文章编号:1001-5078(2018)05-0633-05

·光学技术 ·

# 改进阈值分割的光斑中心定位方法

赵 琦,郝士琦,张 岱 (电子工程学院,安徽合肥 230037)

**摘 要:**光斑定位精度是激光通信瞄准、捕获、跟踪(APT)系统的重要指标,而传统的光斑定位 算法,面临定位精度低,抗干扰能力差,实时性差等问题。为了满足激光通信 APT 系统光斑高 精度定位的需求,提出一种改进的激光光斑中心定位方法。该方法通过改进阈值分割,降低了 噪声干扰,提高了光斑定位精度。结果表明,与传统的阈值分割方法相比,光斑中心计算精度 提高了 25% 以上,是一种可行的光斑中心定位方法。

关键词:激光通信;光斑定位精度;阈值分割;质心法

中图分类号:TP391.41 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2018.05.018

# Location method of spot center based on improved threshold segmentation

ZHAO Qi, HAO Shi-qi, ZHANG Dai

(College of Electronic Engineering, Hefei 230037, China)

**Abstract**:Spot positioning accuracy is an importantindicator for laser communication acquiring, tracking and positioning(APT) system, but the traditional spot positioning algorithm has some problems such as low positioning accuracy, poor anti – interference ability and poor real – time performance. In order to meet the requirement of high precision positioning of laser communication APT system, an improved laser spot center positioning method is proposed. The noise interference is reduced by improving the threshold segmentation to highten the positioning accuracy. The results show that compared with the traditional threshold segmentation method, the accuracy of the spot center is increased by more than 25%, so it is a feasible spot positioning algorithm.

Key words: laser communication; spot positioning accuracy; threshold segmentation; centroid method

## 1 引 言

在卫星光通信系统中,捕获、瞄准、跟踪系统 (APT系统)是最为关键的技术之一,CCD 探测器对 目标的定位精度直接影响信标光的质量,进而影响 目标定位精度,因此,研究高精度的光斑定位方法具 有重要的意义<sup>[1-3]</sup>。常用的光斑定位方法有质心 法<sup>[4]</sup>、Hough 变换法<sup>[5]</sup>、高斯拟合法<sup>[6]</sup>等。质心法 计算简单,但抗干扰能力较低,容易受噪声影响。 Hough 变换法需要逐点投票、记录,所用时间较长, 且精度也不高。高斯拟合法算法复杂,计算量大,难 以满足卫星光通信实时性的要求。

本文通过对阈值选取方法的改进,通过设定更 加合理的阈值滤除不必要的噪声干扰并减少计算 量,解决了传统质心法抗干扰能力差的问题,又利用 质心法计算效率高的优势,在满足实时性的同时得 到更高精度的定位结果。

作者简介:赵 琦(1993 - ),男,硕士研究生,研究方向为激光通信技术。E-mail:zhaoqi619326014@163.com 收稿日期:2017-08-30;修订日期:2017-10-11

634

#### 2 传统的阈值选取方法

# 2.1 双峰法

双峰法<sup>[7]</sup>的基本思想是根据图像的灰度直方 图,可以将图像分为目标和背景两部分,这两部分都 形成高峰,图像的阈值存在于两峰间的谷底。通过 查找双峰直方图的谷底来确定分割阈值。当图像的 目标和背景的灰度级存在明显的差别时,就可以把 谷底当作图像的分割阈值,并可以取得良好的效果。

在使用双峰阈值分割法进行图像分割之前,先 对图像去噪,然后在处理后的直方图上进行峰谷检 测,来获得合理的分割阈值。由于直方图不能描述 图像像素的任何位置信息,只能表明图像中各个灰 度级上有多少个像素,所以对应的一个直方图可以 有若干个不同的图像。

2.2 最大熵阈值分割方法

最大熵阈值分割方法<sup>[8]</sup>的依据是图像分割选 取最佳阈值后,分割后的图像所保留的信息量应该 最大,即熵最大。

对于灰度变化范围为 [0,L-1] 的图像,假设 图像的目标区域由灰度级低于 t 的像素点构成,背 景区域 B 由灰度级高于 t 的像素点构成,那么各概 率在其本区域的分布分别为:

 $O \boxtimes : p_i/p_t, i = 0, 1, \dots, t;$ B \Bigsi:  $p_i/1 - p_t, i = t + 1, t + 2, \dots, L - 1;$ 

其中,  $p_i = \sum_{i=0}^{r} p_i \circ$ 

目标区域和背景区域的熵分别为:

$$H_{o}(t) = -\sum_{i} (p_{i}/p_{i}) \lg(p_{i}/p_{i}), i = 0, 1, \cdots, t$$
(1)

$$H_B(t) = -\sum_{i} (p_i/(1 - p_i)) \lg(p_i/(1 - p_i)),$$

 $i = t + 1, t + 2, \cdots, L - 1$  (2)

熵函数的定义为:

$$\phi(t) = H_o(t) + H_B(t) = \lg \frac{P_i}{1 - p_i} + \frac{H_i}{P_i} + \frac{H_L - H_i}{1 - P_i}$$
(3)

式中,

$$H_{i} = -\sum_{i} p_{i} lg p_{i}, i = 0, 1, \dots, t$$
$$H_{L} = -\sum_{i} P_{i} lg P_{i}, i = 0, 1, \dots, L - 1$$
当熵函数取得最大值时对应的灰度值就是所求

$$T = \max\{\phi(t)\}$$
(4)

#### 3 光斑中心计算方法的改进

3.1 最大类间方差法

最大类间方差法<sup>[9]</sup>(Otsu)是基于最小二乘法 原理得出的阈值分割方法。一维Otsu 阈值分割方 法将原始图像依据灰度级分为目标和背景两类,当 其类间方差最大时得到最佳阈值。Otsu 阈值分割 方法在图像的一维直方图上进行,而图像的一维直 方图的计算简单直观,因此具有很高的执行效率。

令一幅 *M* 行 *N* 列的灰度图像 *I* = f(x, y) 的灰 度级数为 *L*,其中灰度为  $i(i \in \{0, 1, 2, \dots, L - 1\})$ 的像素个数为  $n_i$ ,则有  $\sum_{i=0}^{L-1} n_i = M \times N$ ,且灰度级为 i的像素出现的频数为:

$$p_i = \frac{n_i}{M \times N} \tag{5}$$

所有像素的平均灰度为:

$$\mu = \sum_{i=0}^{L-1} i p_i \tag{6}$$

将阈值为t的图像分为目标 $A_0$ 和背景 $A_1$ 两类, 其中 $A_0 = \{1 \sim t\}, A_1 = \{(t+1) \sim (L-1)\}, 其$ 产生的概率分别为:

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^{t} p_i = \omega(t) \tag{7}$$

$$\omega_1 = \sum_{i=t+1}^{L-1} p_i = 1 - \omega(t)$$
(8)

$$\mu_0 = \sum_{i=0}^{t} \frac{ip_i}{\omega_0} = \frac{\mu(t)}{\omega(t)}$$
(9)

$$\mu_1 = \sum_{i=t+1}^{L-1} \frac{ip_i}{\omega_1} = \frac{\mu - \mu(t)}{1 - \omega(t)}$$
(10)

其中, $\mu_0$ , $\mu_1$ 分别为 $A_0$ 和 $A_1$ 的平均灰度级; $\omega(t) = \sum_{i=0}^{t} p_i$ 为直方图之和; $\mu(t)$ 是阈值为t时的类直方图 之和, $\mu(t) = \sum_{i=0}^{t} i p_i$ 。 类间方差为:  $\sigma_t^2 = \omega_0 (\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu)^2$  (11) 由方差定义可得,图像的灰度均方差为:

$$\sigma^{2} = E[(i - \mu)^{2}] = \sum_{i=0}^{L-1} p_{i} (i - \mu)^{2}$$
(12)

为了评估阈值 t 的类分离性能,引入评判函数:

$$\eta = \frac{\sigma_i^2}{\sigma^2} \tag{13}$$

使得评判函数取得最大值的 t 值即为最佳阈 值。对于一幅已知图像,其灰度均方差为定值,因此 评判函数最大时的阈值 t 即为类间方差最大时阈值 t 的取值。

使阈值  $t \neq 1 - L$  之间变化,计算不同 t 值下的 类间方差  $\sigma_t^2(t)$ ,使得  $\sigma_t^2(t)$  最大的 t 值即为所求的 最佳阈值,即:

$$t = \operatorname{Argmax}\{\sigma_{t}^{2}(t)\}$$
(14)



Fig. 1 Positioning error of three threshold segmentation Methods

图1中,1 表示的是双峰阈值分割的质心定位 误差,2 表示的是最大熵阈值分割的质心定位误差, 3 表示的是 Otsu 阈值分割的质心定位误差。从图中 可以看出,这三种阈值分割方法的定位误差都随噪 声的增加而增大,双峰阈值分割的定位误差都随噪 变化最大,在噪声方差为 10 时就达到了 0.4 像素, 最大熵阈值分割在噪声水平较小的情况下比其他两 种方法的定位误差要大,Otsu 阈值分割的定位误差 最小。

3.2 改进的阈值选取方法

传统的一维 Otsu 阈值分割方法虽然计算简单, 具有较好的分割效果,但其只考虑了目标和背景中 的灰度均值,没有充分利用灰度像素之间的相关信 息,而且在噪声的影响下,灰度直方图的波峰波谷会 变得不明显,使得分割效果变差。针对这种现象,现 对阈值判别函数进行改进,在传统的一维 Otsu 阈值 分割方法的基础上提出一种改进的阈值分割方法。

在设定阈值为t的情况下,光斑图像的灰度均 方差 $\sigma_0$ 、 $\sigma_1$ 分别为:

$$\sigma_0 = \sum_{i=0}^{t} p_i (i - \mu_0)^2 / \omega_0$$
(15)

$$\sigma_1 = \sum_{i=1}^{L-1} p_i (i - \mu_1)^2 / \omega_1$$
 (16)

由上式可知,灰度均方差越小,说明阈值分割后 各部分图像之间的差别越小,分割愈加合理。综合 考虑图像灰度的离散程度及类间方差对阈值选取的 影响,将评判函数改进为:

$$\eta' = \frac{\sigma_t^2}{\sigma_\omega^2} = \frac{\sigma_t^2}{\omega_0 \sigma_0 + \omega_1 \omega_1}$$
(17)

当 $\eta'$ 越大时就会取得越好的分类效果,此时的 t值就是最佳阈值。根据最佳阈值将目标类 $A_0$ 的灰 度值设为0,就能得到最理想的分割效果,从而进行 高精度的中心计算。

3.3 光斑中心定位过程

对于改进的一维 Otsu 阈值分割方法,其光斑定 位过程如图 2 所示。



首先通过采集处理减小背景杂散光及 CCD 基 底偏置噪声的随机噪声,获取对比度比较明显清晰 图像,然后进行滤波进一步消除激光光斑图像的噪 声点,减小其对阈值选取精度的影响,通过改进的阈 值选取方法来获取光斑轮廓,最后利用质心法进行 光斑中心计算。

质心法的原理:首先,将光斑图像处理为灰度图像,然后根据平面几何原理求取光斑中心坐标。一幅由 m 个像素组成的光斑图像,每个像素对应于空间坐标(x,y)及其灰度 G(x,y),则其中心坐标为:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{m} x_i G_i(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^{m} G_i(x_i, y_i)}, Y = \frac{\sum_{i=1}^{m} y_i G_i(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^{m} G_i(x_i, y_i)}$$
(18)

#### 4 结果分析

#### 4.1 高斯噪声影响下定位精度

为了研究高斯噪声对光斑定位精度的影响, 将 Matlab 生成 20 幅已知光斑中心位置的光斑图 像,添加相同大小的高斯噪声。之后按照上述光 斑中心定位流程,分别使用传统一维 Otsu 阈值分 割法和改进后的 Otsu 阈值分割方法进行光斑中心 计算,得到每幅图像的光斑中心计算误差,仿真结 果如图 3 所示。



图 3 给出了 20 幅添加相同高斯噪声的光斑的 定位误差分布情况,其中横坐标表示光斑图像的帧 数,纵坐标表示光斑中心定位误差,矩形表示的是传 统 Otsu 阈值分割方法的定位误差,圆形表示的是改 进的 Otsu 阈值分割方法的定位误差。从图中可以 看出,改进的阈值分割方法光斑中心定位误差要小 于传统的 Otsu 阈值分割方法。通过传统 Otsu 阈值 分割方法得到的 20 幅图像的平均误差为 0.47 像 素,采用改进阈值分割得到的平均误差为 0.33 像 素,光斑定位精度提高了 30%。通过上述对比可 知,对于被高斯噪声影响的光斑,本文提出的方法有 更高的定位精度。

4.2 湍流影响下的定位精度

利用湍流相位屏仿真得到经过大气湍流后的光 斑图像,仿真中光波波长为800 nm,湍流强度 $C_n^2$  =  $10^{-16}$  m<sup>-2/3</sup>,传输距离为20 km,接收端位于相位屏 中心,接收端口径为0.25 m,系统焦距为1 m。计算 光斑中心,得到误差分布如图4 所示。

图 4 给出了相同湍流强度影响下 20 幅光斑图像的定位误差分布情况,其中光斑中心坐标已知。 矩形表示传统 Otsu 阈值分割方法的光斑定位误差,圆形表示改进后的 Otsu 阈值分割方法的光斑定位 误差。从图中可以看出,矩形曲线整体在圆形曲线 下方,说明改进后的光斑中心定位误差要小于传统 方法求出的光斑中心误差。采用传统一维 Otsu 阈 值分割方法的光斑中心定位误差平均值为 0.66 像 素,改进方法得到的定位误差均值为 0.49 像素,定 位精度提高了 26%。对于受湍流影响的光斑,改进 的阈值分割方法具有更高的定位精度。



g. 4 Error distribution of the center of the spot under the influence of turbulence

# 5 结 论

本文通过对阈值分割方法的改进,解决了传统 阈值分割方法对灰度像素相关性利用不足的问题, 提高了光斑中心定位精度。结果表明,改进的 Otsu 阈值分割方法对受高斯噪声影响和湍流影响的光斑 定位精度都有明显提高,是一种可行的光斑中心定 位方法。

## 参考文献:

- YANG Haitao. Satellite laser communication technology
   [J]. Technology Innovation and Application, 2014, (28):
   35-36. (in Chinese)
   杨海涛. 卫星激光通信技术[J]. 科技创新与应用,
   2014, (28):35-36.
- [2] ZHOU Bin. Research on APT Technology in Atmospheric Laser Communication [J]. China New Telecommunications, 2007, 21:45-49. (in Chinese)
   周斌. 大气激光通信中的 APT 技术研究[J]. 中国新通信, 2007, 21:45-49.
- [3] XIA Aili, MA Caiwen. High accuracy measurement of spot chatter center based on image processing technology [J].

Journal of Optoelectronics • Laser, 2011, (10):1542 – 1545. (in Chinese)

夏爱利,马彩文.基于图像处理技术的光斑质心高精 度测量[J].光电子・激光,2011,(10):1542-1545.

[4] WANG Chunyang, LI Jinshi. Detection of laser spot drift
[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(2):205-208.
(in Chinese)
王春阳,李金石.激光光斑漂移的检测[J].应用光学,

2007,28(2):205-208.

- [5] KONG Bing, WANG Zhao, TAN Yushan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(3):275-279. (in Chinese) 孔兵, 王昭, 谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测 算法[J]. 红外与激光工程,2002,31(3):275-279.
- [6] WANG Lili, HU Zhongwen, JI Hangxin. Localization Algorithm of Laser Spot Based on Gaussian Fitting[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(5):985-990. (in Chinese) 王丽丽, 胡中文,季杭馨. 基于高斯拟合的激光光斑中

心定位算法[J].应用光学,2012,33(5):985-990.

- [7] HAN Siqi, WANG Lei. A Threshold Method for Image Segmentation[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(6):91-94. (in Chinese)
  韩思奇, 王蕾. 图像分割的阈值法综述[J]. 系统工程 与电子技术, 2002, 24(6):91-94.
- [8] WANG Aimin, SHEN Lansun. A survey of image segmentation[J]. Measurement and Control Technology, 2000, 19 (5):1-6. (in Chinese)
  王爱民,沈兰荪. 图像分割研究综述[J]. 测控技术, 2000, 19(5):1-6.
- [9] HU Min, LI Mei, WANG Ronggui. The application of improved otsu algorithm in image segmentation [J]. Journal of Electronic Measurement And Instrumentation, 2010, 24 (5):443-449. (in Chinese)
  胡敏,李梅, 汪荣贵. 改进的 Otsu 算法在图像分割中的

应用[J]. 电子测量与仪器学报,2010,24(5): 443-449.