

# 基于 532 nm 激光目标回波脉冲宽度的成像实验研究

周 鑫<sup>1</sup> 孙剑峰<sup>1</sup> 姜 鹏<sup>2</sup> 熊卫华<sup>1</sup> 王 骐<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐(气体)激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

<sup>2</sup> 北京机电工程研究所, 北京 100074

**摘要** 激光主动成像雷达在宽景深复杂场景目标成像探测过程中, 由于远距离目标回波信号幅度较小, 导致在强度像上缺失, 影响了目标探测识别率。针对此问题, 提出通过检测激光回波脉冲宽度生成激光二维平面像, 即脉宽像, 使用脉宽像完成宽景深远距离目标检测。利用条纹管激光成像雷达对复杂场景建筑物群进行推扫成像实验, 分别获得了强度像、距离像和脉宽像。对脉宽像进行数据统计分析, 结果表明, 脉宽像的视觉效果优于强度像, 相对于强度像, 可将远场目标清晰呈现; 不同的建筑物, 其回波脉宽平均值不同; 且光束入射角、目标的材质与回波脉宽密切相关; 不同入射角的两个白色墙壁, 其回波脉宽相差为 2, 玻璃与粉色的墙回波脉宽相差为 4.7; 而目标颜色(白色、粉色)对 532 nm 回波脉宽影响较小, 回波脉宽相差仅为 0.2。证明脉宽像可有效提高宽景深远距离目标探测率。

**关键词** 成像系统; 激光成像雷达; 激光回波; 脉冲宽度; 脉宽像

**中图分类号** TN29 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.s111002

## Imaging Experimental Study Based on the Width of 532 nm-Laser Target Echo Pulse

Zhou Xin<sup>1</sup> Sun Jianfeng<sup>1</sup> Jiang Peng<sup>2</sup> Xiong Weihua<sup>1</sup> Wang Qi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable (Gas) Laser, Institute of Opto-Electronic, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

<sup>2</sup> Beijing Electro-Mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China

**Abstract** Laser active imaging radar over a wide depth of field and complex-scene target imaging process, because the remote target echo-signal amplitude is smaller, resulting in a lack of effect on the intensity image, and affecting the target detection and recognition rate. Aiming at this problem, the detection of laser echo pulse width to generate laser two-dimensional image is put forward, which is called the pulse-width image, and the pulse-width image is used to detect the wide depth of field and far-reaching distance target. Using the streak tube laser imaging radar scan imaging experiments on multiple building group, the intensity image, range image and pulse-width image are obtained respectively. Analysing by statistical data, the results show that the visual effect of the pulse-width image is better than the intensity image, relative to the intensity image, the pulse-width image can clearly show the far-field targets; for different buildings, the average value of echo pulse width are different, and the beam incident angle, target material is closely related with the echo pulse width; white walls of two different-incident angles, the echo pulse-width difference is 2, the pulse-width of glass and the pink wall differ by 4.7, while the target color (white, pink) has little effect on the 532nm echo pulse width, the difference of pulse width is only 0.2. It proves that the pulse-width image can effectively improve the wide depth of field and far-reaching distance target detection rate.

**Key words** imaging systems; laser imaging radar; laser echo; pulse width; pulse-width image

**OCIS codes** 110.4190; 280.3640; 100.2960

**收稿日期:** 2015-01-25; **收到修改稿日期:** 2015-03-09

**作者简介:** 周 鑫(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光图像处理、目标特性分析等方面的研究。E-mail: hit\_sxzx@163.com

**导师简介:** 孙剑峰(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光图像处理及目标识别方面的研究。

E-mail: sjf@hit.edu.cn

# 1 引 言

激光成像雷达是一种主动式光电成像技术,在获得回波信息(波形、振幅、脉宽等)的同时,能够重构出反映目标空间位置信息的三维几何距离像和目标材质特征的强度像。它的一个重要的应用方向就是目标识别<sup>[1-2]</sup>,并且在测绘、侦察等方面具有潜在的价值<sup>[3]</sup>。

目前,激光成像雷达的目标识别研究主要是基于激光雷达所获得的强度像和距离像进行目标识别。Douglas等<sup>[4]</sup>对强度像与距离像在进行三维傅里叶变换之后,利用两位模板相关技术进行目标识别。哈尔滨工业大学刘正君等<sup>[5]</sup>采用组合距的神经网络方法进行了相干激光雷达距离像目标识别的仿真研究,证明该方法在目标识别性能上具有优势。Stephen等<sup>[6]</sup>将距离像中提取的目标几何特征以及强度像中提取的反射系数特征进行融合,然后利用混合的模糊-神经网络分类器进行目标识别。课题组也进行了一些目标识别研究,提出利用支持向量机对成像激光雷达的真、假建筑物的强度像进行识别且仿真目标距离像进行目标识别,以及利用支持向量机分类器对强度像进行分类识别<sup>[7-8]</sup>。

此外,由于激光雷达获得的是目标后向散射光回波,根据激光雷达获得的回波特征(波形、振幅、脉宽、时延等)进行目标识别,也是一种有效的途径。Gardner<sup>[9]</sup>用统计方法研究了目标粗糙度、目标外形对激光回波脉冲的展宽。李松等<sup>[10]</sup>利用菲涅耳理论,数值计算斜坡、阶梯及植被回波信号波形,分析了回波波形以及峰值和脉宽的影响因素。邢超<sup>[11]</sup>分析了材质表面粗糙度,地面倾斜度等对回波展宽的影响。李磊等<sup>[12]</sup>对草地、楼房墙壁进行激光照射实验,并得到展宽后的回波,提出利用回波展宽特性,反演目标倾斜角的方法。闫小伟等<sup>[13]</sup>通过仿真坦克的回波,得到不同的采样区的回波延时、峰值功率,被展宽的程度存在差异。赵伟等<sup>[14]</sup>采用蒙特卡罗法模拟激光返回信号的展宽特性,从而识别云和地面目标。

目前,针对激光成像雷达复杂场景激光回波展宽的目标识别研究尚未见到报导。由于脉宽像的稳定性,可有效提高宽景深远距离目标探测率。因此,本文采用课题组研制成型的条纹管激光成像雷达(STIL),对复杂建筑物群进行成像实验。获得目标的强度像与距离像的同时,获得了目标的条纹像。从条纹像中获得目标的回波脉宽,重构出复杂场景的脉宽图。经过实验统计分析,针对不同的目标,其脉宽统计特性是有差别的,且脉宽像的视觉效果优于强度像。因此,提出对于成像激光雷达复杂场景图像的目标识别,可以从其所获得的复杂场景回波脉宽图进行目标识别,并且可以采用距离像与脉宽像相结合的方法进行目标提取。

## 2 条纹管激光成像雷达装置以及成像目标

### 2.1 条纹管激光成像雷达装置

STIL 是美国首先实验报道的一种新体制闪光式激光成像技术,具有成像帧频高、探测视场角大,高探测灵敏度,高距离分辨率等优点<sup>[15]</sup>。

图 1 是 STIL 的成像原理图。激光器发出脉冲激光,经过光学系统整形为线状光斑后照射到目标上,其回波信号由接收镜头接收,聚焦到条纹管的光电阴极上;当光电阴极上的狭缝部分被光脉冲照明时,将发射光电子,其瞬态发射密度正比于该时刻的光脉冲强度,因此光电阴极发出的电子脉冲在时空结构上是入射光脉冲的复制品。电子脉冲经静电聚焦系统聚焦后,进入偏转系统。偏转系统上加有随时间线性变化的斜坡电压,由于不同时刻进入偏转系统的电子受到不同偏转电压的作用,按照脉冲到达的时间先后顺序,经微通道板(MCP)放大后到达荧光屏。在荧光屏上将沿垂直于狭缝的方向展开,这一方向对应于时间轴,可以得到沿狭缝每一点展开的回波信息,重构后便可以得到回波信号所对应的距离信息、强度信息以及脉宽信息即激光脉冲的半峰全宽(FWHM),即目标的距离像、强度像及脉宽像。

课题组自研的条纹管激光成像装置,如图 2 所示。该系统主要包括:YAG 激光器、收发光学系统、条纹管探测器[包括电荷耦合器件(CCD)相机,像元为 480 pixel×640 pixel]、延时器、控制计算机和转台等部分。条纹管探测器内置 532 nm 窄带滤波片,主要用于滤除 532 nm±10 nm 以外的杂散光,发射光的稳定性较高。

### 2.2 成像目标

以建筑物群为主的复杂场景,如图 3 所示,图中主要有 5 栋楼房,分别标注建筑物 I~V(图中红色字母),所有楼房都涂有颜料,建筑物 I 为灰色,建筑物 II~V 以粉色涂料为主,建筑物 V 为粉白相间。成像的

建筑物群的距离范围为 390~723 m。

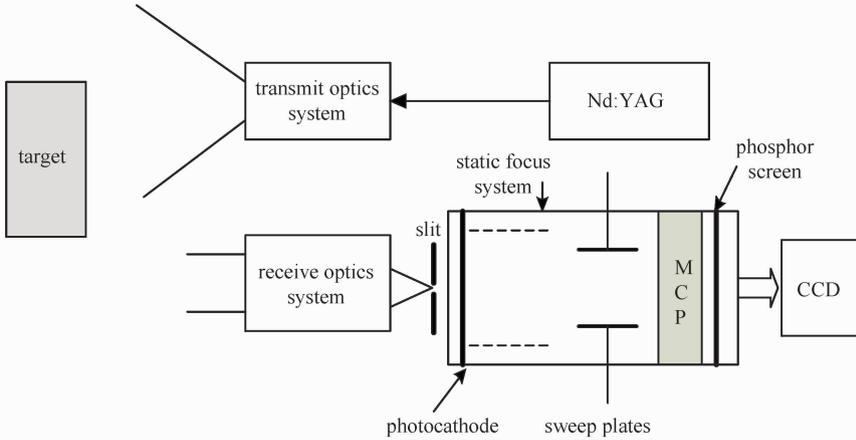


图 1 成像基本原理

Fig. 1 Basic principle of imaging

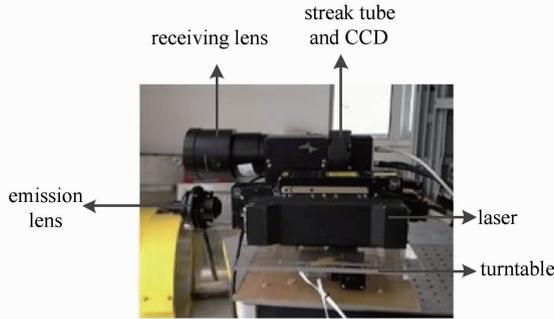


图 2 条纹管激光成像装置

Fig. 2 Streak tube laser imaging device



图 3 复杂场景实物照片

Fig. 3 Picture of multiple buildings

### 3 成像实验结果及统计分析

#### 3.1 成像实验结果

利用 532 nm STIL 对复杂场景(建筑物群)进行夜晚成像,距离选通范围为 1.5 km,距离分辨率小于 3 m,使用照度计测量夜晚的照度值为 0,并在此环境下获得了 532 nm STIL 的复杂场景多目标的激光强度像、距离像以及脉宽像(能见度大于 10 km),成像结果如图 4 所示。

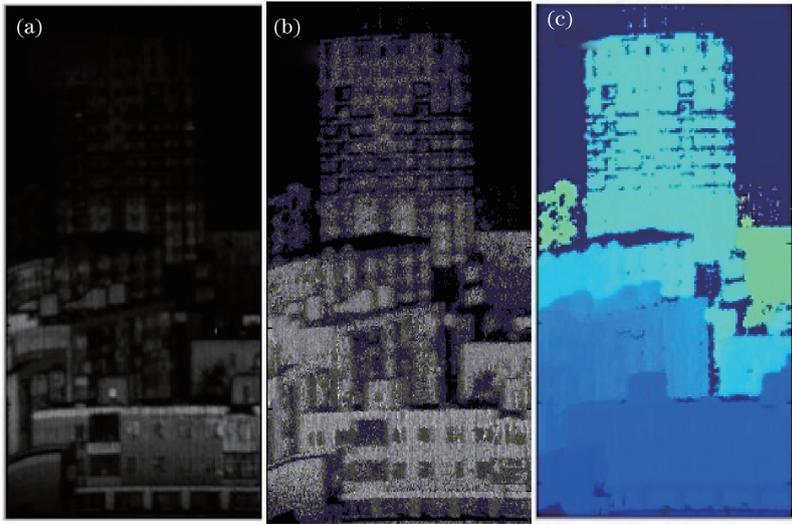


图 4 成像结果。(a)强度像；(b)脉宽像；(c)距离像

Fig. 4 Results of imaging. (a) Intensity image; (b) pulse-width image; (c) range image

强度像反映的是目标上每一点的回波相对强度,距离像反映的是目标上每一点距离激光雷达的相对距离,脉宽像反映的是目标上每一点的回波脉宽。脉宽的获得是将每一点的条纹像展开之后,获得该点的回波波形,然后取得脉冲的半值宽度。由于 CCD 具有一定的分辨率,选取的脉宽实际上就是回波脉宽所占的像元个数。

### 3.2 脉宽像的获取原理

激光雷达每个像元所对应目标的条纹像为  $1 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$  像素大小。将条纹像展开,如图 5 所示。曲线图表示的是激光雷达接收到的每个 CCD 单元相对应目标的回波条纹像示意图,纵轴为实际接收到的目标条纹像的灰度值,横轴为像元的位置(1 到 480)。其中  $I_1$  为灰度峰值,  $I_2 = I_1/2$ 。

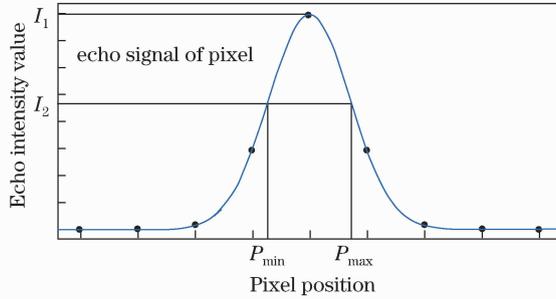


图 5 单个像元的回波信号

Fig. 5 Echo signal of every single pixel

回波脉宽的计算公式为

$$J_{\text{width}} = P_{\text{max}} - P_{\text{min}} + 1. \quad (1)$$

将每个 CCD 像元对应目标的条纹像展开,根据(1)式可得到每个像元对应的脉宽值,随后可重构出脉宽像。

### 3.3 成像实验结果分析

从视觉效果上来看,脉宽图有如距离像稳定的特性,可以清晰地各个目标分辨出来。而对于强度像,所成的图像中的目标有缺失,可以看到,第 V 个目标很明显有一部分与天空背景融合到了一块,以及第 VII 个小目标,基本已经看不见了。而脉宽图却可以清晰地呈现,提高了目标的探测率。原因是远场目标的回波很弱,但是其回波的波形相对稳定。因此,就视觉效果而言,脉宽图的探测率优于强度图,这更利于一些勘测、侦查等方面的工作。

对脉宽图进行统计分析:

1) 对五栋主要建筑物进行回波脉宽平均值统计,统计结果如表 1 所示。不同的建筑物,其脉宽的统计平均是不相同的,由于各目标脉宽的值本身就不大(最大为 8.1388),而各平均值之间的差别至少为 0.48,这足以将各个目标鉴别出来。而各个目标的脉宽平均值与其目标的粗糙度、相对光源的倾斜角以及外形轮廓有很大的关系<sup>[9,11]</sup>。因此,基于脉宽图可以将各个目标鉴别出来,为成像激光雷达目标识别提供一个新的途径。

表 1 五栋建筑物的脉宽平均值

Table 1 Pulse width average value of five buildings

Buildings	Average value of pulse width
Building I	7.655
Building II	8.1388
Building III	5.7267
Building IV	5.1571
Building V	3.242

2) 对场景中的典型目标进行脉宽平均值统计,选取目标 3 pixel $\times$ 3 pixel 的点进行统计,各个目标如图 3 所示,统计结果如表 2 所示。其中:前三个目标位于建筑物 II 上且距离很近,第一个目标为粉色墙壁,第二个目标为白色墙壁,第三个目标为窗户(玻璃);第四个与第五个目标位于建筑物 V 上,均为白色墙壁,但是距离较远。

比较第一与第二个数据:由于是同一建筑物,且相距很近,脉宽的主要影响因素是墙壁上所涂颜料的颜色,通过观察数据可以发现,脉宽之差仅为 0.2,所以白色与粉色对 532 nm 回波的脉宽影响很小。

比较第一与第三个数据:两个目标相距很近,只有材料不同,两个数据之差接近 4.7,这是一个很大的数据,所以目标的材料对回波脉宽大小的影响很显著。

比较第四个与第五个数据。两个目标差别就是相距较远,表现为激光的入射角不同,两者脉宽差为 2。因此,光束相对目标的入射角对回波脉宽的影响较大。

从以上数据分析可以得到:回波脉宽与目标的材质以及激光的入射角关系密切;而对于 532 nm 激光,白色与粉色涂料对脉宽的影响相当。

表 2 五个目标的脉宽平均值

Table 2 Pulse width average value of five targets

Targets	Average value of pulse width
The 1st target	9.3
The 2nd target	9.1
The 3rd target	4.44
The 4th target	6.67
The 5th target	4.67

3) 对此场景的目标进行基于距离像的目标提取实验,未能有效地将第 VI 个建筑物与第 IV 个建筑物有效地单独分离,第 VI 个建筑物脉宽平均值为 8.22,而第 IV 个建筑物的值为 5.1571,这两个值的差对于脉宽来说,已经足够大了。因此,对于此情况下的两个目标,基于脉宽像足以将其单独分离。

## 4 结 论

通过激光成像雷达对复杂建筑物群进行成像实验,获得目标的强度像、脉宽像以及距离像。从实验角度,证明脉宽像可有效提高宽景深远距离目标探测率。实验结果表明:脉宽像的视觉效果优于强度像,相对于强度像可清晰得到远场目标的图像;不同的建筑物,其脉宽平均值有所差异,至少相差 0.48;光束入射角、目标的材质与回波脉宽密切相关:入射角方面,选取距离激光雷达相同的、相距较远的白色墙壁(入射角不同),其回波脉宽相差为 2,相差较大;材质方面,距离激光雷达相同的玻璃与粉色墙壁回波脉宽相差 4.7,相差很大;而目标颜色(白色、粉色)对 532 nm 回波脉宽影响较小,这两种颜色回波脉宽之差仅为 0.2。基于脉宽像进行目标鉴别的方法,以及将距离像与脉宽像相结合的方法将会是复杂场景目标提取的一个途径。当

然,这些是根据目前的实验结果所提出的想法,下一步会将理论与实验相结合,用理论对回波脉宽一些现象进行解释,随后进行基于脉宽像的目标提取研究。

## 参 考 文 献

- 1 Ma Chaojie, Xu Pengcheng, Wu Dan, *et al.*. Application of imaging laser radar in automatic target recognition[J]. Aero Weaponry, 2008 (4): 3-6.  
马超杰, 许鹏程, 吴 丹, 等. 成像激光雷达在自动目标识别中的应用[J]. 航空兵器, 2008(4): 3-6.
- 2 Dufour J Y, Martin V. Active/passive cooperative image segmentation for automatic target recognition[C]. SPIE, 1994, 2298: 552-560.
- 3 Yang Peng, Wang Yuzhi, Li Lin, *et al.*. Active imaging ladar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(s): 115-119.  
杨 鹏, 王宇志, 李 琳, 等. 主动成像激光雷达[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(s): 115-119.
- 4 Youmans D G, Hart G A. Three-dimensional template correlations for direct-detection laser-radar target recognition[C]. Schafer Corp Chelmsford Ma, 1999.
- 5 Liu Zhengjun, Li Qi, Wang Qi. Object recognition of ladar range image using combined moment invariants[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0609002.  
刘正君, 李 琦, 王 骥. 基于组合矩的激光雷达距离像目标识别[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0609002.
- 6 Stephen S, Melissa T P, Danial G M, *et al.*. Hybrid fuzzy-neural classifier for feature level data fusion in ladar autonomous target recognition[J]. SPIE, 2001, 4379: 66-77.
- 7 Sun Jianfeng, Li Qi, Lu Wei, *et al.*. Implementing the algorithm of target recognition for laser imaging radar based on digital signal processing[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(11): 1467-1471.  
孙剑峰, 李 琦, 陆 威, 等. 基于数字信号处理器的激光成像雷达目标识别算法实现[J]. 中国激光, 2006, 33(11): 1467-1471.
- 8 Sun J, Li Q, Wang Q. Object recognition of ladar with support vector machine[J]. SPIE, 2005, 5640: 434-439.
- 9 Gardner C S. Target signatures of laser altimeters; An analysis[J]. Appl Opt, 1982, 21(3): 448-453.
- 10 Li Song, Zhou Hui, Shi Yan, *et al.*. Theoretical model for return signal of laser altimeter[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(1): 33-39.  
李 松, 周 辉, 石 岩, 等. 激光测高仪的回波信号理论模型[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(1): 33-39.
- 11 Xing Chao. Research on laser echo acquiring technique[J]. Infrared, 2006, 27(4): 29-35.  
邢 超. 激光回波信号采集技术[J]. 红外, 2006, 27(4): 29-35.
- 12 Li Lei, Hu Yihua, Zhao Nanxiang, *et al.*. Experiment on the stretching characteristics of pulse width of laser remote sensing echo[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(2): 246-250.  
李 磊, 胡以华, 赵楠翔, 等. 激光遥感目标回波脉宽展宽特性实验[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 246-250.
- 13 Yan Xiaowei, Deng Jiahao, Sun Zhihui. Simulation of echo signal in laser imaging detection system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(12): 42-46.  
闫小伟, 邓甲昊, 孙志慧. 脉冲激光成像探测系统回波信号仿真[J]. 光电工程, 2009, 36(12): 42-46.
- 14 Zhao Wei, Zhang Guiyang, Miao Tongqun. Identifying target with pulse stretching characteristic[J]. Laser Journal, 2008, 29(4): 36-37.  
赵 伟, 张贵彦, 缪同群. 利用脉冲展宽特性识别云和地面目标[J]. 激光杂志, 2008, 29(4): 36-37.
- 15 Gleckler A D. Multiple-slit streak tube imaging lidar (MS-STIL) applications[C]. SPIE, 2000, 4035: 266-278.

栏目编辑: 苏 岑