

条纹管成像激光雷达条纹数据提取算法

马晨宁 赵文 韩绍坤 王平

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 条纹管成像激光雷达(STIL)是一种新型闪光式激光成像雷达,具有大视场、高分辨率、高帧频等优点,其条纹数据的准确提取是后期目标图像三维重构的关键,现有的峰值探测法忽略了噪声与 CCD 采样误差对目标条纹数据偏差的影响,在提取条纹数据时存在较大的误差。针对其影响并基于对特定回波波形及理论回波波形的分析,提出了一种新的条纹数据提取算法,不但能够有效降低噪声和 CCD 采样误差对条纹数据提取的偏差,更能够方便地去除系统的整体综合噪声。为验证该算法的准确性,设计了阶梯目标成像实验,实验结果表明该方法可以明显提高条纹管成像激光雷达条纹数据提取的精度。

关键词 图像处理;激光雷达;条纹管;高斯分布;噪声;拉格朗日插值

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0414002

Data Extraction Algorithm for Streak Tube Imaging Lidar

Ma Chenning Zhao Wen Han Shaokun Wang Ping

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Streak tube imaging lidar (STIL) is a new type of flash laser radar. The characteristic of STIL is wide field of view and high resolution. The exact streak data extraction is crucial in the three-dimensional reconstruction of the target. The deviation caused by the noise and CCD sampling has been ignored by the existing peak detection method. It causes deviation when the data of the streak image is extracted. Based on the analysis of the returned waveform and the theory waveform, a method of streak data extraction algorithm is presented and it not only eliminates the deviation but also filters the system noise effectively. A ladder imaging experiment is designed to verify the accuracy of the algorithm. It shows that this algorithm can improve the accuracy of streak data extraction obviously.

Key words image processing; lidar; streak tube; Gaussian distribution; noise; Lagrange interpolation

OCIS codes 110.2970; 110.4280; 110.6880; 140.3538; 280.3640

1 引 言

条纹管三维成像激光雷达(STIL)由于具有极高的角度分辨率和距离分辨率,可以同时成目标的强度像和距离像,且不需要复杂的扫描装置,所以在军事上运用很广,如小型灵巧炸弹和巡航导弹精确制导、巡航导弹的地形跟随和障碍物回避、直升机避障、飞行器导航、水下鱼类探测和识别、战场中的敌我识别、目标跟踪和目标瞄准等。

正是由于条纹管成像激光雷达有着如此重要和广泛的应用前景,因此近 10 年来国内外都在努力进行这方面的研究^[1~7]。如何从条纹图像中准确地提

取出目标的特征点并构造出其三维图像是其中一个重要的研究课题,国内外相关研究机构也对此进行了研究^[1,3,6],现有的方法都是基于回波波形为类高斯分布的原理,大部分采用的是最直接的峰值探测法^[7,8],认为单时间通道内条纹图像回波信号能量的最强点(条纹图像中表现为单列的灰度最大值点)即为目标的特征点,该点所对应的灰度值为目标的灰度信息,其位置则代表了目标的距离信息。但该方法忽略了噪声对回波信号的干扰以及 CCD 采样对最大值点产生偏差的影响,对条纹数据特征点的提取会产生较大的误差,因此不能准确得到目标的

收稿日期: 2011-11-17; 收到修改稿日期: 2011-12-30

作者简介: 马晨宁(1984—),男,博士研究生,主要从事激光三维重构方面的研究。E-mail: lingerpop@qq.com

导师简介: 韩绍坤(1965—),男,博士,教授,主要从事光电探测方面的研究。E-mail: skhan@bit.edu.cn(通信联系人)

三维信息。

本文针对条纹管成像激光雷达激光回波信号特定波形,提出的条纹数据提取算法不但能够有效降低噪声和 CCD 采样误差对条纹数据提取的偏差,更能够方便地去除系统的整体综合噪声,省去了针对特定噪声模型采用特定噪声去除算法的步骤。设计

的实验论证了该方法的准确性,实验表明提出的算法能够明显提高目标图像数据特征点提取的精度。

2 条纹管激光雷达系统工作原理

条纹管激光雷达系统工作原理如图 1 所示。

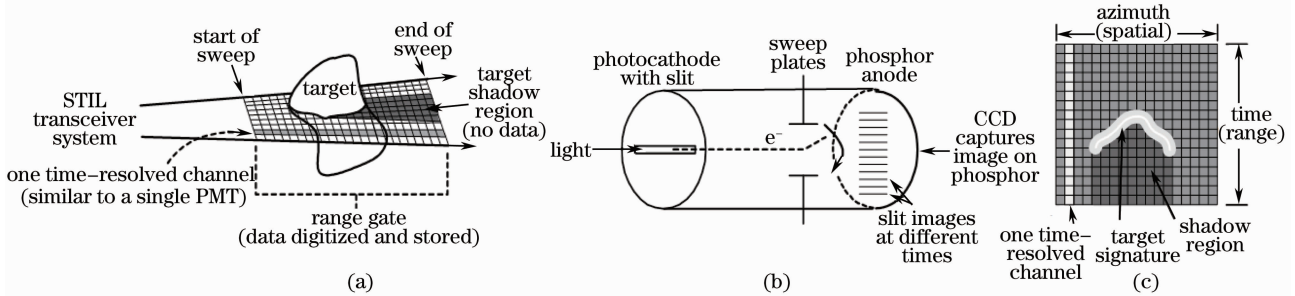


图 1 单狭缝条纹管激光成像雷达成像原理图

Fig. 1 Principle chart of single streak tube imaging lidar

激光器发射脉冲,经过预扩束成扇形激光发射如图 1(a)所示,目标返回的信号经聚焦光学系统返回到条纹管的光电阴极上,光电阴极上的狭缝将产生光电子,其瞬态发射密度正比于该时刻的脉冲强度,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。电子脉冲经偏转系统,在荧光屏上将垂直于狭缝方向展开如图 1(b)所示,该方向对应于时间轴。利用屏幕上条纹的相对位置就可以分辨出目标的距离信息,读取条纹的灰度信息可以得到目标的强度像。图 1(c)为 CCD 上采集的条纹图像,横向代表空间信息,纵向代表距离信息。由于激光脉冲有一定脉宽,而且能量分布满足类高斯分布,在偏转系统扫描电压的作用下,使得单时间通道内的条纹像并不是由单个像素构成,而是有一定的展宽,在根据条纹图像进行三维重构时,需准确提取出单时间通道内目标回波信号的最大值点,以此作为目标的特征点,再根据这些特征点重构出目标的三维图像。

也产生无用信号,这都被认为是环境背景噪声,其中大气后向散射噪声是环境噪声的主要噪声,也是整个系统的主要噪声,对激光目标的回波信号会产生较大的干扰,使得原本满足类高斯分布的目标回波信号,变成类高斯分布曲线和非高斯分布曲线的合成,这是在提取条纹数据时需要考虑的因素。激光脉冲的后向散射噪声能量与距离的关系表示为^[13]

$$P_{Rb} = \frac{P_T B(R) \eta_{sys} \exp(-2\beta R) D^2 \pi}{4\theta_b R^2}, \quad (1)$$

式中 P_T 是发射激光功率; $B(R)$ 为后向散射系数; β 为大气衰减系数; η_{sys} 是激光雷达的光学系统的传输系数; D 为接收光学系统的接收口径; θ_b 为后向散射的角度。后向散射噪声 P_{Rb} 与探测距离 R 表现为一种近指数衰减函数关系,表现在条纹图像上则是后向散射噪声在纵方向上呈近似指数衰减分布。

3.2 成像系统内部噪声

成像系统内部噪声主要有条纹管引入的噪声、CCD 相机引入的噪声、器件耦合噪声等。条纹管是 STIL 中关键的成像器件,用于获得目标距离分辨,其性能直接影响整个系统的距离分辨力,它主要由光电阴极、内增强器、偏转极板和荧光屏组成,噪声主要来源于光电转换和内增强过程,主要类型有光电阴极噪声、内增强噪声和荧光屏颗粒噪声等。CCD 引入的噪声主要有散粒噪声、暗电流噪声、转移噪声、像移噪声和光子噪声等。条纹管与 CCD 相机通过光锥连接仪提高两者的耦合效率,同时也将在一定程度上引入耦合噪声,这种噪声的大小与器件质量和装配质量有关。成像系统内部噪声在条纹

3 条纹管激光雷达成像系统噪声分析

条纹管激光雷达系统主要存在以下两大类噪声^[9-12]:外界环境背景噪声、成像系统内部噪声。

3.1 环境背景噪声

条纹管接收系统的背景噪声包括从太阳、大气、云或者任何不应有的辐射源反射到接收机上的信号,还包括激光能量在大气中的各种组分粒子和烟雾的散射,它们的发射和散射使激光雷达的探测性能受到限制,激光在晴天、有雾、云等的大气传播时,

图像上主要表现为高斯分布的噪声和椒盐噪声。

4 条纹管激光雷达条纹数据提取算法

4.1 单时间分辨通道内返回信号波形分析

图2为单狭缝条纹管激光成像雷达所成的条纹图像,图3为图2对应单时间分辨通道内回波信号波形示意图。其横坐标为像素,代表目标的相对距离信息,纵坐标为灰度,代表光子返回的强度信息。

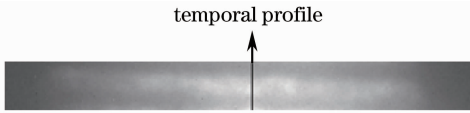


图2 单狭缝条纹管激光雷达条纹图像
Fig.2 Image of single streak tube imaging lidar

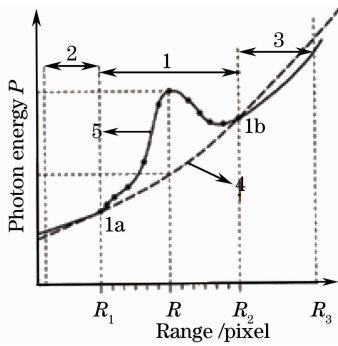


图3 单时间分辨通道回波信号波形示意图
Fig.3 Temporal profile of return photon energy

图3中的回波信号5由类高斯分布和非高斯分布曲线组合而成,由于激光脉冲服从高斯分布,因此在没有噪声影响的情况下,目标的单时间分辨通道

的回波信号也应该服从类高斯分布。在图3中,区域1服从类高斯分布是目标返回信号,区域2和3不服从类高斯分布属于系统噪声信号,而系统的噪声主要由环境噪声中的后向散射噪声所决定,主要呈高斯分布的探测器内部噪声只是加大了总体噪声的幅值,对于其分布则影响不大。即系统综合噪声强度分布应服从指数函数形式^[13,14]

$$Y = A \exp[B(X - K)], \quad (2)$$

如图3中虚线4所示,其中 $X \in (1, R_1) \cup (R_2, R_3)$, $K = R_2$, A 和 B 由图3曲线中类高斯分布的两端点1a和1b的坐标确定。 R_1 和 R_2 经过多次实验统计单时间分辨通道内的波形得到, R_3 为条纹数据的边界点。

图4(b)区域1'为将单时间回波通道返回信号5与系统噪声指数分布曲线4相减得出的目标返回信号类高斯分布示意图。对于已经去除了系统噪声影响的回波信号,其原类高斯曲线灰度值所对应的点R已经不再是目标单通道回波信号的灰度最大值所在点,需重新定位其灰度最大值点。由于CCD成像的离散化,条纹图像只能对整数像素点采样,存在着采样误差,即新的灰度最大值点完全有可能落在两个像素之间,需要通过插值拟合的方法来得到目标信号峰值所在点。采用拉格朗日插值的方法对其进行拟合,得到了比较好的结果。图4(b)中 R_{Lag} 为经过拉格朗日插值后得到的目标峰值所在距离点, P_{Lag} 为拟合后的峰值强度值。

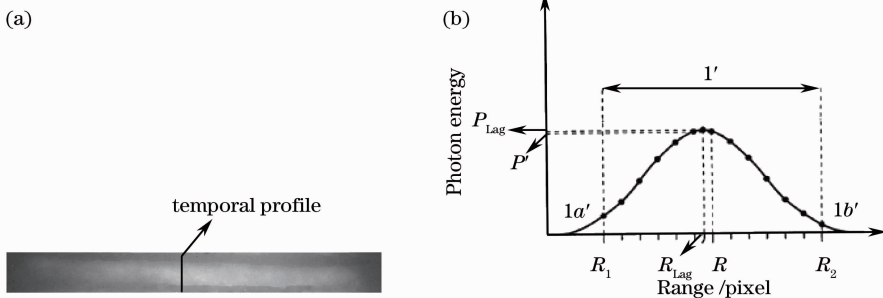


图4 系统噪声去除并经拉格朗日插值处理后的单时间分辨通道目标回波信号分布及效果图。(a)噪声去除后的条纹图像;(b)经处理后单时间分辨通道回波波形示意图

Fig.4 Temporal profile and streak image after subtracting exponential decay function and Lagrange interpolation.

(a) Streak image after filter; (b) temporal profile of return photon energy after process

4.2 算法流程及实验验证

4.2.1 算法流程框图

图5为本文提出算法的流程框图,条纹管激光成像雷达得到条纹图像,首先通过选择性中值滤波在不破坏信号的前提下降低成像系统椒盐噪声,然

后提取出条纹图像时间分辨通道波形5,确定峰值位置点R以及信号波形中类高斯分布的左边缘点 R_1 和右边缘点 R_2 ,并根据数据点 $X \in (1, R_1) \cup (R_2, R_3)$ 拟合出系统综合噪声的指数曲线4,将条纹管单时间分辨通道内的波形5与生成的指数曲线4

相减降低系统噪声,并得到目标返回信号强度的类高斯分布 $1'$ 曲线,最后利用拉格朗日插值法拟合目标返回信号峰值所在点 R_{Lag} , 提取出条纹数据。

4.2.2 算法准确性验证

为说明本文算法相对于传统峰值探测法的优势,搭建了单狭缝条纹管激光雷达成像实验平台,设计了阶梯目标成像实验,实验前首先对实验系统的扫描速度进行了标定,扫描速度的标定结果为

$$v = 49.8 \text{ ps/pixel}, \quad (3)$$

代入实验室构建的条纹管成像激光雷达距离模型公式,表示为

$$Z = c(y - y_0) \times 49.8 \times 10^{-12}, \quad (4)$$

式中 Z 为实物目标点的相对距离, y_0 为条纹图像中相对基准位置, y 代表要提取的目标条纹数据特征

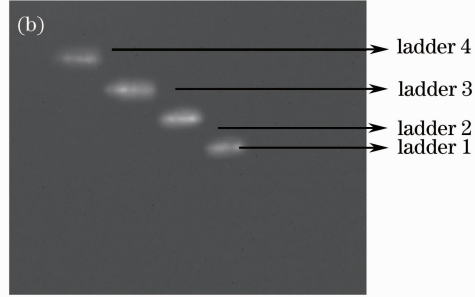
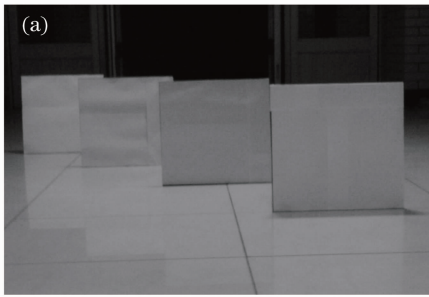


图 6 阶梯目标成像实验。(a)阶梯目标实物;(b)成像结果

Fig. 6 Ladder target imaging experiment. (a) Ladder target; (b) its streak image result

4 个目标成阶梯状排布,每两个目标之间的前后间隔精确为60 cm。数据特征点提取前首先对条纹图像进行选择性地中值滤波,滤除图像中的椒盐噪声。分别采用峰值探测法和本文算法对数据进行提取,提取中对每条条纹数据的所有列分别提取其特征位置,然后求其平均值代表当条条纹数据特征点的位置,并以距离探测器最近的第一个阶梯目标的条纹像为基准位置,对其他条纹数据依据(4)式进行相对距离计算。表1给出了峰值探测法提取的相邻

表 1 峰值探测法提取的目标相对距离

Table 1 Extract the relative distance using peak detection

Target	Number of pixels in streak image using peak detection	Relative distance using peak detection /cm	Relative error / %
Ladder 2 to ladder 1	42	62.6	4.33
Ladder 3 to ladder 1	85	126.7	5.58
Ladder 4 to ladder 1	128	190.7	5.94

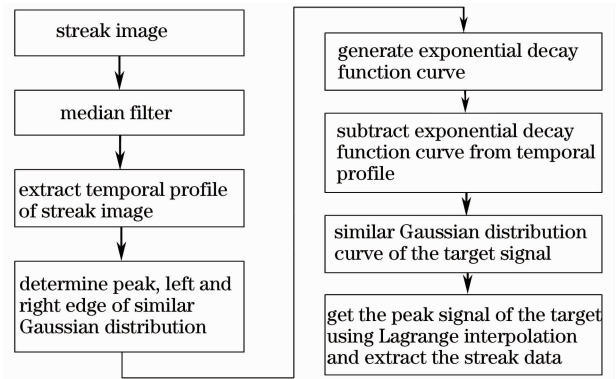


图 5 算法流程框图

Fig. 5 Flowchart of algorithm

点在条纹图像中的纵坐标, c 为光速。

实验中对室外 200 m 处的 4 个目标进行成像,实验中的目标实物及其成像结果如图 6 所示。

阶梯目标特征点在条纹图像上间隔的像素数以及由此计算出的与基准阶梯目标的相对距离。表 2 给出了本文算法提取的结果,两种方法都给出了计算的相对误差。

表 2 本文算法提取的目标相对距离

Table 2 Extract the relative distance using algorithm in this paper

Target	Number of pixels using algorithm in this paper	Relative distance using algorithm in this paper /cm	Relative error / %
Ladder 2 to ladder 1	40.9	60.9	1.50
Ladder 3 to ladder 1	82.2	122.5	2.08
Ladder 4 to ladder 1	124.3	185.2	2.88

由表 1 和表 2 的对比实验数据可以看出,利用本文算法可以更精确地提取出目标的特征点,提高目标距离的探测精度,特征点的灰度值大小代表目标的反射强度信息,特征点与预先测定条纹管静态基准线的比较就可以得到目标的相对距离信息,由

此便可以准确重构出目标的三维图像。

5 结 论

通过对单狭缝条纹管成像激光雷达图像单时间通道内回波信号的分析 and 处理, 准确地从噪声和目标混合的激光回波信号中, 提取出了类高斯分布的目标回波信号, 有效去除了图像中的整体综合噪声。由于 CCD 离散采样误差会引起目标信号峰值的偏移, 利用拉格朗日插值拟合的方法较准确地给出了目标回波信号的峰值位置。为验证该算法的准确性, 设计了阶梯目标成像实验, 实验表明该方法可以明显提高目标特征点提取的精度, 对条纹管激光雷达目标信息的三维重构有着重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Wei Jingsong, Wang Qi, Sun Jianfeng *et al.*. Experiment of four-dimensional imaging with single-slit streak tube lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1231~1235
魏靖松, 王 骐, 孙剑锋等. 单狭缝条纹管激光雷达四维成像实验[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1231~1235
- 2 Wu Long, Zhao Yuan, Jin Chenfei *et al.*. Effects of changing threshold on detection probability of scannerless range-gated lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3117~3123
吴 龙, 赵 远, 靳辰飞等. 变阈值检测对无扫描距离选通激光雷达探测概率的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3117~3123
- 3 B. C. Redman. Streak tube imaging lidar (STIL) for 3-D imaging of terrestrial targets[C]. *SPIE*, 2001, **3541**: 1~12
- 4 A. D. Gleckler. Multiple-slit streak tube imaging lidar (MS-STIL) application[C]. *SPIE*, 2000, **4035**: 266~278
- 5 S. K. Han, L. L. Guo, M. Jiang *et al.*. Simulation and software for lidar system[C]. *SPIE*, 2008, **6622**: 249~259
- 6 C. N. Ma, S. K. Han, P. Wang. The research on the reconstruction of intensity image based on streak tube imaging lidar[C]. *SPIE*, 2010, **7850**: 231~238
- 7 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成像[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 496~500
- 8 Sun Jianfeng, Wei Jingsong, Liu Jinbo *et al.*. Target Reconstruction algorithm for streak tube imaging lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 510~513
孙建峰, 魏靖松, 刘金波等. 条纹管激光成像雷达目标重构算法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 510~513
- 9 Song Ningfang, Yang Dezhao, Sun Mingjie *et al.*. Impact of speckle noise to the property of coherent lidar system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1005001
宋凝芳, 杨德钊, 孙鸣捷等. 散斑噪声对相干激光雷达系统性能的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1005001
- 10 Zang Junheng, Li Sining, Wang Qi *et al.*. Noise analyzing and processing of streak image for streak tube imaging lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1534~1537
臧俊恒, 李思宁, 王 骐等. 条纹管激光成像雷达条纹图像噪声分析与处理[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1534~1537
- 11 Dai Yongjiang. The Principle of Lidar[M]. 4th edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 21~56
戴永江. 激光雷达原理[M]. 第四版. 北京: 国防工业出版社, 2002. 21~56
- 12 Xu Dalun. Image Converter Tube High-Speed Photography[M]. Beijing: Science Press, 1990. 131~144
徐大纶. 变像管高速摄影[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 131~144
- 13 Jiang Yanbing. Array Imaging Three Dimensional Lidar[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. 18~28
姜燕冰. 面阵成像三维激光雷达[D]. 杭州: 浙江大学, 2009. 18~28
- 14 Feng Longling. Effects of atmospheric scatter on laser weapons system and countermeasures[J]. *Acta Armamentarii*, 2003, **24**(4): 521~524
冯龙龄. 大气散射对激光武器系统作战效能的影响及对策[J]. *兵工学报*, 2003, **24**(4): 521~524

栏目编辑: 何卓铭