

doi:10.3788/gzxb20174612.1211002

基于高斯拟合的条纹管成像激光雷达目标重构

袁清钰¹, 牛丽红¹, 胡翠春¹, 吴磊², 杨鸿儒², 俞兵²

(1 深圳大学 光电工程学院, 广东 深圳 518052)

(2 西安应用光学研究所, 西安 710065)

摘 要:为得到更为精细的三维重构,提出一种基于信赖域法高斯拟合的峰值探测法,对每帧图像单时间通道的回波进行高斯建模,建模结果可有效减小噪声干扰,具有唯一峰值,该结果作为新的回波波形,再对其进行峰值探测,并基于空中目标实验数据对本文方法进行验证.实验结果表明,基于高斯拟合的峰值探测法可将特征数据的提取误差降至 10% 以内;利用该方法提取特征数据进行目标三维重构,可实现探测深度方向上最小 30 cm 的空间分辨力,提高了条纹管激光雷达的三维成像精度.

关键词:条纹管激光雷达;高斯拟合;数据提取;图像处理;三维重构

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)12-1211002-8

Target Reconstruction of Streak Tube Imaging Lidar Based on Gaussian Fitting

YUAN Qing-yu¹, NIU Li-hong¹, HU Cui-chun¹, WU Lei², YANG Hong-ru², YU Bing²

(1 Institute of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518052, China)

(2 Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to get a more precise 3-D reconstruction, a peak detection method based on Gaussian fitting of trust region has been proposed in this work. Gaussian modeling is performed on the returned wave of single time channel of each frame, then the modeling result which can effectively reduce the noise interference and possesses a unique peak could be taken as the new returned waveform, lastly extracting its feature data by peak detection. The experimental data of aerial target is for verifying this method. This work concludes that the peak detection method based on Gaussian fitting reduces the extraction error of the feature data to less than 10%; utilizing this method to extract the feature data and reconstruct the target makes it possible to realize the spatial resolution with a minimum 30 cm in the depth direction, and improve the 3-D imaging accuracy of the Streak tube imaging lidar concurrently.

Key words: Streak tube imaging lidar; Gaussian fitting; Data extraction; Image processing; 3-D reconstruction

OCIS Codes: 110.0110; 280.3640; 110.6880

0 引言

条纹管成像激光雷达(Streak Tube Imaging Lidar, STIL)是一种以条纹管为核心器件的非扫描式主动成像探测系统,可同时记录连续的一维时间信息和一维空间信息,具有大视场、高空间和距离分辨率、高帧频和三维成像等优点.在海底地形地貌测绘^[1-3]、水下目标成像探测^[4-5]与识别等军事^[6]和民用领域具有广阔的应用前景.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(No.2014YQ23065903)资助

第一作者:袁清钰(1993—),女,硕士研究生,主要研究方向为光电成像.Email:YQYXBZX@163.com

导师(通讯作者):牛丽红(1963—),女,教授,博士,主要研究方向为变像管高速摄影和光电探测技术.Email:niulh@szu.edu.cn

收稿日期:2017-07-10;录用日期:2017-09-01

<http://www.photon.ac.cn>

借助该系统三维成像特性可获取多帧条纹图像,准确提取条纹特征数据是实现目标三维重构的关键所在^[7-9].目前常用的特征提取方法为峰值探测法,但在实际成像过程中,由于环境及设备性能等因素影响,接收图像同时包含目标信息与噪声信息^[10],直接使用峰值探测法提取的条纹特征数据存在较大误差,三维重构效果不佳.

本文基于空中目标成像实验数据,针对目标回波信号的特定波形,对单时间通道回波波形进行高斯建模,实验所获原始条纹数据用于训练理论高斯模型,返回高斯模型的关键参数,并将该已知参数的高斯模型替代原始波形,再对其进行特征数据提取.拟合与重建结果表明本文方法可有效降低噪声,提高目标特征数据提取精度,实现更为精准的目标三维重构.

1 条纹管激光雷达目标重构原理

1.1 条纹管激光雷达成像原理

条纹管激光雷达系统利用条纹管高速相机的时空分辨能力可获取被照明场景(目标和背景)的二维(方位-距离)强度信息,借助机载拖曳即可实现被照明场景的三维(方位-方位-距离)强度成像,其成像原理如图 1.

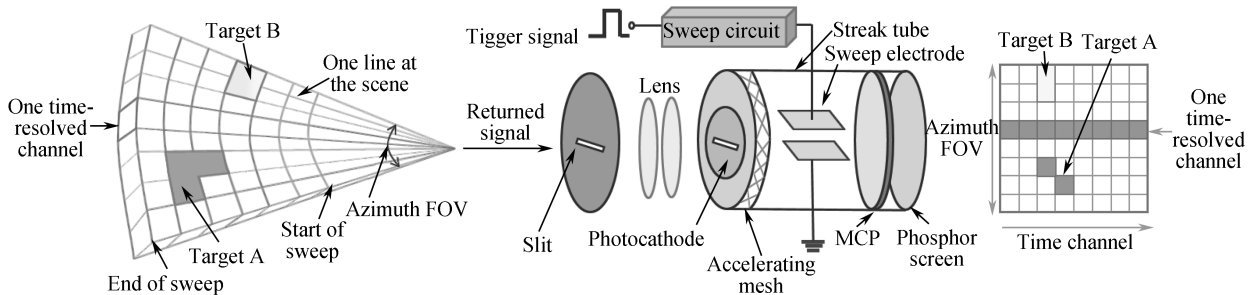


图 1 条纹管激光雷达成像原理
Fig.1 Imaging principle of STIL

脉冲激光器作为发射器,由光电阴极、偏转板、微通道板(Micro-channel Plate, MCP)和荧光屏等组成的高频条纹管相机作为接收器.激光被扩束后以扇形形式照射被照场景,场景反射的信号被接收器所接收并成像在光电阴极上,由于被照场景中各目标的位置和反射率不同,回波信号到达光电阴极的时间及强度也就不同.光电阴极将入射的光信号转变为与其时空特性一致的电脉冲信号,电脉冲信号经过电子聚焦进入偏转板,偏转板上随时间线性变化的斜坡电压将不同时刻进入偏转电场的电子沿垂直于狭缝的方向展开,最后经 MCP 放大增益后打在荧光屏上得到一幅激光入射面内的目标距离像和强度像^[11-13].

本文实验所用条纹管激光雷达系统输出脉冲激光波长为 532 nm,重复频率 10 Hz 可调,脉宽为 20 ns;采集图像采用 Pantera TF1M60 型号 CCD,最大分辨率为 1 024×1 024,帧频为 60 fps;条纹管相机由实验室自主研制,其主要性能参数如表 1 所示.

表 1 条纹管相机性能参数

Table 1 Streak tube camera performance parameters

| Performance parameters | Value |
|--------------------------------|------------------|
| Spectral response range | 400-850 nm |
| Cathode working area | Φ5 mm |
| MCP electron gain (adjustable) | 10 ¹⁴ |
| Deflection system sensitivity | 13 cm/kV |
| Maximum time resolution | <500 ps |
| Dynamic spatial resolution | 10 lp/mm |

1.2 峰值探测法

目标重构的关键在于获取条纹特征数据,还原目标的距离信息^[14].由于激光脉冲为高斯分布,认为条纹图像单时间通道回波信号也呈类高斯分布^[7].峰值探测法即探测回波信号峰值点,该点横坐标对应图像上沿扫描方向的像素位置,纵坐标对应返回信号的强度,结合不同目标条纹的像素位置之差与条纹管相机扫描速度即可换算出不同目标回波信号的时间差,进而计算出目标之间的距离差^[8-9],完成目标三维重建.在理想情

况下,单时间通道回波信号为理想的高斯型分布,如图 2(a),该情况下通过峰值探测法可得到精准的目标距离信息.而在实际中,一方面,如图 2(b),回波信号被噪声污染,峰值位置随机偏移,直接提取峰值的结果可能是噪声点或是被噪声叠加后的峰值点,影响重建准确性.另一方面,如图 2(c),条纹图像的无目标部分存在随机的环境背景噪声,呈类均匀分布,此时峰值在各个位置出现的概率几乎相同,若直接提取峰值,将影响目标与背景之间的距离差,目标重构产生误差.

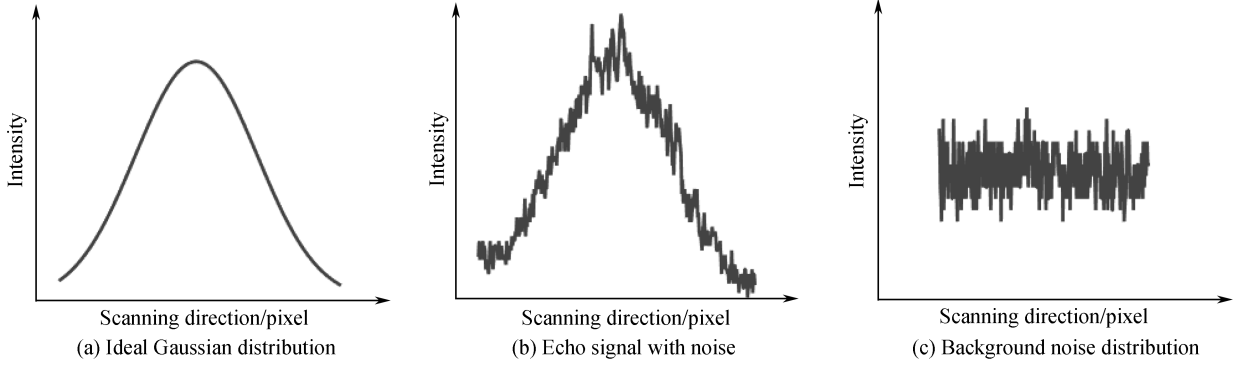


图 2 单时间通道回波信号
Fig.2 Single time channel echo signals

2 基于高斯拟合的条纹管激光雷达目标重构原理

2.1 基于信赖域法的高斯拟合峰值探测法

根据实际接收的回波波形,单时间通道信号强度分布可表示为

$$I_{\text{single}}(x) = I_{\text{tag}}(x) + N_{\mu_n, \sigma_n}(x) \quad (x = 1, 2, 3, \dots, 512) \quad (1)$$

式中, I_{single} 、 I_{tag} 、 N_{μ_n, σ_n} 分别代表所有时间通道信号总强度、目标回波信号强度、环境背景噪声^[10], x 代表像素位置,单时间通道像素为 512×1 ,故 x 取值区间为 $[1, 512]$, μ_n 为平均背景强度, σ_n 为平均噪声强度方差, μ_n 和 σ_n 可根据实际情况对采集图像进行统计得到.

将单时间通道强度分布 $I_{\text{single}}(x)$ 减去平均背景强度 μ_n 可得到带有零均值噪声的回波信号 $I'_{\text{tag}}(x)$

$$I'_{\text{tag}}(x) = I_{\text{single}}(x) - \mu_n = I_{\text{tag}}(x) + N_{0, \sigma_n}(x) \quad (2)$$

对呈类高斯分布的 $I'_{\text{tag}}(x)$ 进行高斯拟合,在进行高斯拟合前,建立用于曲线拟合的高斯模型 $f(x)$,

$$f(x) = A \cdot \exp[-(x - \mu)^2 / (2\sigma^2)] \quad (3)$$

式中, x 为像素位置, μ 和 σ 分别代表拟合后回波信号均值和方差.高斯拟合的关键是求得式(3)中的三个待定参数,分别为 A, μ, σ .

信赖域法是一种有效非线性拟合方法,具有可靠性和强适性(robust)以及较强的收敛性等优点^[15-16].本文采用该方法进行高斯模型建立,其主要思想是在一个信赖域半径中对目标函数进行泰勒级数展开,取其二阶近似,然后在信赖域中选择使二阶近似函数最小化的位移,进行参数更新^[16].目标函数即误差函数,可以表示为:

$$D(\theta) = \sum_i^N [I'_{\text{tag}}(x_i) - f(x_i, \theta_k)]^2 \quad (\theta = \{A, \mu, \sigma\}, N = 512) \quad (4)$$

第 k 次迭代的最小化位移 d 可通过下式求得:

$$\min q_k(d) = J_k^T d + \frac{1}{2} d^T H_k d \quad \text{s.t. } \|d\| \leq \Delta k \quad (5)$$

其中 Δk 为信赖域半径, $q_k(d)$ 为第 k 次迭代位移为 d 时二阶近似函数值的减小量, J_k 为第 k 次迭代误差函数对参数 θ 的 Jacobian 矩阵, H_k 为第 k 次迭代误差函数对参数 θ 的 Hessian 矩阵.若最小化位移够使近似函数有足够的减小量,则对参数进行更新

$$\theta_{j+1} = \theta_j + d \quad (6)$$

当 $\|J_k\|$ 达到终止条件时时,迭代终止,得到最优参数值 A, μ, σ ,返回拟合模型 $f(x)$,再对其进行峰值探测.

图3为本文拟合方法的过程示意图,图3(a)代表单时间通道实际接收的带有噪声的信号波形,图3(b)为减去噪声均值的回波信号,通过对该波形的学习,基于信赖域法可返回图3(c)所示的高斯拟合模型,将其加上噪声均值偏置,即可得到图3(d)所示的最终用于拟合原始波形的高斯模型。

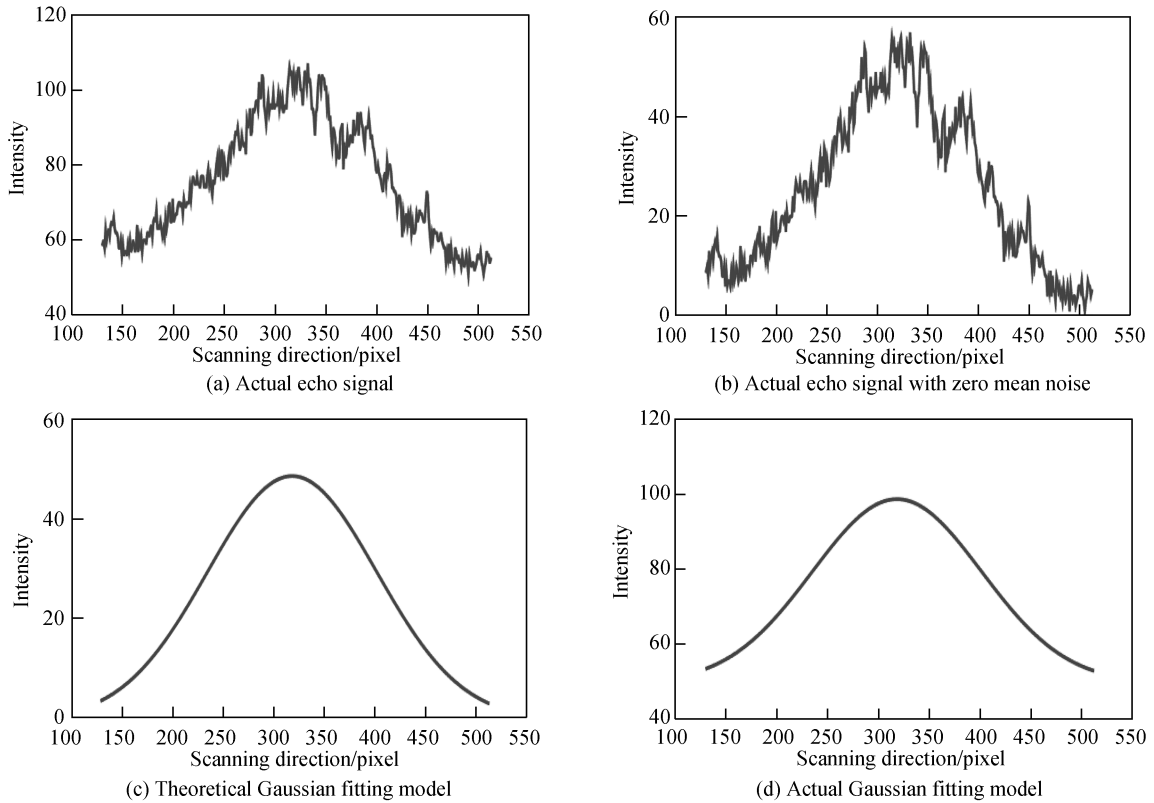


图3 高斯拟合过程
Fig.3 Gaussian fitting process

3 实验结果与分析

实验室前期已完成空中阶梯目标的三维成像实验,成像目标的实物图如图4.目标反射率越大,对应条纹强度越高,即影响反射信号在 CCD 上的灰度值;在系统的最大距离分辨范围内,目标表面的平整度将影响目标间的距离重建,故本文实验选用反射率较好,且较为平整的规则矩形纸盒搭建阶梯型目标,上层矩形目标前表面距离背景墙面 2.4 m,下层矩形目标前表面距离背景墙面 2.7 m,上下矩形目标前表面相差 30 cm,完成目标垂直高度扫描后共获取 60 帧条纹图像。

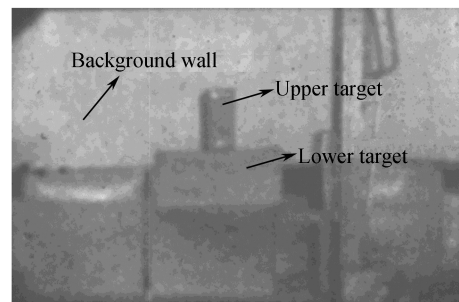


图4 成像目标实物图
Fig.4 Imaging targets physical map

图5为实验所得包含不同目标的原始条纹图像.条纹图像横向为狭缝方向,代表目标的空间信息;纵向为扫描方向,对应时间通道^[7-8].由于激光脉冲存在一定宽度,回波信号被扫描电压扫开后形成一定宽度的条纹,在扫描方向上占据多个像素.不同时间返回的信号沿扫描方向展开,图5中 A1、A2 区域条纹代表墙面信息,B 区域条纹代表下层目标信息,C 区域条纹代表上层目标信息.由于实验所用 CCD 的分辨率为 512×512 ,故单帧图像像素为 512×512 ,单时间通道像素为 512×1 .

3.1 单时间通道回波信号处理结果

根据单时间通道回波信号的类型,对其进行高斯拟合或衰减处理,结果如图6.图6(a)为背景墙的单时间通道回波信号强度及高斯拟合结果,图中离散点表示实际强度分布,曲线表示高斯拟合结果;图6(b)和

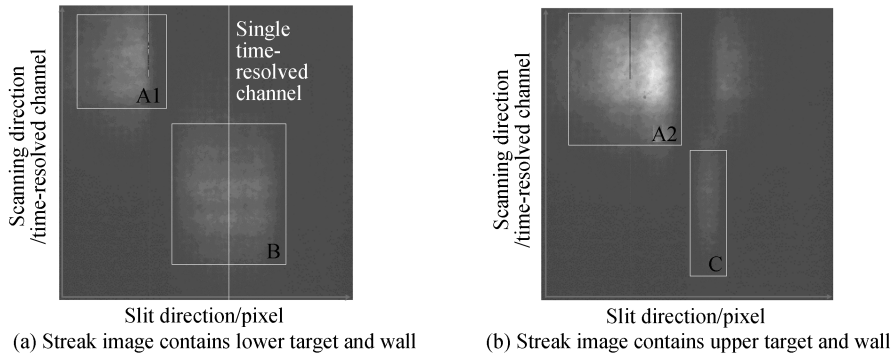


图5 目标原始条纹图像

Fig.5 Target original streak images

6(c)分别对应上层目标和下层目标的单时间通道回波信号及高斯拟合结果;图6(d)为图像上不包含目标的时间通道强度分布,为图像背景噪声,呈类均匀分布,本文采用衰减方式,将像素位置最小处作为特征位置,该处即对应实际场景的无目标处.由图6离散点分布可以看出,实际回波信号整体虽呈高斯分布,但受噪声影响,信号峰值位置随机变化,而高斯拟合结果可去除部分随机噪点,并且具有唯一峰值.

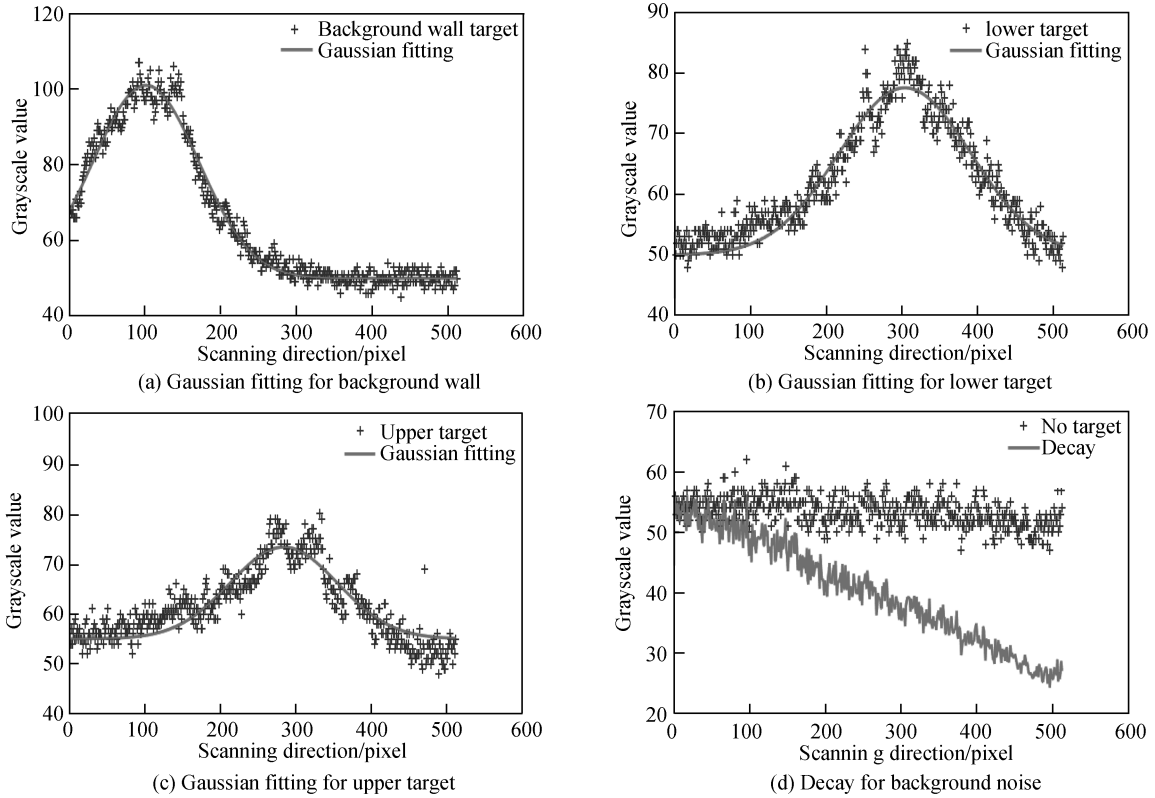


图6 单时间通道回波信号处理结果

Fig.6 Processing results of single time channel echo signals

3.2 单帧条纹图像距离重建结果

分别通过原始峰值提取法、高斯拟合峰值提取法,还原单帧条纹图像的目标距离信息.图7(a)为包含墙面及下目标条纹的图像,图7(b)为基于原始峰值提取法和基于高斯拟合峰值提取法的距离重建对比结果;图7(c)为包含墙面及上目标条纹的图像,图7(d)为基于原始峰值提取法和基于高斯拟合峰值提取法的距离重建对比结果.结果显示,部分严重的随机噪声(如图7(b)与图7(d)中实线的随机凸起)已去除,验证了本文方法减弱随机噪声干扰的有效性,可得到更为精确的距离重建结果,为最后的三维重构提供更为可靠的特征数据.同时,图7(b)与图7(d)中实线所示,目标在狭缝方向所占像素位置与原始数据相近(上目标),保证了目标重建的空间结构与原始目标一致.

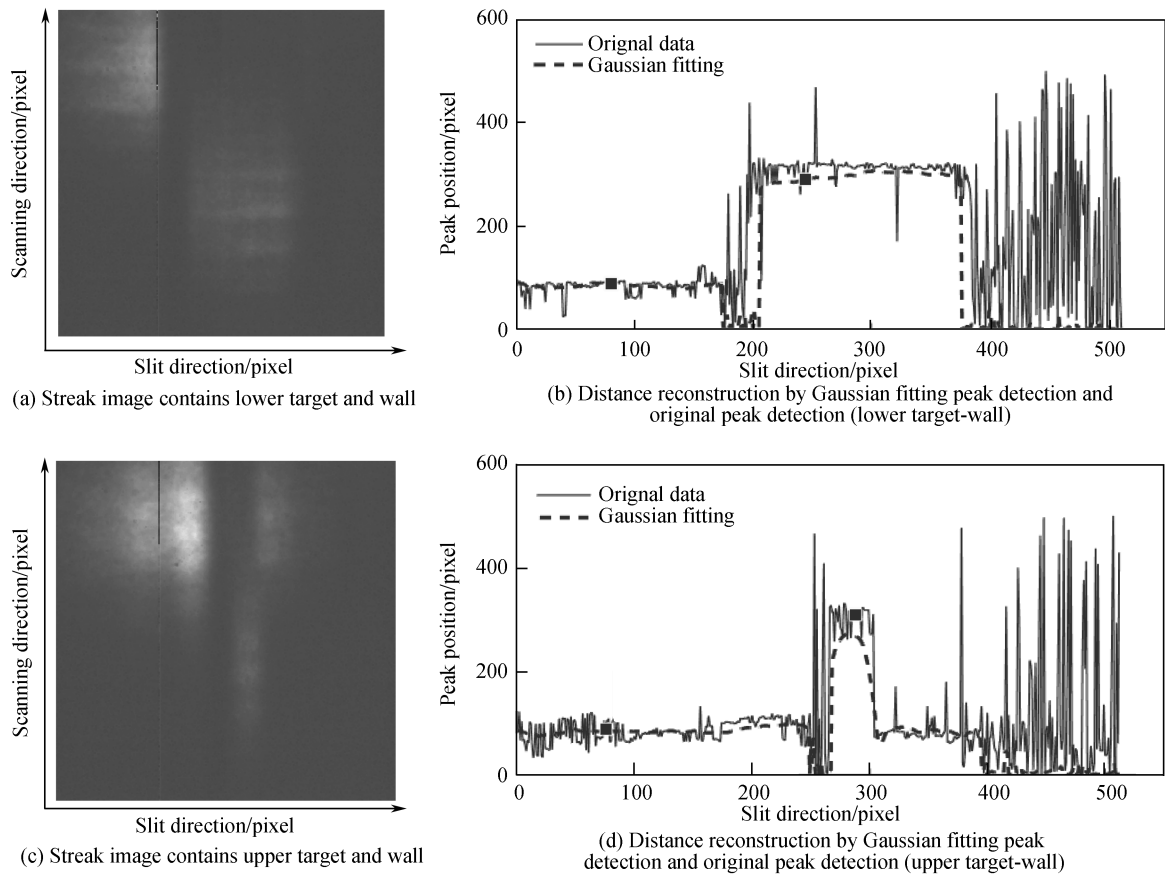


图7 单帧条纹图像的距离重建

Fig.7 Distance reconstruction of single frame streak image

为进一步验证本文拟合方法的有效性,根据拟合结果进行峰值探测,提取各目标条纹在狭缝方向上所有时间通道的峰值位置,对其求平均作为目标条纹的特征像素位置,再由像素位置之差计算目标相对距离^[7]. 本文实验所用条纹管相机的扫描速率为 0.0898 ns/pixel ,由扫描速率与各目标像素位置差 ΔP_{tag} 即可换算出目标之间的距离 D ,换算公式为

$$D = 0.0898 \times \Delta P_{\text{tag}} \times c \times 0.05 \quad (7)$$

其中 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$,为光速.

表2 下目标特征数据提取精度对比

Table 2 Comparison of the accuracy of lower target data extraction

| | Original peak detection | Peak detection based on Gaussian fitting |
|---|-------------------------|--|
| Relative distance between wall and lower target/m | 3.12 | 2.87 |
| Relative error/% | 15.56 | 6.30 |
| Variance of the wall streak's peak position | 167.14 | 15.82 |
| Variance of the lower target streak's peak position | 393.17 | 53.45 |

表3 上目标特征数据提取精度对比

Table 3 Comparison of the accuracy of upper target data extraction

| | Original peak detection | Peak detection based on Gaussian fitting |
|---|-------------------------|--|
| Relative distance between wall and upper target/m | 3.04 | 2.43 |
| Relative error/% | 26.67 | 1.25 |
| Variance of the wall streak's peak position | 391.70 | 8.81 |
| Variance of the upper target streak's peak position | 559.54 | 99.67 |

表2和表3给出两种峰值探测法提取特征数据的精度,基于高斯拟合的峰值探测法提取数据并换算出目标间空间距离,得到下目标与墙面距离为 2.87 m ,相对误差降低至 6.3% ,上目标与墙面距离为 2.43 m ,相

对误差降至 1.25%,相比于原始峰值探测法,有效提高了数据提取精度,将数据提取误差降至 10%以内.另外,计算各目标条纹所有时间通道的峰值方差,结果表明,基于高斯拟合的峰值探测法提取的峰值方差明显减小,说明同一目标条纹的峰值波动小,有效减弱了噪声干扰.

3.3 目标三维重构

提高数据提取精度的最终目的是为了准确重构目标三维图像^[15],基于以上数据提取方法,对本文实验所得数据进行目标重构,对比直接使用峰值探测法、基于高斯拟合的峰值探测法的三维重构结果,重构结果分别如图 8(a)、图 8(b)所示.由图可知,第一种原始方法得到的结果由于噪声原因,虽能分辨目标大致形状,但未能体现上下目标前表面 30 cm 的距离差.而基于高斯拟合的结果更为平滑,并能直观的观察到上下目标前表面之间的间隔,较好地反映出目标的实际三维结构.

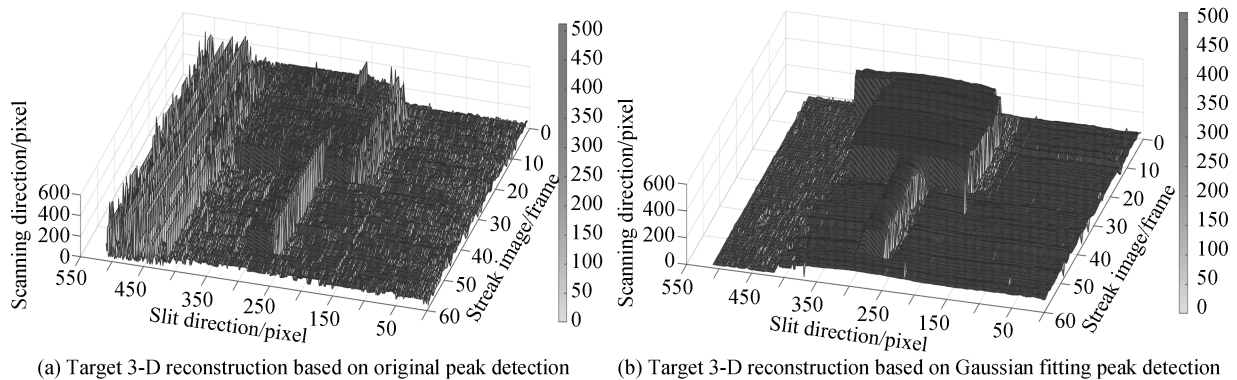


图 8 目标三维重构

Fig.8 Target 3-D reconstruction

4 结论

本文结合条纹管成像激光雷达的工作原理,针对直接使用峰值探测法提取特征数据存在较大误差的问题,将基于信赖域高斯拟合的峰值探测法代替原始峰值探测法,对实验所获取的条纹图像进行特征数据提取,提取及计算结果表明高斯拟合能有效减小噪声干扰,提高特征数据的提取精度.对比各方法的目标三维重构结果,基于本文方法的重构结果精度更高.

参考文献

- [1] SHI Yin-xin, WANG Kui, ZHANG Chang. Striped blue-green laser radar underwater imaging technology [J]. *Optoelectronic Technology*, 2015, **35**(3): 195-199.
石吟馨,王葵,张畅. 条纹管蓝绿激光雷达水下成像技术[J]. 光电子技术, 2015, **35**(3): 195-199.
- [2] ZHAO Wen, HAN Shao-kun. Striped tube imaging lidar distance resolution[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013(7): 214-219.
赵文,韩绍坤. 条纹管成像激光雷达距离分辨率[J]. 中国激光, 2013(7): 214-219.
- [3] GAO Jiang, SUN Jian-feng, WEI Jing-song, et al. Research on underwater target detection based on striped laser imaging radar[C]. Lu Yu Gong Black province of Five Provinces Optics, 2011.
郜键,孙剑峰,魏靖松,等. 基于条纹管激光成像雷达水下目标探测研究[C]. 鲁豫赣黑苏五省光学, 2011.
- [4] REDMAN B C, GRIFFIS A J, SCHIBLEY E B. Streak tube imaging lidar (STIL) for 3-D imaging of terrestrial targets [R]. Arete Associates Tucson Az, 2000.
- [5] WEI Jing-song. Study on three-dimensional laser imaging technology of striped tube[D]. Harbin Institute of Technology, 2007.
魏靖松. 条纹管激光三维成像技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2007.
- [6] XU Tian-ci. Design and research of underwater target laser imaging system[D]. Harbin Institute of Technology, 2013.
徐天赐. 水下目标激光成像系统设计及研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.
- [7] MA Chen-ming, ZHAO Wen, HAN Shao-kun, et al. Striped tube imaging lasers stripe data extraction algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(4): 195-199.
马晨宁,赵文,韩绍坤,等. 条纹管成像激光雷达条纹数据提取算法[J]. 中国激光, 2012, **39**(4): 195-199.
- [8] HU Cui-chun. Research on underwater 3D Imaging and data processing of scanning camera[D]. Shenzhen University, 2016.
胡翠春. 扫描相机水下三维成像及数据处理研究[D]. 深圳大学, 2016.

- [9] ZANG Jun-heng. Study on data processing technology of striped tube laser imaging system[D]. Harbin Institute of Technology, 2007.
臧俊恒. 条纹管激光成像系统数据处理技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2007.
- [10] ZANG Jun-heng, LI Si-ning, WANG Qi, *et al.* Analysis and treatment of striped image noise in striped laser imaging [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1533-1538.
臧俊恒, 李思宁, 王骐, 等. 条纹管激光成像雷达条纹图像噪音分析与处理[J]. 光子学报, 2008, **37**(8): 1533-1538.
- [11] XU Da-guan. High-speed photography of image tube[M]. Beijing: Science Press, 1990: 1-388.
徐大纶. 变像管高速摄影[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 1-388.
- [12] GELBART A. Flash lidar based on multiple-slit streak tube imaging lidar[C]. SPIE, 2002, **4723**: 9-18.
- [13] WEI Jing-song. Study on striped tube lidar imaging technology[D]. Harbin Institute of Technology, 2013.
魏靖松. 条纹管激光雷达成像技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.
- [14] MA C, HAN S, WANG P. The research on the reconstruction of intensity image based on streak tube imaging lidar[C]. Photonics Asia 2010, International Society for Optics and Photonics, 2010: 78500T.
- [15] YUAN Ya-xiang. Convergence of trust region method[J]. *Computational Mathematics*, 1994, **16**(js): 333-346.
袁亚湘. 信赖域方法的收敛性[J]. 计算数学, 1994, **16**(js): 333-346.
- [16] MA Chang-feng. Optimization method and Matlab program design[M]. Beijing: Science Press, 2010.
马昌凤. 最优化方法及其 Matlab 程序设计[M]. 北京: 科学出版社, 2010.