

用于条纹像距离提取的迭代加权质心方法

叶光超, 李旭东, 董志伟, 樊荣伟, 陈德应

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 条纹阵列探测激光雷达具有测距精度高、作用距离远、探测景深宽和数据更新率高等显著优点, 已被广泛应用于地形测绘、海岸带监测、城市三维重构、森林生态研究等领域中。传统的信号鉴别方法在回波信号距离提取过程中存在一定的局限性, 影响了条纹阵列探测激光雷达的距离分辨能力和目标识别能力。针对这一问题在处理条纹图像时引入了一种迭代加权质心算法, 讨论了该算法在质心定位中的独特优越性, 结合条纹阵列探测激光雷达的信号分布特征确定了该算法中关键参数的选取。利用该算法在 1.4 km 的作用距离下获得了具有清晰边界特征的目标距离像, 有效抑制了距离提取过程中产生的边界模糊效应, 显著提升了系统的细节分辨能力, 相比于传统的质心算法, 测距精度提高了 17%。

关键词: 激光雷达; 条纹阵列探测器; 测距精度; 质心算法

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0230004

Iteratively weighted center of gravity algorithm used for depth extraction of streak image

Ye Guangchao, Li Xudong, Dong Zhiwei, Fan Rongwei, Chen Deying

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Streak array detecting lidar has advantages of high ranging accuracy, long detecting distance, wide ranging gate and high data acquiring rate, which is widely used in topographic mapping, coastal zone monitoring, urban 3D remodeling, forest ecological research etc. The traditional method on signal discrimination has some limitations in the depth extraction of echo signal, which affects the capability of depth distinguish and target recognition of streak array detecting lidar. For this problem, an iteratively weighted centroid algorithm was introduced while dealing the streak images and the unique advantages on centroid location of the algorithm were discussed. The key parameters of the algorithm were determined according to signal distribution character of streak array detecting lidar. By using this algorithm, the range image with clear boundary feature of a target was obtained at the distance of 1.4 km. The boundary blurring effect was effectively suppressed in the depth extraction process and the resolution ability of the system was improved. Compared with traditional centroid algorithm, the ranging accuracy was improved by 17%.

Key words: lidar; streak array detector; ranging accuracy; centroid algorithm

收稿日期: 2017-08-05; 修订日期: 2017-10-13

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ040164)

作者简介: 叶光超(1984-), 男, 博士生, 主要从事激光雷达方面的研究。Email: ye.guangchao@foxmail.com

导师简介: 陈德应(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光雷达方面的研究。Email: deyingchenhit@163.com

0 引言

条纹管成像激光雷达(streak tube imaging lidar, STIL)作为一种新体制的激光雷达目前已被广泛应用于地形测绘、海岸带监测、城市三维重构、森林生态研究等领域中^[1-4]。STIL 系统由于采用了先进的信号探测体制和合理的扫描方式,通常具有视场宽、精度高、景深大、作用距离远和数据率高^[5-7]等显著优点。

典型的 STIL 系统回波条纹图像是 CCD 对磷屏上回波信号的读出结果^[8-10]。条纹图像中每一列代表一个时间分辨通道,每一行代表一个时隙。为了获得目标的距离像要对原始回波条纹图像进行距离提取,在条纹图像的距离提取过程中首先要确定每一个时间分辨通道内信号的质心位置,这就需要选择一种合适的质心定位方法。目前 STIL 系统的质心定位方法主要包括最大值法、高斯拟合法和质心权重(center of gravity, COG)法^[11]。最大值法的计算速度最快,但其质心定位精度不高,严重影响了雷达系统的测距精度;高斯拟合法的质心定位精度较高,但其缓慢的计算速度却限制了雷达系统的数据更新率。COG 算法能够较好地兼顾计算速度和定位精度,因此在 STIL 系统的距离提取过程中应用最为广泛。但是 COG 算法往往对回波条纹图像的信噪比要求较高,当条纹图像中存在较强的背景噪声时,质心定位精度将受到较大的限制。另外,COG 算法在处理一些特殊类型的条纹图像时,会得到一些不够准确的距离提取结果。

为了进一步改进 STIL 系统的信号鉴别方法,文中将在距离提取过程中引入一种迭代加权质心算法(iteratively weighted center of gravity, IWCOG),并通过距离成像实验研究该算法对提高系统距离分辨能力和目标识别能力的作用。

1 迭代加权质心算法的基本原理

典型的 STIL 系统回波条纹图像如图 1 所示,利用传统的 COG 算法对其进行处理时虽然计算效率很高,但是它对系统的采样率和图像的信噪比往往具有较高的要求。通常 STIL 系统中受到条纹宽度和 CCD 像元尺寸的限制,实际条纹图像的单个时间分辨通道内采样信号只能覆盖有限个像素,无法满足

无偏估计的要求。并且 COG 算法对噪声十分敏感,因此当背景噪声较大时,直接利用质心算法往往无法达到理想的定位精度^[12-13]。

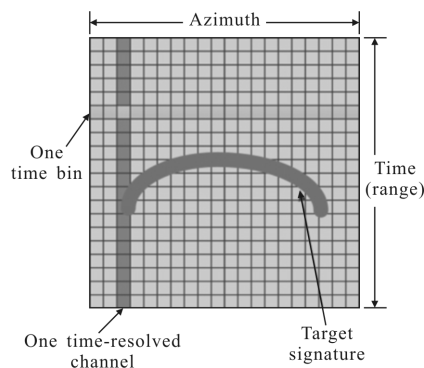


图 1 典型的回波条纹图像

Fig.1 Typical streak image

为了克服噪声对质心定位精度的影响,研究人员开发了 IWCOG 算法。这种算法在原始的 COG 算法基础上引入了加权因子^[14-15],从而在计算信号质心的过程中更加完善地考虑了信号的形貌因素的影响。

利用 IWCOG 算法确定质心的数学表达式如下:

$$x_{cal}^n = \frac{\sum_{i=1}^N x_i w_i^n I_i}{\sum_{i=1}^N w_i^n I_i} \quad (1)$$

式中: x_{cal}^n 为第 n 次迭代的质心计算结果; w_i^n 为第 i 个采样点在第 n 次迭代中的加权因子,它取决于信号的理想形貌特征。通过引入 w_i^n ,偏离采样中心不同距离的采样点的信号强度值 I_i 对最终的质心计算结果 x_{cal}^n 具有不同的贡献。一般情况下,距离采样中心距离越近, x_{cal}^n 越大,对 x_{cal}^n 的影响也会越大。 w_i^n 的具体取值可以由信号的理想分布函数得到。对于 STIL 系统,其条纹图像每个时间通道内的理想信号分布函数为高斯型,因此 IWCOG 算法中加权因子表达式为:

$$w_i^n = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \tau} \exp \left[-\frac{(x_i - x_{cal}^{n-1})^2}{2\tau^2} \right] \quad (2)$$

迭代过程中,条纹宽度 τ 保持不变,其取值可以根据条纹图像预先分析得出,信号预判位置的初值为:

$$x_{cal}^0 = \frac{\sum_{i=1}^N x_i I_i}{\sum_{i=1}^N I_i} \quad (3)$$

利用 IWCOG 算法计算质心位置的流程图如图 2 所示, 当质心位置的变化幅度小于某一阈值时迭代停止。若所需的迭代次数为 n , 则 IWCOG 算法的计算时间为 COG 算法的 n 倍。

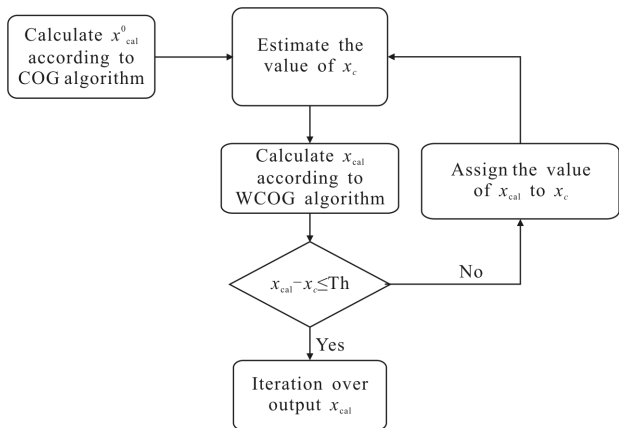


图 2 迭代加权质心算法流程图
Fig.2 Flow chat of IWCOG algorithm

2 实验装置

为了研究 IWCOG 算法在条纹图像距离提取过程中发挥的作用, 搭建了一套用于距离成像的 STIL 原理验证系统, 其实验装置如图 3 所示。

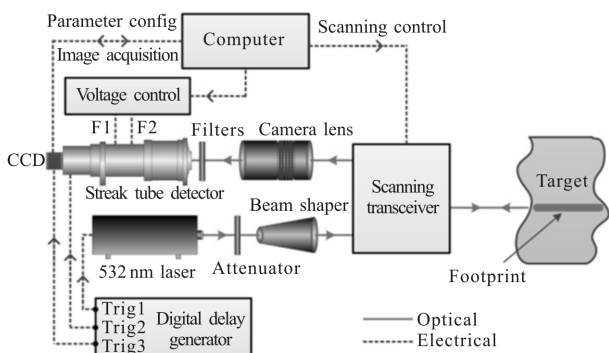


图 3 STIL 系统实验装置图
Fig.3 Experimental setup of STIL system

实验中采用 532 nm 的调 Q 固体激光器作为发射源, 经过光束整形模块后激光束在水平方向上具

有较宽的发散角(7.5°), 在垂直方向上则近乎准直发射(0.006°)。光束整形模块主要由三块柱面透镜组成, 被整形后的光束在目标上形成线型的激光脚点。条纹阵列探测器前段采用 80 mm 孔径的尼康镜头对目标回波信号进行接收, 镜头焦距在 70~300 mm 范围内可连续调节。回波信号被镜头接收后, 经空间和光谱滤波器滤波后成像于条纹阵列探测器的光阴极上。滤波器由 3 mm 的狭缝和中心波长为 532 nm 的窄带滤光片组成, 狭缝的开口方向应保证与激光脚点的长轴方向相一致, 滤光片则能够达到小于 10 nm 的带宽。通过扫描电场的作用, 磷屏上的条纹图像将包含时间分辨信息, 并通过级联于条纹阵列探测器内部的一个微通道板像增强器来实现信号的放大。放大后的条纹图像被一个最高可达 16 位的 CCD 采集并存储于计算机中, CCD 的最高分辨率为 1000×1000。为了能够在距离门内探测到回波信号, 实验中利用高精度延时信号发生器来同步并配置激光器、条纹阵列探测器和 CCD 三者之间的延时。最后, 激光束通过一个 600 mm 口径的扫描转镜对目标实现扫描成像。

3 IWCOG 算法在抑制边界模糊效应中的作用

条纹阵列探测器是 STIL 系统的核心器件, 它同时承担了时间分辨和成像两个主要功能, 对于理想点光源, 通过条纹阵列探测器成像后在其磷屏上必将获得扩散的圆光斑图像, 其光斑半径与条纹阵列探测器的点扩散函数有关。也就是说每个时间分辨通道内不仅包含自己的信号分布, 还会叠加上临近时间通道内的信号的弥散斑。当被测目标表面的距离变化梯度较小时, 相邻时间分辨通道内信号的质心位置变化梯度也很小, 此时弥散斑对质心定位的影响不大。但是当被测目标表面的距离变化梯度较大时, 相邻时间分辨通道内信号的质心位置就会产生突变。此时, 在弥散斑对质心定位的影响下距离像中就会产生明显的边界模糊效应。

图 4 为一条纹图像的局部放大图, 水平方向为空间轴, 垂直方向为时间轴。图中的条纹信号存在多处质心突变位置, 下面将以其其中竖线对应的的时间分辨通道内的信号分布为例进行分析。

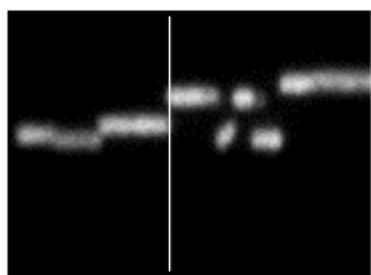


图 4 会引起边界模糊效应的原始条纹图像

Fig.4 Raw streak image leading to edge blurring effect

如图 5 所示, 该时间分辨通道内的信号服从双高斯分布, 由峰值强度不同的两个高斯信号共同组成。若整个被测目标反射率相差不大且均为漫反射面, 则峰值较大的高斯信号应为该通道的自身信号, 而峰值较小的高斯信号则是相邻通道的弥散信号。在处理这类双高斯分布型信号时, 笔者希望能够将质心位置定位到较大的峰值位置处。

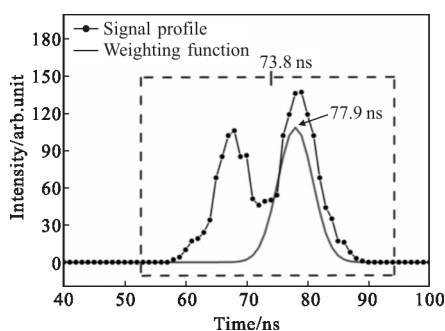


图 5 质心突变处的信号分布及处理结果

Fig.5 Signal profile with centroid saltation and the processing result

传统的 COG 算法会根据包含整个双高斯信号在内的整个通道内的信号强度来计算质心位置, 计算结果会介于两个峰值位置之间, 通过该算法得到的质心位置为 73.8 ns。然而, 当利用 IWCOG 算法计算质心时, 由于引入了高斯型的加权因子的作用, 算法能够有效判断哪个峰值位置为该通道自身的主要信号, 从而更加准确地定位质心位置。通过 IWCOG 算法计算得到的质心位置为 77.9 ns, 质心定位偏差减小了 4.1 ns。

分别利用 COG 算法和 IWCOG 算法对图 4 中的整个条纹信号进行逐列处理, 得到结果如图 6 所示。利用 COG 算法获得的处理结果在质心突变处会表现为连续变化, 无法得到一个清晰的边界, 距离提取结果不能正确地反应被测目标的真实形状, 形成

了边界模糊效应。而当利用 IWCOG 算法处理原始条纹图像时, 质心计算结果在突变处具有清晰的边界, 不再呈连续变化状态, 能够正确地还原被测目标的真实形状, 有效地克服了边界处模糊不清的缺陷。

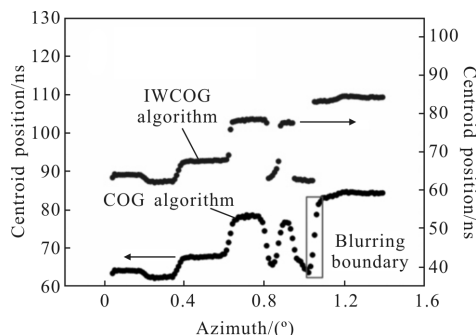


图 6 分别利用 COG 算法和 IWCOG 算法对条纹图像的处理结果

Fig.6 Processing results of streak image using COG algorithm and IWCOG algorithm respectively

4 远距离目标成像实验

为了更加直观地说明 IWCOG 算法在解决边界模糊效应中的作用, 开展了外场验证实验。被测目标为一幢距离 1.4 km 的楼房, 如图 7(a) 所示。激光束经整形后在楼房目标上形成线型的激光脚点, 并沿水平方向扫描整幢大楼, 当激光脚点落在大楼的玻璃上时 (如图中竖线所示位置), 探测器就会采集到如图 7(a) 中所示的条纹图像。可见图像中的条纹信号具有多处质心突变位置, 这是因为激光透射玻璃后入射到室内的墙壁上, 被室内墙壁反射的回波信号与被楼房外墙直接反射的回波信号具有一定的时间差。分别利用 COG 算法和 IWCOG 算法处理回波条纹图像后重建出整个楼房的距离像如图 7(b) 和 (c) 所示。用矩形 B 在 3 幅图中均标记了一个窗户的所在位置, 在图 7(b) 中由于边界模糊效应的作用该窗户的形状模糊不清、难以识别; 而从图 7(c) 中则能够相对容易地辨别出窗户的位置和形状。对比两种算法下楼房最左侧 13 个窗户的成像结果也可以明显地看出 IWCOG 算法的优越性。另外, 分析矩形 A 对应区域内的距离像还能发现, 使用 IWCOG 算法后能更加准确地分辨出楼房外墙与室内墙壁间的距离差 (1.5 m), 而利用 COG 算法所分辨的距离差 (0.5 m) 则相对偏小。综合以上分析可以确定 IWCOG 算法在解决边界模糊效应中发挥了重要的作用。

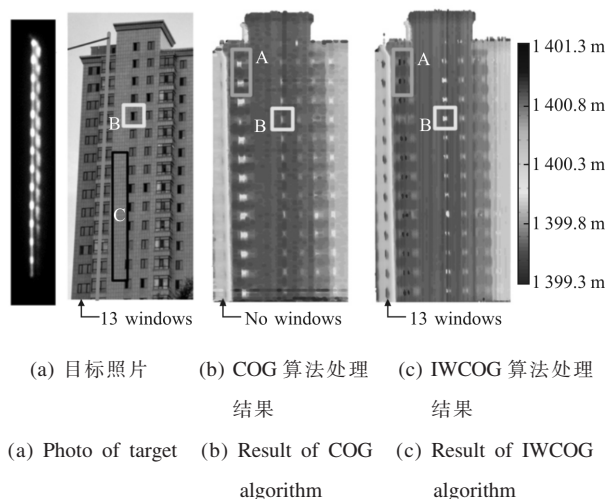


图 7 分别利用 COG 算法和 IWCOG 算法获得的距离像

Fig.7 Range images using COG algorithm and IWCOG algorithm respectively

此外，还分别利用两种算法对目标上一平面区域 C 内的回波条纹信号进行了质心定位并获得其距离提取结果，如图 8 所示。根据距离提取结果的抖动程度可以判断利用 IWCOG 算法时系统的测距精度应相对较高。COG 算法和 IWCOG 算法下距离测量结果的方差分别为 0.18 m 和 0.15 m，说明利用 IWCOG 算法使系统的测距精度提高了 17%。

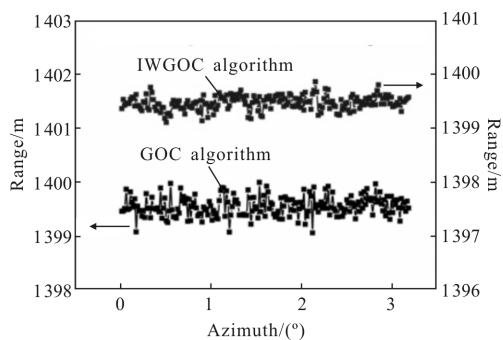


图 8 分别利用 COG 算法和 IWCOG 算法对平面区域距离数据的处理结果

Fig.8 Depth data of planar area using COG algorithm and IWCOG algorithm respectively

5 结论

选择合理的信号鉴别方法对条纹阵列探测激光雷达距离成像结果的准确性具有十分重要的作用。传统的质心算法因其计算过程过于简单在处理回波条纹图像时会产生边界模糊效应，并且测距精度还

会因背景噪声的增加而显著降低。针对这样的问题，文中在条纹图像距离提取过程中采用了一种迭代加权质心算法，该算法通过引入高斯型加权因子并对计算结果进行反复迭代，有效抑制了距离提取过程中产生的边界模糊效应并提高了系统的测距精度。利用该算法结合一套 STIL 原理验证系统实现了对 1.4 km 处被测目标特征细节的准确识别，并将测距均方根误差降低至 0.15 m，相比于传统的质心算法测距精度提高了 17%。文中的研究表明，在对计算速度没有过高要求的情况下，可利用迭代加权质心算法来改进条纹阵列探测激光雷达的距离分辨能力和目标识别能力。

参考文献：

- [1] Yu Xiao, Yao Yuan, Xu Zhengping. Laser imaging optical system design with a shared aperture employing APD array [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 349–356. (in Chinese)
于潇, 姚园, 徐正平. 采用 APD 阵列的共口径激光成像光学系统设计[J]. *中国光学*, 2016, 9(3): 349–356.
- [2] Xia Wenzhe, Han Shaokun, Cao Jingya, et al. Ladar range estimation technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0906005. (in Chinese)
夏文泽, 韩绍坤, 曹京亚, 等. 激光雷达距离估计技术[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(9): 0906005.
- [3] Gleckler A D, Gelbart A. Three-dimensional imaging polarimetry[C]//Proceeding of SPIE, 2001, 4377: 175–185.
- [4] McLean J W. High-resolution 3D underwater imaging [C]//Proceeding of SPIE, 1999, 3761: 10–19.
- [5] Liu Zhiqing, Li Pengcheng, Chen Xiaowei, et al. Classification of airborne LiDAR point cloud data based on information vector machine [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2016, 24(1): 210–219. (in Chinese)
刘志青, 李鹏程, 陈小卫, 等. 基于信息向量机的机载激光雷达点云数据分类[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1): 210–219.
- [6] Gelbart A, Redman B C, Light R S, et al. Flash lidar based on multiple-slit streak tube imaging lidar [C]//Proceeding of SPIE, 2002, 4723: 9–18.
- [7] Gleckler A D, Gelbart A, Bowden J M. Multispectral and hyperspectral 3D imaging lidar based upon the multiple-slit streak tube imaging lidar [C]//Proceeding of SPIE, 2001, 4377: 328–335.
- [8] Dong Zhiwei, Zhang Weibin, Fan Rongwei, et al. Streak

- tube principle LiDAR imaging simulation and experiment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0730001.
董志伟, 张伟斌, 樊荣伟, 等. 条纹原理激光雷达成像仿真及实验[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0730001.
- [9] Chen Shiwei, Yang Xiaogang, Zhang Shengxiu, et al. Single infrared stripe nonuniformity correction algorithm based on adaptive diffusion models [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 106–113. (in Chinese)
陈世伟, 杨小冈, 张胜修, 等. 基于自适应扩散模型的单帧红外条纹非均匀性校正算法 [J]. 中国光学, 2016, 9(1): 106–113.
- [10] Eagleton R T, James S F. Dynamic range measurements on streak image tubes with internal and external microchannel plate image amplification [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(3): 2215–2219.
- [11] Sun Jianfeng, Wei Jingsong, Liu Jinbo, et al. Target reconstruction algorithm for streak tube imaging lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(2): 510–513. (in Chinese)
孙剑峰, 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.
- [12] Delabie T, Schutter J D, Vandenbussche B. An accurate and efficient gaussian fit centroiding algorithm for star trackers [J]. *Journal of the Astronautical Sciences*, 2015, 61(1): 60–84.
- [13] Yang Zijian, Chen Feng, Li Chao, et al. Transient effect of dead time of photon-counting in micro-pulse lidar[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2015, 23(2): 408–414. (in Chinese)
杨子健, 陈锋, 李抄, 等. 微脉冲激光雷达中的光子计数死区时间瞬态效应[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 408–414.
- [14] Wang Hongyuan, Jiang Yanrong, Jiao Xiaoquan, et al. An improved weighted-centroid self-localization algorithm [J]. *Computers and Applied Chemistry*, 2014, 31(3): 263–267. (in Chinese)
王洪元, 蒋燕蓉, 焦筱俊, 等. 一种改进的加权质心自定位算法[J]. 计算机与应用化学, 2014, 31(3): 263–267.
- [15] Guo W, Zhao L, Tong C S, et al. Adaptive centroid-finding algorithm for freeform surface measurements [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(10): 75–83.