屏间的加速电压,  $\eta_p$  为荧光屏的转换效率,  $\eta_{\text{fiber}}$  为耦合光纤的传输效率,  $\eta_{\text{ccd}}$  为 CCD 的光电转换效率,  $m \times n$  为 CCD 像元数,  $\lambda$  为激光波长,  $c$  为光速,  $h$  为普朗克常数,  $e$  为电子电量。  $C_{\text{FW-ccd}}$  为 CCD 单元满井电荷,  $N_{\text{AD}}$  为 CCD 的 A/D 转换位数。  $\text{int}$  为取整函数。

### 2.2.4 噪声模型

系统本身会产生光子和电子噪声。通过对信号和噪声的比较可以确定雷达的探测距离、距离分辨率和距离精度等性能参数。系统的噪声主要由以下几个部分组成:背景噪声,入射信号光子的量子噪声,光阴极暗电流噪声,CCD 暗电流噪声,CCD 读出噪声<sup>[12]</sup>。设单元总噪声电子数为  $N_{\text{noise}ij}$ ,有<sup>[13]</sup>

$$N_{\text{noise}ij} = \sqrt{(N_{\text{bk}}^2 F^2 + N_{\text{e}ij} F^2 + 2 \frac{i_{\text{thd}}}{e} S_{ij} T_{\text{MAX}} G_m F^2) \eta_{\text{ccd}} + 2 \frac{i_{\text{ccd}}}{e} S_{ij} T_{\text{MAX}} + 2N_r^2}, \quad (3)$$

式中  $N_{\text{bk}}$  为背景噪声光子数,  $F$  为像增强器噪声因子,  $i_{\text{thd}}$  为光电阴极暗电流密度,  $i_{\text{ccd}}$  为 CCD 暗电流密度,  $S_{ij}$  为单元像管横截面积,  $N_r$  为 CCD 读出噪声电子数,  $T_{\text{MAX}}$  为有效积分时间,即选通门时间。

其中量子噪声、像增强器噪声、光电阴极和 CCD 暗电流噪声近似符合泊松分布<sup>[14]</sup>, CCD 的读出噪声符合均匀分布。仿真计算时, (3) 式中的每一项分别乘以相应分布的随机因子。

则输出噪声图像单元灰度均值为

$$I_{\text{ccd}ij} = \text{int} \left( \frac{N_{\text{noise}ij}}{C_{\text{FW-ccd}}} \times 2^{N_{\text{AD}}} \right). \quad (4)$$

### 2.2.5 调制传递函数模型

对于成像系统,可以用系统的光学传递函数 (OTF) 评价成像系统的成像质量。对于非相干成像系统,用调制传递函数 (MTF) 来评价成像质量则更为简便。增益调制非扫描雷达系统可以看作是由一定频率响应特性的分系统组合而成的整体。在非相干成像和线性系统条件近似满足的前提下,整个系统的传递函数为各个分系统的调制传递函数的乘积。各个分系统的调制传递函数如下:

二代像增强器调制传递函数为<sup>[15]</sup>

$$T_{\text{II}}(f) = \exp \left[ - \left( \frac{f}{f_c} \right)^n \right], \quad (5)$$

光纤面板的调制传递函数为<sup>[16]</sup>

$$T_{\text{fiber}}(f) = \frac{2J_1(2\pi a f)}{2\pi a f}, \quad (6)$$

CCD 相机的调制传递函数为<sup>[16]</sup>

$$T_{\text{ccd}}(u, r) = \text{sinc} \left( \frac{\pi d_x u}{l_x u_x} \right) \text{sinc} \left( \frac{\pi d_y r}{l_y u_y} \right), \quad (7)$$

接收光学系统的调制传递函数为<sup>[15]</sup>

$$T_{\text{lens}}(f) = \frac{2}{\pi - 2} \left[ \arccos \left( \frac{f}{f_c} \right) - \sin \left[ \arccos \left( \frac{f}{f_c} \right) \right] \right], \quad (8)$$

则系统整体调制传递函数为

$$T = T_{\text{lens}}(f) \times T_{\text{II}}(f) \times T_{\text{fiber}}(f) \times T_{\text{ccd}}(u, r). \quad (9)$$

### 2.2.6 CCD 图像的合成与距离图像的获取

$m \times n$  个单元的图像灰度值和单元噪声图像灰度值计算完毕后,就得到了激光脉冲产生的 CCD 输出图像  $I_{\text{signal}}$  和由噪声引起的 CCD 输出图像  $I_{\text{noise}}$ 。再由 (9) 式,考虑系统的调制传递函数,最后可得仿真的 CCD 输出图像

$$I_{\text{final}} = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} \{ I_{\text{signal}} + I_{\text{noise}} \} \times T \}, \quad (10)$$

式中  $\mathcal{F}\{\}$  为傅里叶变换。

由系统成像原理可知,得到目标的距离图像至少需要 2 个脉冲的仿真结果:恒定增益条件下成像一次,得到恒定图像  $I_c$ ;变增益条件成像下一次,得变增益图像  $I_v$ 。设增益调制函数为  $f_G(t)$ ,由  $f_G(t)$

函数的单调性得知一定存在反函数  $f_G^{-1}(G)$ , 则距离图像

$$I_R = \frac{c}{2} f_G^{-1} \left( G_0 \frac{I_v}{I_c} \right). \quad (11)$$

### 3 仿真软件设计与实现

仿真软件采用 Visual C# 和 Matlab 语言进行混合编程实现。仿真软件的总体结构如图 4 所示。系统初始化时,按照雷达系统的各模块分别将系统器件参数、目标距离文件、目标反射率文件及大气参数输入软件中,经仿真模块计算分别得到 ICCD 恒定增益模式下输出的恒增益图像和变增益模式输出的变增益图像。将两幅灰度图像经图像预处理后进行距离解算,再经过图像处理,最后得到仿真的距离图像和反射率图像。软件的系统器件参数输入界面如图 5 所示。各参数输入完毕,可以进行仿真运算,并以仿真图像的形式查看仿真结果,包括雷达获得的距离图像,以及在系统运行的中间结果。

### 4 仿真结果及实验验证

#### 4.1 仿真结果

以一个航天飞机为仿真目标的距离图像和反射率图像如图 6 所示。距离像采用常用的色标表示法,即用像素的不同颜色或灰度表示距离。在图 6(a)右侧的色标中给出了距离值与颜色的标定关系。可以看出,目标距离雷达的范围为 80 ~ 250 m。图 6(b)给出了目标的反射率,同样采用了色标标定,由像素的灰度值表示反射率。

输入非扫描激光成像雷达参数,并作用于上述目标,可以得到最后 CCD 的输出结果和光子、电子在雷达系统中传递中间结果,从而可以对雷达分系统性能做出定量的估计。该仿真采用的主要输入参

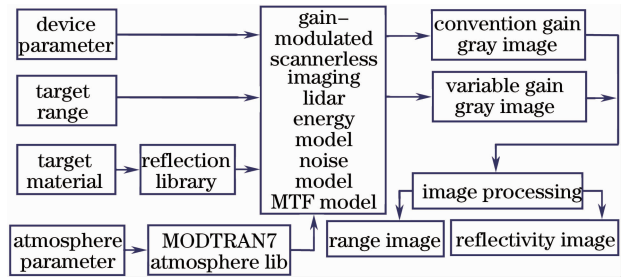


图 4 仿真软件结构框图

Fig. 4 Block diagram of simulation software



图 5 仿真软件输入系统参数界面

Fig. 5 Parameters input interface of the simulator software

数如表 1 所示。

光电子经过 MCP 倍增,此时 MCP 上所获得的增益有两种模式,恒定增益和变增益,分别如图 7 所示。

在这样的增益作用下,CCD 在恒定增益和变增益将分别得到不同的图像输出,如图 8 所示。

对比图 6 的目标距离像,从图 8 中可以看出,不同距离对应雷达回波的强弱不同,距离越远的地方回波越弱: A, B 处回波比 C, D 处强得多。由于 MCP 增益的存在,两图中同样位置 A, C 弱于 B, D。这是由于图 7(b)中变增益函数的效果。不同的增益函数产生的效果并不相同,在仿真软件中可以设置不同的增益函数以考察其对雷达成像的影响。

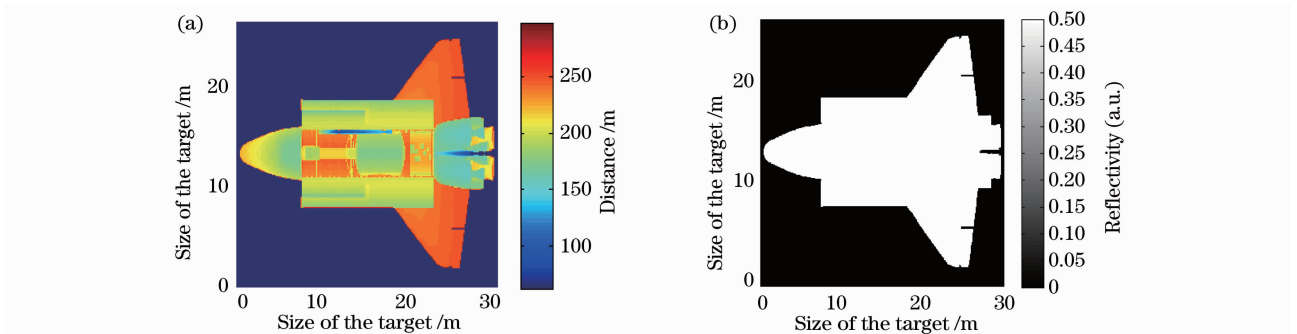


图 6 目标距离图像(a)和反射率图像(b)

Fig. 6 Target range image (a) and reflectivity image (b)

表 1 仿真目标为航天飞机采用的主要参数

Table 1 Main parameters of simulation when target is the shuttle

Transmitting and receiving unit		MCP	
Laser pulse width	10 ns	Coupling efficiency	30%
Peak power	1000 kW	Strobing gate width	3410 ns
Wave length	532 nm	Strobe gate delay	500 ns
Emission system efficiency	80%	Gain mode	Liner
Receiving system efficiency	85%	Starting gain	80
Receiving antenna diameter	50 mm	Gain slope	$8 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$
Atmospheric transmissivity	0.8	Dark current	$10^{-10} \text{ A/m}^2$
Photocathode		CCD	
Sensitive area	$254.5 \text{ mm}^2$	Resolution pixel	$256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$
Dark current	$10^{-12} \text{ A/m}^2$	Pixel width	$7.4 \text{ }\mu\text{m}$
Quantum efficiency	8.8%	AD conversion factor	20
Fluorescent screen		Dark current	$2 \times 10^{-8} \text{ A/m}^2$
Conversion efficiency	20%	Full well charge	30000
Accelerating voltage	7000 V	AD conversion digit	12 bit
Dark current	$1 \text{ }\mu\text{A}$		

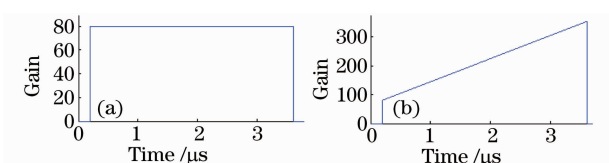


图 7 微通道板增益函数。(a)恒定增益,(b)变增益  
Fig. 7 Gain-function of MCP. (a) convention gain,  
(b) variable gain

根据 CCD 相机输出的恒定增益图像和变增益图像,可以解算出目标的距离信息。经过适当处理后,如图 9 所示。可见,计算出来的距离范围(80~260 m)与图 6 的标准值(80~250 m)符合得很好。即使由于噪声的存在,仍可分辨航天飞机的各主要部分及它们的距离。

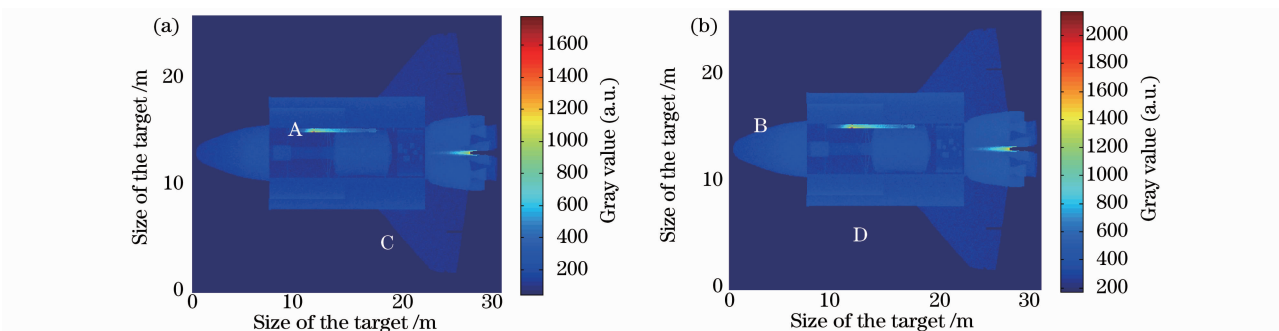


图 8 CCD 相机成像仿真结果。(a)恒定增益成像,(b)变增益成像  
Fig. 8 Output images by CCD with (a) convention and (b) variable gain

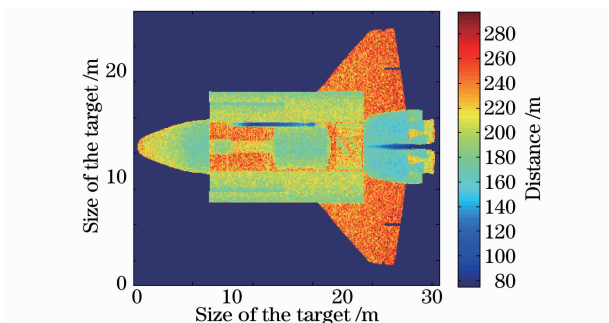


图 9 解算出来的距离图像  
Fig. 9 Resolved range image

## 4.2 实验验证

为验证仿真软件的真实性和可靠性,搭建了一套实验系统(见图 1),系统由激光器、发射光学系统、可编程延时发生器、同步控制系统、接收光学系统、ICCD、距离预制系统和数据采集处理系统组成。实验系统的发射单元(包含脉冲激光器和发射光学系统)和接收单元(含接收光学系统和 ICCD 相机)如图 10 所示。

系统采用激光二极管抽运声光调 Q 固体 Nd:YAG 激光器,激光工作在 532 nm 波长,脉冲宽度

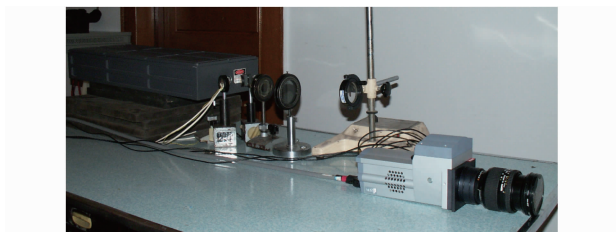


图 10 实验系统的发射和接收单元

Fig. 10 Transmitting and receiving unit of the experimental system

为10 ns,激光器的重复频率为 5 kHz,激光的单脉冲能量为 0.2 mJ。采用的 ICCD 相机为 256 pixel×256 pixel,像素大小为 16 μm×16 μm,最大帧频为 225 Hz。像增强器的光电极为 S25,光谱响应范围为 200~900 nm。选通门宽度 3 μs。增益调制函数为线性调制。像增强器敏感面的直径为 18 mm,通过光纤耦合到 CCD。系统的选通门时序通过可编程延时器进行控制,时间延迟由可编程的模拟延迟线来产生,延时步长为 0.5 ns,最大延迟时间为 3 μs,最小延迟时间为 15 ns。成像系统由于 PIN 型光电二极管、同步控制电路、可编程延时器以及 ICCD 的固有延时,存在着一个 250 ns(对应距离为

37.5 m) 的成像盲区。接收光学系统采用直径 67 mm 的光学镜头,镜头焦距为 300 mm,镜头前带有窄带滤光片,滤光片的中心波长为 532 nm,光学带宽为 5 nm。

实验成像的目标为 5 块间距为 1.5 m,相互错开 20 cm 的泡沫板阵列,其表面反射率约为 0.4。其中最前面的一块泡沫板距离激光器 50 m,如图 11 所示。将此目标位置和反射率数字化,如图 12 所示。与实验系统其他参数一起输入仿真软件,仿真采用的输入参数如表 2 所示。经过仿真计算和图像处理,获得的距离图像如图 13 所示。实验获得的距离图像如图 14 所示。



图 11 成像实验中的实际目标照片

Fig. 11 Target's picture of imaging experiment

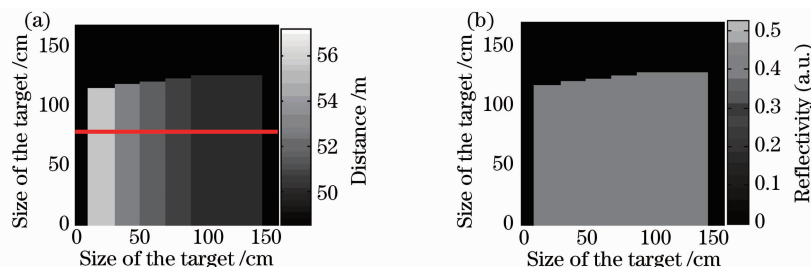


图 12 数字化后的目标距离(a)和反射率图像(b)

Fig. 12 Digitized range image (a) and reflective image of the target (b)

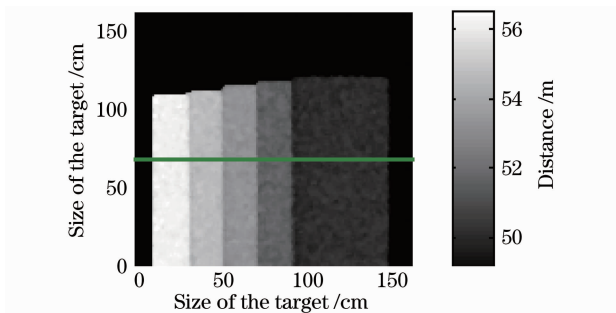


图 13 仿真计算获得的距离图像

Fig. 13 Range image from simulation

为了更清晰地对比仿真结果与实验结果,观察距离图像的一个剖面,在目标中部,图像纵坐标 150 pixel 处将图像横向切开,如图 12~14 中的红绿

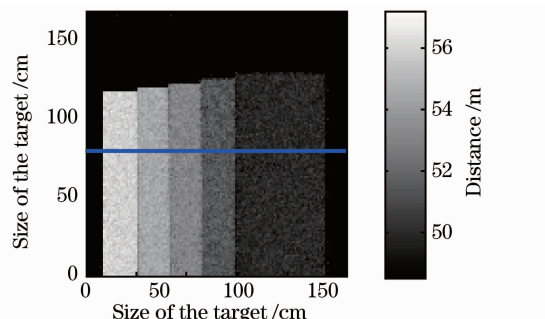


图 14 实验获得的距离图像

Fig. 14 Range image from the experiment

蓝 3 条直线(彩图详见电子版)。详细的比照结果如图 15 所示。图中横坐标表示像素,纵坐标表示距离值,红绿蓝 3 条曲线(彩图见电子版)分别表示实际

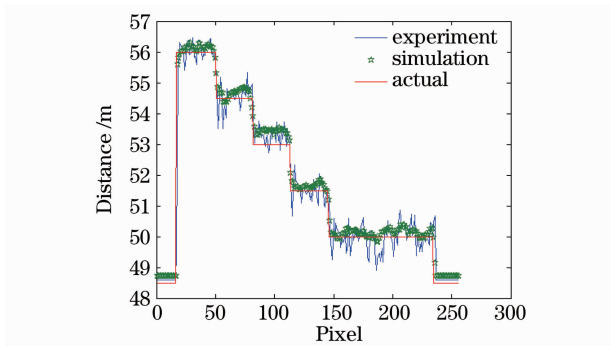


图 15 实验、仿真和实际距离图像剖面对比

Fig. 15 Contrast of experimental simulation and actual profile

距离、仿真计算得到的距离和实验测得的距离。受各种噪声影响,仿真值和实测值都围绕着实际距离上下波动,但仍可分辨出5块泡沫板。可见,仿真

结果与实验结果都比较接近于实际目标且符合较好,进一步证实了仿真模型的真实性和有效性。

## 5 结 论

在分析增益调制非扫描激光雷达距离成像原理的基础上,建立了增益调制非扫描激光雷达的仿真模型并编程实现。通过对雷达和目标参数的计算和对各种实际噪声的模拟,可以仿真雷达对目标的成像过程,并获得目标的距离像。成像的结果与本文搭建的实际系统很好地符合,说明该仿真模型比较贴近现实。改变仿真雷达系统的输入参数和目标参数,可以方便地对不同器件参数、不同探测目标条件下雷达的成像结果进行预测,在一定程度上可以代替实际系统,节省了雷达设计的资源和时间,对雷达的设计和优化起到很好的辅助作用。

表 2 仿真目标为泡沫板阵列采用的主要仿真参数

Table 2 Main parameters of simulation when target is the cystosepiment array

Transmitting and receiving unit		MCP	
Laser pulse width	10 ns	Coupling efficiency	30%
Peak power	20 kW	Strobing gate width	60 ns
Wave length	532 nm	Strobe gate delay	320 ns
Emission system efficiency	75%	Gain mode	Liner
Receiving system efficiency	85%	Starting gain	80
Receiving antenna diameter	67 mm	Gain slope	$8 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$
Atmospheric transmissivity	0.9	Dark current	$10^{-10} \text{ A/m}^2$
Photocathode		CCD	
Sensitive area	$254.5 \text{ mm}^2$	Resolution pixel	$256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$
Dark current	$10^{-12} \text{ A/m}^2$	Pixel width	$16 \mu\text{m}$
Quantum efficiency	8.8%	AD conversion factor	20
Fluorescent screen		Dark current	$2 \times 10^{-8} \text{ A/m}^2$
Conversion efficiency	20%	Full well charge	$6 \times 10^4$
Accelerating voltage	6000 V	AD conversion digit	12 bit
Dark current	$1 \mu\text{A}$		

## 参 考 文 献

- 1 J. Christopher Dries, Brian Miles, Roger Stettner. A  $32 \times 32$  pixel FLASH laser radar system incorporating InGaAs PIN and APD detectors[C]. *SPIE*, 2004, **5412**: 250~256
- 2 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
- 3 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. Two-dimensional imaging experiment of a point target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 566~568  
周煜,许楠,栾竹等.实验室合成孔径激光雷达点目标二维成像实验[J].*光学学报*, 2009, **29**(2): 566~568
- 4 Zhang Yong, Zhao Yuan, Liu Liping *et al.*. Range resolution improvement of scannerless laser radar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1270~1274  
张勇,赵远,刘丽萍等.一种提高非扫描激光雷达距离分辨率的方法[J].*光学学报*, 2009, **29**(5): 1270~1274
- 5 J. Wm. Edwards. Image-processing method of modeling under water imagery from gated and gain-modulated scannerless range imagers[C]. *SPIE*, 2000, **4039**: 124~134
- 6 William Ruff, John Bruno, Steve Kennerly. Self-mixing detector candidates for an FM/CW lidar architecture[C]. *SPIE*, 2000, **4035**: 152~162
- 7 Jin Chenfei, Zhao Yuan, Zhang Yong *et al.*. Experimental research on a scannerless 3D imaging laser radar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1383~1387  
靳辰飞,赵远,张勇等.一种无扫描三维成像激光雷达的实验研究[J].*中国激光*, 2009, **36**(6): 1383~1387
- 8 Wang Fei, Zhao Yuan, Zhang Yong *et al.*. Multi pulse gain-modulated three-dimensional imaging system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1961~1966  
王飞,赵远,张勇等.多脉冲增益调制三维实时成像系统[J].*中国激光*, 2010, **37**(8): 1961~1966

- 9 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, 唐勤, 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
- 10 Yi Xiang, Wang Weiran. Numerical simulation for lidar system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 21~23  
易翔, 王蔚然. 激光雷达系统的数值仿真[J]. *光子学报*, 2004, **33**(1): 21~23
- 11 Michael E. O'Brien, Daniel G. Fouche. Simulation of 3D laser radar systems[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, **15**(1): 37~60
- 12 Zhao Yuan, Xu Yuannan, Jin Chenfei *et al.*. Sensitivity equation of scannerless pulse imaging lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(1): 62~65  
赵远, 许元男, 靳辰飞等. 非扫描脉冲成像激光雷达灵敏度方程[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(1): 62~65
- 13 David Dussault, Paul Hoess. Noise performance comparison of ICCD with CCD and MCCD cameras [C]. *SPIE*, 2004, **5563**: 195~204
- 14 Zhu Yongjian, Chen Qian, Wang Xiaoxuan. Study on real-time low-light level image synthesis for scene matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 362~366  
祝永坚, 陈钱, 王晓璇. 微光景像匹配实时图模拟生成技术研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 362~366
- 15 Mai Weilin. OTF and Its Math and Physics Foundations[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979. 314~319  
麦伟麟. 光学传递函数及其数理基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979. 314~319
- 16 Xiao Liang, Wu Huizhong, Liu Yang *et al.*. Modeling and simulation of digital scene image synthesis [J]. *Acta Armamentarii*, 2005, **26**(1): 113~117  
肖亮, 吴慧中, 刘扬等. 数字景像匹配图模拟生成的建模与仿真[J]. *兵工学报*, 2005, **26**(1): 113~117