

# 基于机载激光雷达成像的动目标轨迹检测模型

寇添<sup>1</sup> 王海晏<sup>1</sup> 王芳<sup>1</sup> 吴学铭<sup>1</sup> 王领<sup>1</sup> 徐强<sup>2</sup>

<sup>1</sup>空军工程大学航空航天工程学院, 陕西 西安 710038

<sup>2</sup>中国人民解放军95949部队, 河北 沧州 061000

**摘要** 建立了激光成像雷达探测目标的数学模型,分析了目标成像点轨迹形成的整个过程,讨论了距离像上的目标回波强度与目标距离之间的关系,得出了单次脉冲成像回波峰值点在像面上的坐标分布函数。设计实验并提出了一种动目标三维轨迹检测的方法,利用自适应阈值法对激光雷达实验图像进行了处理,得到了目标成像点轨迹分布;对比了距离像的理论和实验数据,结果表明理论模型检测的目标轨迹结果与实验结果误差控制在2%以内,具有较高的吻合度,所得结论可为目标轨迹预测以及意图判断提供参考意义。

**关键词** 图像处理; 激光雷达成像; 回波强度; 轨迹检测; 实验研究

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.101002

## Model of Moving Target Trajectory Detected Based on Airborne Laser Radar Imaging

Kou Tian<sup>1</sup> Wang Haiyan<sup>1</sup> Wang Fang<sup>1</sup> Wu Xueming<sup>1</sup> Wang Ling<sup>1</sup> Xu Qiang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aeronautics and Astronautics Engineering Institute, Air Force Engineering University,

Xi'an, Shaanxi 710038, China

<sup>2</sup>Unit No.95949 of PLA, Cangzhou, Hebei 061000, China

**Abstract** Based on the model of laser imaging radar detecting target, the trajectory forming process of target imaging points is analyzed, and the distribution function of echo peak points on the image surface under single pulse imaging. While the experiment is designed, a method of detecting target three-dimensional trajectory is put forward. The experimental image obtained by laser radar is processed through the adaptive thresholding algorithm, and the trajectory of target imaging points is got. Then the comparison between theoretical and experimental data is made, and the result shows that the relative error between trajectories detected by theoretical model and experiment is controlled in 2%, which has a better coincidence. The result can provide reference for the trajectory prediction and intention judge of aerial target.

**Key words** image processing; laser radar imaging; echo intensity; trajectory detection; experimental research

**OCIS codes** 100.2960; 040.1880; 040.1520

## 1 引言

在现代空战复杂电磁环境条件下,与可见光、红外、合成孔径和毫米波雷达成像探测模式相比,激光雷达成像探测模式具有保密程度高、抗电磁干扰和抗隐身能力强、激光回波包含丰富目标参量信息等显著特点,尤其在不良天气下探测跟踪弱小目标时,这种成像模式更具优势<sup>[1]</sup>。

目前,采用距离选通技术的激光雷达成像模式已成为研究热点,其在远距监视、近距成像、弱小隐蔽目标探测、水下探雷、三维成像等领域应用广泛<sup>[2]</sup>。Andersson<sup>[3]</sup>通过对探测的图像距离切片进行处理,获取静态目标三维信息,且分辨率高,作用距离远;王飞等<sup>[4]</sup>研究了一种工作于多脉冲积累方式的小型化增益调制三维实时成像系统,成像距离精度较高;黄涛等<sup>[5]</sup>在激光雷达距离图像的统计特性基础上,利用最小外接矩

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-13; 网络出版日期: 2015-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(61172083)

作者简介: 寇添(1990—),男,硕士研究生,主要从事光电探测与对抗方面的研究。E-mail: shanxiakkt@163.com

导师简介: 王海晏(1968—),男,博士,副教授,主要从事光电技术原理及应用方面的研究。E-mail: whh\_shx@sohu.com

形拟合方法实现了对图像中目标的提取和分类;韩意等<sup>[6]</sup>提出了适用于激光探测目标的双向反射分布函数(BRDF)模型,深入分析了目标散射特性对激光雷达成像探测的影响。利用激光雷达成像对目标的探测以及图像信息的处理和识别,国内外已经做了大量研究,且技术较为成熟,但在动目标轨迹检测与预测方面研究甚少。

根据激光雷达成像特点,本文将深入分析成像过程,重点建立成像距离模型和目标回波强度峰值分布模型,提出空中动目标三维轨迹检测的方法,设计实验验证所建立的模型和轨迹检测方法的合理性。

## 2 激光雷达成像轨迹检测模型

传统的图像处理和目标识别仅能检测出目标的二维运动轨迹,这降低了对空战态势信息获取的要求,但激光雷达成像却能弥补这个不足,它能获取来自目标反射的强度图像、距离图像、多普勒图像和目标的三维图像等空战所需信息<sup>[7-8]</sup>,再经过图像处理即可检测出动目标的三维轨迹。

### 2.1 距离图像中目标回波强度分析

所谓距离图像是通过激光器发射高功率激光峰值脉冲照射目标区域,探测器接收目标反射的脉冲回波,并在探测器面上呈现目标回波峰值强度信息<sup>[9]</sup>。成像系统得到的每一副二维图像都是距离图像,它是空间深度的记录,图像中目标回波强度的大小可反演出目标距离。建立激光雷达探测目标过程模型如图1所示。

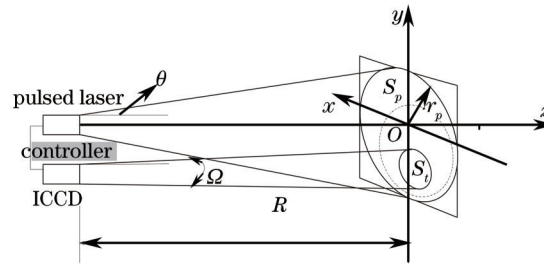


图1 激光雷达探测目标过程

Fig.1 Process of laser radar detecting target

图1是激光雷达探测目标的过程, $xOy$ 表示目标截面, $\theta$ 是激光束散角, $\Omega$ 是探测器相对于目标的空间立体角,虚线圈表示接收视场,半视场角为 $\varphi$ , $S_p$ 表示激光束在目标截面投影面积,半径为 $r_p$ , $S_i$ 表示目标有效反射面积,它处于目标截面某一位置, $R$ 为激光雷达与目标距离。探测器接收到目标反射的回波光强能量为:

$$E_r = \frac{E_0 \tau_i \cdot \tau_a(R)}{S_p} \cdot \rho(\lambda) S_i \cdot \Omega \tau_r = \frac{E_0 \tau_i \cdot \tau_a(R)}{\pi(r_p)^2} \cdot \rho(\lambda) S_i \cdot \frac{\pi(D_r/2)^2 \tau_r}{R^2} = \frac{E_0 \tau_i \cdot \tau_a(R) \cdot \rho(\lambda) S_i \cdot (D_r/2)^2 \tau_r}{R^4 (\tan \theta)^2}, \quad (1)$$

式中 $E_0$ 和 $E_r$ 分别为激光脉冲发射峰值能量和接收能量, $D_r$ 为接收系统光学孔径, $\tau_i$ 与 $\tau_r$ 分别是激光脉冲发射和接收光学系统透射率, $\tau_a(R)$ 是大气透射率, $\rho(\lambda)$ 是目标反射率。从回波强度能量模型可以看出,每一副距离图像上目标回波光强是距离的函数,因此成像系统得到的距离图像记录着目标的距离信息,这个信息是检测目标三维轨迹最为关键的因素,它更能准确预测目标轨迹和意图。当获取的多帧频距离图像上目标回波光强呈现减弱趋势时,说明敌我相对态势是目标正在离我机远去;反之则说明敌机正在接近我机。

### 2.2 单次成像回波峰值点轨迹分布

基于距离选通的激光雷达成像系统可以抑制大量后向散射光和杂波干扰,具有较强的弱小目标成像能力<sup>[10]</sup>。在距离选通成像系统中,目标截面上每点都遵循物像成像关系。当不考虑成像弥散斑影响的情况下,像增强型CCD(ICCD)像面上接收到的光强峰值点位置与目标截面上目标位置相对应,建立如图2所示的成像位置关系图。 $O$ 和 $O'$ 分别是成像系统坐标原点和像面坐标原点, $P$ 和 $P'$ 点是物、像点,其坐标分别为 $(x, y, R_s)$ 和 $(x', y', L')$ ,物方和像方焦距为 $f$ 和 $f'$ ,介质折射率为 $n$ 和 $n'$ 。

由物、像成像关系有: $\frac{f'}{f} = \frac{n'}{n}$ ,  $\frac{1}{f} = \frac{1}{L'} + \frac{1}{R_s}$ ,垂轴放大率高斯公式 $\frac{y'}{y} = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{L'}{R_s}$ ,由于成像系统内外介质都为大气,即折射率 $n = n'$ 。若已知目标在我机坐标系中的俯仰角 $\beta$ 和方位角 $\alpha$ ,则有下式成立:

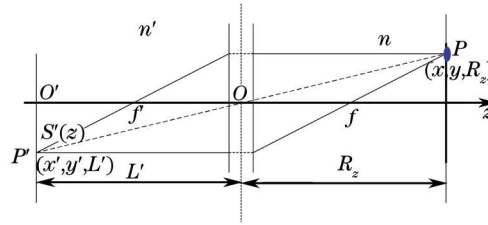


图2 目标成像回波峰值点轨迹分布

Fig.2 Trajectory distribution of echo peak value points

$$\begin{cases} \frac{x'}{x} = -\frac{L'}{R_z} = \frac{y'}{y} \\ x = R_z \tan \alpha, y = R_z \tan \beta \end{cases} \quad (2)$$

则目标回波峰值点在像面上的坐标函数值为

$$(x', y') = \left[ \frac{f}{x(R_z - f)}, \frac{f}{y(R_z - f)} \right] \quad (3)$$

从(3)式可以看出,像面上目标峰值点迹分布随着目标的位置变化而变化,因此,像面目标成像轨迹对应着目标的实际运动轨迹。上述关系式中物点  $P(x, y, R_z)$  被激光雷达照亮且处于探测器视场中应满足以下前提条件:

$$\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r_d(z)} \leq 1 \cap \frac{\sqrt{[x - (d_0 - R_z \tan \omega)]^2 + y^2}}{r_p(z)} \leq 1, \quad (4)$$

式中  $r_p(z) \approx R_z \tan \theta$ ,  $r_d(z) \approx R_z \tan \varphi$ , 它们分别是目标截面上激光雷达照射和接收视场半径,  $d_0$  是发射器与接收器之间横向安装距离,  $\omega$  为脉冲激光发射与接收轴线夹角。

### 3 实验结果及分析

根据上述目标成像轨迹检测模型,以及理论分析,搭建外场实验平台,探测器对前方 2000 m 远处的运动目标进行激光雷达成像实验。实验地点在夜晚开阔场地,大气能见度为 18 km,目标半球反射率  $\rho \approx 92\%$ 。实验中选择 1640 nm 多脉冲激光器,脉冲频率为 50 Hz,峰值能量为 50 MW,接收装置选择可以非扫描直接成像的 APD 光子探测器,它具有灵敏度高、响应时间快的特性,可将微弱光信号显著放大,是比较合适的激光雷达成像探测器。

选取一副激光成像雷达获取的灰度图像如图 3(a)所示,图像上目标回波强度及轨迹是由多帧距离像信号叠加的结果,脉冲发射频率越高,多脉冲累计探测效果越好,可以大大提高信噪比。由于是多脉冲串对运动目标进行累积探测成像,则一定时间内得到的回波脉冲串在成像面上投影后应为目标的粗略运动轨迹。

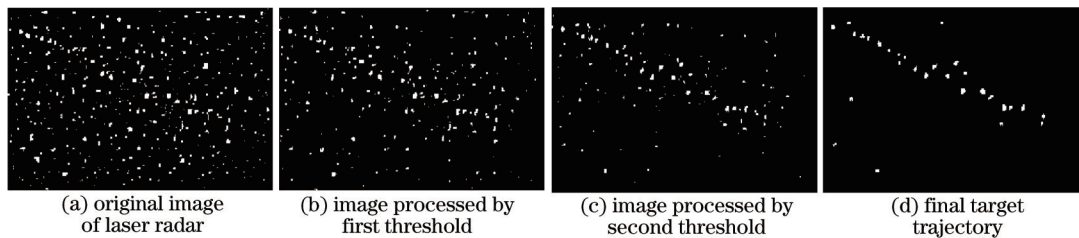


图3 目标成像轨迹检测过程

Fig.3 Detecting process of target trajectory

从图 3(a)中可以看出,图像中存在较多杂波噪声信号,这是目标和背景物体相对于激光波长较为粗糙而造成的散斑噪声,通常距离像中还存在加性的近似高斯噪声,这需要设定一个灰度阈值剔除这些虚假目标信号。处于视场中目标的反射回波在图像上一般表现为高频信号,因此选用自适应阈值分割方法较适应于这种情况,它技术成熟,算法简单,而且速度快。首先提取图像灰度值,并求取灰度均值  $T_1$ ,设定初始阈值  $T_{th} = T_1$ ,然后用初始阈值对图像进行分割滤波处理,保留高于阈值的图像信息,处理结果如图 3(b)。为了检测较为清晰的目标轨迹,需要继续寻找最佳阈值  $T_{th} = T_2$ ,最佳阈值的选取过程可参考文献[11]中的方法,通过最佳阈值

的分割处理最终结果如图3(d)所示,此时目标的成像轨迹已经较为明显,但并不明确目标的运动趋势。

只有结合距离像的距离信息,目标运动趋势就可以确定。表1中的数据是单次脉冲成像距离数据,由目标脉冲回波延时测量得出。从表1中可以看出,距离数据呈现近似递减的规律,结合目标轨迹检测结果,可判断目标正在向激光雷达探测器侧向接近。若对数据进行深入分析,可以推测出目标侧向接近的速度以及加速度信息。

表1 激光雷达图像距离实验数据

Table 1 Experimental data of distance based on laser radar image

No.	Target distance /m							
1	2048.42	2047.87	2046.48	2045.26	2044.37	2043.35	2042.17	2041.06
2	2039.92	2038.98	2038.08	2037.15	2036.57	2035.45	2034.67	2033.55
3	2032.61	2031.37	2030.75	2029.86	2028.63	2027.46	2026.52	2025.66
4	2024.78	2023.77	2022.93	2022.02	2021.42	2020.54	2019.83	2019.72

表2中是多帧距离像对应的理论距离数值,由距离像上的回波强度与目标距离之间的关系模型求解得出。比较实验和理论数据可以发现,理论数据与实测数据呈现同样的变化规律。对表1和表2中对应的数据进行误差计算,计算结果显示相对误差范围在2%以内,具有很好的符合程度,验证了所建模型的合理性。

表2 激光雷达图像距离理论数据

Table 2 Theoretical data of distance based on laser radar image

No.	Target distance /m							
1	2009.73	2007.96	2007.23	2006.16	2005.56	2004.88	2004.04	2003.26
2	2002.72	2002.13	2001.57	2001.05	2000.44	2000.02	1999.52	1999.13
3	1998.66	1998.25	1997.85	1997.41	1997.03	1996.72	1996.48	1996.10
4	1995.81	1995.55	1995.19	1994.88	1994.63	1994.08	1993.52	1992.97

以激光成像雷达实验平台为坐标起点,根据像面上目标轨迹点坐标 $(x',y')$ ,通过单次成像回波峰值点轨迹分布模型计算出实际目标空间坐标 $(x,y)$ ,利用最小二乘拟合方法,对实验和理论离散数据分别进行曲线拟合,绘制目标三维轨迹结果如图4所示。如果是空中目标,则在飞机坐标系下的目标运动轨迹存在一定高度,并可反映目标运动趋势。图4中,目标的理论和实验拟合轨迹线存在一定偏差,这是由于大气的不稳定性、探测器内部噪声等客观因素引起的,但误差控制在较小的范围内,理论模型仍具有适用性。

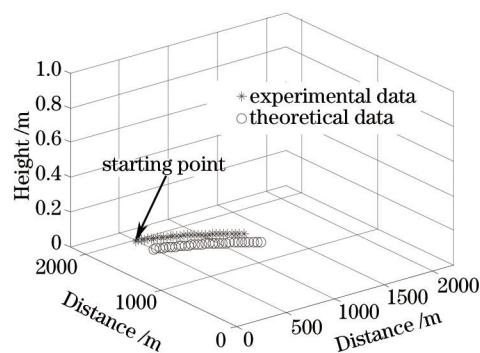


图4 目标实际运动轨迹

Fig.4 Real moving trajectory of target

## 4 结 论

通过建立激光成像雷达探测目标的数学模型,本文描述了目标成像点轨迹形成的整个过程,这为目标三维轨迹检测提供了理论基础。实验结果表明,利用本文所建模型检测的目标理论轨迹结果与实验所得目标轨迹具有较好的吻合度,这为空战目标轨迹预测以及意图判断提供了一定的参考意义。本文结论是在大气能见距较高情况下得出的,若在复杂大气背景时,对高速移动目标还需要优化图像处理算法,以提高目标轨迹检测概率,这将是下一步研究的重点。



## 参 考 文 献

- 1 Han Shaokun. The laser imaging radar technology and development tendency[J]. Optical Technique, 2006, 32(S): 494-496.  
韩绍坤. 激光成像雷达技术及发展趋势[J]. 光学技术, 2006, 32(S): 494-496.
- 2 Guo Huichao, Sun Huayan, Fan Youchen. Development status of range-gated laser active imaging technology under atmospheric condition[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 100004.  
郭惠超, 孙华燕, 范有臣. 大气条件下距离选通激光主动成像技术发展现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 100004.
- 3 Pierre Andersson. Long-range three-dimensional imaging using range-gated laser radar images[J]. Opt Eng, 2006, 45(3): 034301.
- 4 Wang Fei, Zhao Yuan, Zhang Yong. Multi pulse gain-modulated three-dimensional imaging system[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 1961-1966.  
王 飞, 赵 远, 张 勇. 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.
- 5 Huang Tao, Hu Yihua, Zhao Gang. Target extraction and classification base on imaging LADAR range image[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(2): 179-183.  
黄 涛, 胡以华, 赵 钢. 基于激光成像雷达距离图像的目标提取与分类技术[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(2): 179-183.
- 6 Han Yi, Sun Huayan, Li Yingchun. Simulation of space object laser radar cross section[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5): 819-823.  
韩 意, 孙华燕, 李迎春. 空间目标激光雷达散射截面仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 819-823.
- 7 Zhang Ge. Research on Imaging Laser Radar Technology[D]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology of Xi'an, 2011: 3-10.  
张 格. 激光成像雷达技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011: 3-10.
- 8 Jiang Yanbing. Array Imaging Three-Dimensional Ladar[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009: 88-103.  
姜燕冰. 面阵成像三维激光雷达[D]. 杭州: 浙江大学, 2009: 88-103.
- 9 Chen Xiaoqing, Ma Junguo, Zhao Hongzhong, *et al.*. Survey of automatic target recognition technology for LA-DAR[C]. SPIE, 2009, 7382: 73820K.
- 10 Ove Steinvall, Hakan Olsson, Goran Bolander. Gated viewing for target detection and target recognition[C]. SPIE, 1999, 3707: 432-448.
- 11 Wang Qian, Peng Zhong, Liu Li. An adaptive method of image segmentation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(4): 521-524.  
王 茜, 彭 中, 刘 莉. 一种基于自适应阈值的图像分割算法[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(4): 521-524.

栏目编辑: 何卓铭