

基于序列信息圆心拟合的大气激光光斑检测技术

母一宁, 温冠宇, 王贺, 蒋正英

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 为了降低大气湍流对水平链路无线激光通信 APT 子系统的影响, 提高在强噪声中光斑检测算法的鲁棒性, 提出了一种新颖的光斑检测跟踪方法。该方法采用序列间信息量的分布情况作为检测特征参数来拟合圆心, 并且按照拟合方程估计光斑能量中心点, 即在遵守最小二乘原则的前提下使序列间均方误差达到最小。本检测方法可以对大气湍流和背景光干扰起到较强的补偿作用, 将检测误差有效地抑制在一个小范围内, 对强湍流环境拥有很强的针对性, 为水平链路无线激光通信的精跟踪提供了一种针对大气湍流的有效解决方案。该算法采用时域均衡的方法较为巧妙地回避湍流引入噪声过强这一难题, 使其在强噪声环境下拥有较强的鲁棒性。并且从工程实践的角度, 较全面地分析了该算法的优缺点, 并针对其瓶颈作出了展望。

关键词 光斑检测; 序列信息; 圆心拟合

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.01.013

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)01-0059-05

视频流所传递的信息包括 2 部分: ①每一帧所传递的灰度信息; ②在空间序列上所呈现的序列信息。本文提出了一种基于序列信息量分布情况作为检测特征参数的光斑检测跟踪方法。根据序列间最大信息量出现区域的运动趋势来确定自身的跟踪轨迹。虽然序列信息的传递速度必然滞后于灰度信息, 但因其算法相对简单, 所以其跟踪实时性并不逊于传统方法。实验表明该方法在弱湍流情况下优势不明显, 但是在水平链路中强湍流、强背景光干扰条件下可以将检测误差期望限制在一个小范围内。

1 光斑检测误差分析

在水平链路无线激光通信中, 影响光斑检测的主要因素有 2 个: ①激光光斑受大气湍流影响, 光斑破碎非常严重^[1]; ②强背景光干扰, 即使采用圆偏光其光斑与背景对比度也相对较低^[2]。当没有以上 2 个因素影响时成像效果非常好, 见图 1。

显而易见, 只需采用常规的轮廓提取算子便可以较好地检测出现似圆光斑轮廓, 再经过二值化处理后便可以通过计算形心算法求得光斑脱靶量。图 2 是通过水域分割算子对图 1 的处理结果。光斑在受到上述 2 点干扰时噪声功率明显上升, 即信噪比下降严重, 其成像效果见图 3, 破碎和闪烁情况非常严重。

当水平链路大到一定距离时, 由湍流引起的光强闪烁将造成光斑检测失效^[3]。可见当信标光因大气影响信噪比较低时, 如果还是通过灰度信息和梯度信息来计算脱靶量, 误差量将会与湍流的强弱程度成正比。虽然通过去噪手段(比如: 小波去噪^[4]或 Hough^[5]等)可以去除部分因湍流而带来的噪声。但是当遇到强湍流的时候, 破碎的部分光斑可能会被当成噪声滤掉, 从而导致误差量增大, 跟踪失败, 见图 4。

* 收稿日期: 2010-09-27

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2003AA712014)

作者简介: 母一宁(1985-), 男, 吉林长春人, 博士生, 主要从事弱信号检测与激光通信研究。

E-mail: der0403030420@163.com



图1 室内光斑

Fig.1 Interior spot

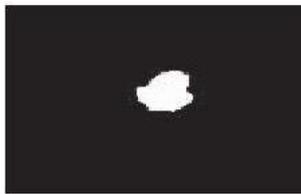


图2 理想光斑轮廓

Fig.2 Ideal flare contour extraction

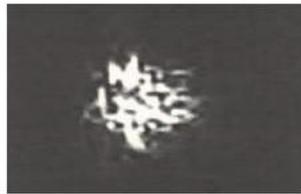


图3 野外破碎光斑

Fig.3 Wild broken spot

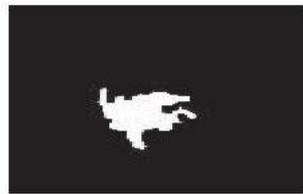


图4 野外破碎光斑轮廓

Fig.4 Wild broken spot contour extraction

2 序列信息量与序列信息熵

熵是平均信息量的表征,其定义为:

$$X = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \lg p(x) dx \quad (1)$$

式中 $p(x)$ 是随机变量 x 的概率密度函数。对于序列图像流来说,随机变量 x 既可以是亮度信息、梯度信息,也可以是序列间光流的平均信息量。序列中每一帧相对于有限序列,其运动光流像素出现的概率为 $\{P_m(t_0), P_m(t_1), \dots, P_m(t_n)\}$,其静止的光流像素点出现的概率为 $\{P_s(t_0), P_s(t_1), \dots, P_s(t_n)\}$ 。其中: n 代表有限序列长度, $P_m = P_n$ (噪声概率) + P_i (目标运动概率)。序列间运动区域与静止区域所传递的序列信息量分别为:

$$I_m(t) = - \sum_i \lg(P_m(t)) \quad (2) \quad I_s(t) = - \sum_i \lg(P_s(t)) \quad (3)$$

其中每一帧图像相对序列的信息熵为:

$$H(t) = - (P_m(t) \lg(P_m(t)) + P_s(t) \lg(P_s(t))) \quad (4)$$

当序列互相关性较强时, $P_s \gg P_m$ 。则 $I_m(t) \gg I_s(t)$,即 $I_s(t) \approx 0$ 。序列信息熵为: $H(t) \approx P_m(t) I_s(t) = - (p_n + p_i) \lg(p_n + p_i)$ 。

当光斑运动较明显时,序列所传递的信息量主要是由光斑运动轨迹不确定度产生,当光斑相对静止时,序列所传递的信息量主要是由噪声不确定度产生,在大气中光斑抖动服从高斯分布模型,所以在由于大气湍流所带来的光斑抖动信息所传递的信息量最大,即在光斑相对静止时,序列间所传递的信息量主要由湍流抖动的不确定度而产生。采用序列信息作为光斑跟踪的特征,其区分鲁棒性较强。序列信息模型公式如下:

$$M(x, y) = |f(x, y) - f_2(x + \Delta x_2, y + \Delta y_2)| \cdot |f_1(x + \Delta x_1, y + \Delta y_1) - f_3(x + \Delta x_3, y + \Delta y_3)| \quad (5)$$

式中: $M(x, y)$ 代表当前序列间信息量分布情况; $f_n(x, y)$ 代表有限序列灰度信息; X_n 与 Y_n 分别代表序列 n 与当前序列的光路偏移量。显而易见,当 $f_n(x, y)$ 序列较长时,对光斑检测位置检测较为稳定,但对其光斑轨迹跟踪的收敛速度较低,反之恰恰相反。所以在实际应用中需要根据实际情况选取 $f_n(x, y)$ 序列长度。

3 基于序列信息的圆心拟合算法

拟合圆曲线是在遵循最小二乘原则前提下,寻找一个理想圆使其趋近于所有的采样点,即所有采样点到圆上距离最优。采样空间 $(X_i, Y_i) i \in (1, 2, \dots, N)$ 中心到圆心距离 $d_i^2 = (X_i - A)^2 + (Y_i - B)^2$ 点 (X_i, Y_i) 到圆边缘的距离与半径平方差为 $X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c$ 对其求平方和:

$$Q(a, b, c) = \sum [(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)^2] \quad (6)$$

求 a, b, c 使 $Q(a, b, c)$ 的值最小。平方差 $Q(a, b, c)$ 必然大于0,因此函数存在大于或等于0的极小值,极大值为无穷大。 $F(a, b, c)$ 对 a, b, c 求偏导,令偏导等于0,得到极值点,比较所有极值点的函数值即可得到最小值。

$\partial Q(a, b, c) / \partial a = 0, \partial Q(a, b, c) / \partial b = 0, \partial Q(a, b, c) / \partial c = 0$,解以上3个方程组。

令 $C = (N \sum X_i - \sum X_i \sum X_i), D = (N \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i), E = N \sum X_i^3 + N \sum X_i Y_i^2 - \sum (X_i^2 + Y_i^2) \sum X_i, G = (N \sum Y_i^2 + \sum Y_i \sum Y_i), H = N \sum X_i^3 Y_i + N \sum Y_i^3 - \sum (X_i^2 + Y_i^2) \sum Y_i$,其中 $Ca + Db +$

$$E = 0 \quad Da + Gb + H = 0.$$

$$a = (HD - EG)/(CG - D^2) \quad (7) \quad b = (HC - ED)/(D^2 - GC) \quad (8)$$

$$c = - \frac{\sum (X_i^2 + Y_i^2) + a \sum X_i + b \sum Y_i}{N} \quad (9)$$

$$A = -a/2, B = -b/2R = 0.5(a^2 + b^2 - 4c)^{0.5}.$$

由式(7) - (9)可知:圆心拟合算法的优点是算法速度快,时间复杂度为 $O(n)$,运算精度较高等;但它的缺点也十分明显,即抗干扰性能差,当存在随机噪声时,中心运算精度会明显降低;当干扰强度较大时所得圆心甚至可能明显错误。由文献[4]可知,如果采用灰度或梯度作为特征参数来使用圆心拟合法则必须通过一系列图像预处理和去噪手段来加强系统的抗噪声能力。然而采用序列信息作为特征参数就可以避免这一问题。由实验可知,光斑边缘比光斑中心受到湍流影响更加敏感^[6]。序列信息将按照激光散斑的外围轮廓正态随机分布,从而可以提高圆心拟合算法的鲁棒性。

4 实验与分析

由于动态光斑序列间信息量较大,其特征点分布较广,跟踪较为容易,所以在此不多加以论述。然而相对静态光斑的检测与跟踪则相对复杂。根据 kolmogorov 提出的“2/3 次方定律 $D_i(t) = C_i r^{2/3}$ ”^[1]可知,激光在随机大气信道中传输的距离越远,受到大气湍流的影响越严重,噪声对灰度信号的破坏越严重,即随着通信距离的增加,信标光所携带的对准信息越低^[7]。显而易见、激光信号所携带序列湍流噪声最大并且均匀分布在光斑上,所以序列间湍流噪声的能量中心与光斑能量中心从理论上将是重合的(当序列长度趋近于无穷时被视为理想状态)。图 5 给出了一组在不同湍流条件下采用序列信息圆心拟合方法的静态水平链路激光散斑检测效果图。其中图 5(a) - (j)受到湍流影响依次下降。

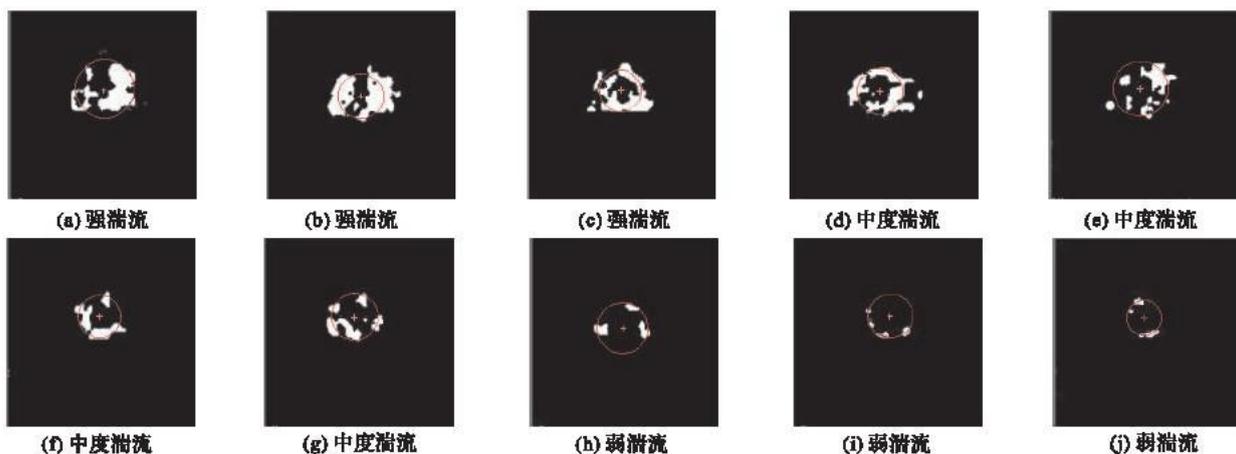


图 5 静态水平链路激光散斑检测效果图

Fig. 5 Static level of laser speckles of testing effect link

由此可见,当光斑受到强湍流干扰时,所获得序列信息较大,湍流噪声信号采样点较多拟合圆心收敛较为稳定,如图 5(a) - (d)所示,其光斑重心标定较为准确。当光斑受湍流影响变弱时所获得序列信息明显变少,如图 5(e) - (h)所示,其捕获的湍流样本数量明显降低。当光斑所受湍流影响较小时,其序列的灰度信息相对较大、噪声信息相对较小,如图 5(i) - (j)所示,由于湍流噪声较低、序列信息非常小,所以其捕获的湍流样本点明显减少,即拟合误差较大。表 1 给出了图 5(a) - (j)所对应当前序列的序列信息量与序列信息熵。

表 1 不同湍流下序列信息对比

Tab. 1 In different circumstances sequence information flow

序列号	序列信息熵	序列信息量
(a)	0.243 1	255 000
(b)	0.219 7	230 000
(c)	0.22	230 686
(d)	0.215 5	225 968
(e)	0.159 84	167 604
(f)	0.126 4	132 540
(g)	0.133 745	140 241
(h)	0.064 42	67 550
(i)	0.038 8	40 684
(j)	0.036 12	37 874

由表1中(g)组与(h)组数据可知序列信息的提取属于一个非线性随机过程,通过模型计算只能求到其数学期望。在实际应用中无法避免小概率事件发生。所以其跟踪带宽直接影响其跟踪鲁棒性。

5 结束语

本文提出了一种针对远距离水平链路无线激光通信的信标光斑检测跟踪方法,并且充分考虑到序列信息产生原因。从而找到了一种针对性很强的光斑检测方法。该方法拥有运算量小、受背景光干扰较小等优点。为高噪声环境下APT系统提供了新的解决方案。然而该方法的跟踪精度与跟踪带宽受到光路偏移量检测精度和检测带宽限制,如式(5)所示, X_n 与 Y_n 的检测精度与带宽直接影响序列熵的检测结果与带宽,现阶段采用角度检测反馈法、薄透镜双面阵CCD光路偏移检测法等来检测光路偏移量完全可以满足精度要求。但是在工业场合需要整体系统的跟踪带宽远高于伺服系统带宽(300 Hz),则还需要在提高跟踪带宽方面做更进一步研究。

参考文献:

- [1] 李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
LI Xiaofeng. The principle and technology of the satellite-to-ground laser communication links[M]. Beijing: National defense industry press, 2007. (in Chinese)
- [2] 王亚丽,段锦. 空间光通信中激光光斑检测与特征分析[J]. 红外与激光工程,2007,36(7):166-170.
WANG Yali, DUAN Jin. Laser spot detection and characteristic analysis in space optical communication[J]. Infrared and laser engineering, 2007, 36(7): 166-170. (in Chinese)
- [3] 赵馨,佟首峰,刘云清,等. 基于四象限探测器的光斑检测跟踪技术[J]. 中国激光,2010,37(7):1756-1561.
ZHAO Xin, TONG Shoufeng, LIU Yunqing, et al. Technology on spot detection and tracking based on four-quadrant detector [J]. Chinese journal of lasers, 2010, 37(7): 1756-1561. (in Chinese)
- [4] 杨耀权,施仁,于希宁. 用Hough变换提高激光光斑中心定位精度的算法[J]. 光学学报,1999,19(12):1655-1660.
YANG Yaoquan, SHI Ren, YU Xining. An algorithm to raise the locating precision of laser spot center based on Hough transform [J]. Acta optica sinica, 1999, 19(12): 1655-1660. (in Chinese)
- [5] 刘丹平,胡渝. 提高光斑图像质心精度的去噪方法[J]. 光电工程,2005,32(8):56-58.
LIU Danping, HU Yu. Laser speckle image denoising with high accuracy centroid [J]. Opto-electronic engineering, 2005, 32(8): 56-58. (in Chinese)
- [6] 柯熙政,席晓莉. 无线激光通信概论[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2006.
KE Xizheng, XI Xiaoli. Introduction to wireless laser communication[M]. Beijing: Beijing university of posts and telecommunication press, 2006. (in Chinese)
- [7] 王丽黎,柯熙政,陈丽新. 基于大气激光通信系统的实验测量研究[J]. 光散射学报,2006,17(4):378-383.
WANG Lili, KE Xizheng, CHEN Lixin. The testing system for optical power through atmosphere [J]. Chinese journal of light scattering, 2006, 17(4): 378-383. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

Study of Technique of Spot Detection Based on Sequence Information Fit Circle Center

MU Yi-ning, WEN Guan-yu, WANG He, JIANG Zheng-ying

(College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: This paper proposes a new method of spot detection and tracking for the sake of reducing the effect of atmospheric turbulence on the level of atmospheric wireless laser communication link APT subsystem and enhancing the robustness of spot detection algorithm in strong noise. In this method the sequence information distributions are

adopted as the detection and tracking characteristic parameters to fit the circle centre and estimate the spot energy centre according to the fitting equation, i. e. to make the MSE minimum by following the principles of the least squares. The use of this method can play a strong role in compensating the obstruction of atmospheric turbulence and background to effectively restrain the detection error in a small range, and has a strong aim at the strong turbulence environment, which provides an effective solution to the atmospheric turbulence for the level of wireless laser communication link. In this method the equalization time – domain means with robustness is used to avoid the difficult problem of over – strong noise led into by the turbulence. This paper performs an analysis of the advantages and disadvantages of this method from the perspective of engineering and at the same time makes a prospect for the bottlenecks.

Key words: spot detection; sequence information; circle center fit

(上接第54页)

- [9] Paul Zarchan. Fundamentals of kalman filtering; a practical approach [M]. Virginia;american institute of aeronautics and astronautics Incorporated, 2005.
- [10] Paul Zarchan. Tactical and strategic missile guidance[M]. Virginia;American institute of aeronautics and astronautics incorporated, 2007.

(编辑:田新华)

Investigation on a Scheme for Trajectory Filtering Based on Process Noise Control

CHANG Si – jiang¹, WANG Zhong – yuan¹, HAN Cheng – hui²

(1. School of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Research Institute 208 of China Ordnance Industry, Beijing 102202, China)

Abstract: The estimation of flight state for guided projectiles is one of the most critical techniques in obtaining precise trajectory parameters. When Kalman filtering is used, the system model deviation may cause reduction of the filtering accuracy significantly. In this paper the foregoing problem is investigated by taking a type of fin – stabilized projectiles with low spin speed as object. An Extended Point – Mass Model (EPMM) is proposed. Based on the EPMM and radar detecting system, the state equation and measurement equation are established respectively. The effect of model deviation on the filtering performance is analyzed via numerical simulation, thus a new scheme of estimation of flight state is proposed based on the process noise control. The results indicate that the negative influence is overcome effectively by adopting this scheme. The estimation error of lateral range for projectiles can be reduced more than 50% at least and the increase of computation burden is fairly small. Some results concluded are useful for further research.

Key words: projectiles; state estimation; Kalman filtering; trajectory model; process noise