

## 四象限探测器光斑检测原理及其研究进展

李征 许昊宇 梁静远 张颖 柯熙政

### Principle and research progress of four-quadrant detector spot detection

LI Zheng, XU Haoyu, LIANG Jingyuan, ZHANG Ying, KE Xizheng

引用本文:

李征, 许昊宇, 梁静远, 等. 四象限探测器光斑检测原理及其研究进展[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 927-942. DOI: 10.5768/JAO202344.0509001

LI Zheng, XU Haoyu, LIANG Jingyuan, et al. Principle and research progress of four-quadrant detector spot detection[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(5): 927-942. DOI: 10.5768/JAO202344.0509001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0509001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于LitghtTools的激光四象限探测系统仿真

System simulation of laser four-quadrant detection system based on LitghtTools

应用光学. 2021, 42(1): 176-181 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0107004>

#### 短波红外成像系统对激光光斑探测能力分析

Analysis of detection capability of shortwave infrared imaging system on laser spot

应用光学. 2018, 39(4): 574-578 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0406001>

#### 光纤输出远场光斑均匀性检测方法的研究

Method for detecting far-field spot uniformity of optical fiber output

应用光学. 2019, 40(2): 356-362 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0208003>

#### APD探测器模块性能及噪声检测

Detection of performances and noise of APD detector module

应用光学. 2019, 40(6): 1115-1119 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0603006>

#### 基于相关因子的无衍射光斑图像定中算法

Centering method for non-diffracting spot images based on correlation-coefficient

应用光学. 2018, 39(4): 500-504 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0402003>

#### 飞秒激光光斑灰度与几何特征的相关性分析

Correlation analysis of gray scale and geometric features of femtosecond laser spot

应用光学. 2020, 41(5): 1108-1116 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0507002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 05-0927-16

# 四象限探测器光斑检测原理及其研究进展

李征<sup>1</sup>, 许昊宇<sup>1</sup>, 梁静远<sup>1</sup>, 张颖<sup>1</sup>, 柯熙政<sup>1,2,3</sup>

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安文理学院 信息工程学院, 陕西 西安 710065;  
3. 陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 光斑检测技术在现代科学研究与应用中扮演着重要角色, 四象限探测器由于其具有探测灵敏度高、信号处理简单和抗干扰能力强等优点, 在光斑检测技术中得到了广泛的应用, 是捕获、跟踪和瞄准系统中的关键器件。首先介绍了光斑检测中常用的光斑模型和四象限探测器检测光斑原理, 然后分析了国内外在四象限探测器检测光斑方面的研究成果, 以及影响四象限探测器检测光斑精度的因素和常用的光斑检测算法, 同时介绍了四象限探测器的光斑检测系统, 包括光束对准检测系统、四象限探测器跟踪通信复合系统和微纳激光通信系统。最后, 展望了光斑检测技术的发展前景。

**关键词:** 光斑检测; 四象限探测器; 光斑模型; 光斑检测算法

中图分类号: TN247; TN249

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0509001

## Principle and research progress of four-quadrant detector spot detection

LI Zheng<sup>1</sup>, XU Haoyu<sup>1</sup>, LIANG Jingyuan<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>, KE Xizheng<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;  
2. School of Information Engineering, Xi'an University, Xi'an 710065, China; 3. Shaanxi Civil-Military  
Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an 710048 China)

**Abstract:** Spot detection technology plays an important role in modern scientific research and application. Due to its advantages of high detection sensitivity, simple signal processing, and strong anti-interference ability, four-quadrant detectors have been widely used in spot detection technology and are the key components in acquisition, tracking, and pointing systems. Firstly, the spot models commonly used in spot detection and the principle of four-quadrant detector spot detection were introduced. Then, the research results of four-quadrant detector spot detection at home and abroad, as well as the factors affecting the accuracy of four-quadrant detector spot detection and the commonly-used spot detection algorithms were analyzed. The four-quadrant detector spot detection system was introduced, including the beam alignment detection system, four-quadrant detector tracking communication composite system and micro-nano laser communication system. Finally, the development prospects of spot detection technology was prospected.

**Key words:** spot detection; four-quadrant detector; spot model; spot detection algorithm

## 引言

在无线激光通信系统中, 捕获、瞄准和跟踪 (acquisition, pointing and tracking, APT) 技术是一项

研究的重点<sup>[1-3]</sup>, 而光斑检测技术是 APT 技术中的关键。光斑检测技术中常用的光斑探测器有位置敏感探测器 (position sensitive detector, PSD)、电荷

收稿日期: 2023-05-15; 修回日期: 2023-08-08

基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目 (18JK0341); 陕西省重点产业创新项目 (2017ZDCXL-GY-06-01); 西安市科技计划项目 (2020KJRC0083)

作者简介: 李征 (1979—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事现代通信技术研究。E-mail: lixx-123@xaut.edu.cn

通信作者: 柯熙政 (1962—), 男, 博士, 二级教授, 主要从事无线光通信研究。E-mail: xzke@263.net

耦合器件(charge coupled device, CCD)、四象限探测器(quadrant detector, QD), 相比于位置敏感探测器和电荷耦合器件, QD 具有检测分辨率高和响应时间短等优点<sup>[4-5]</sup>, 因此被广泛应用。基于 QD 的光斑位置检测技术已经广泛应用于激光雷达、激光测距和空间激光通信领域, 使用 QD 进行光斑位置检测时, 其检测精度会受到各种因素的影响。光斑位置检测技术性能的好坏影响整个系统的性能, 因此开展提高光斑位置检测精度的研究至关重要。基于 QD 光斑位置检测模型算法是根据 QD 的四路输出信号进行光斑的质心位置解算, 学者们为了提高光斑位置检测范围和提高位置检测精度提出了不同的光斑检测算法, 有加减算法、对角线算法、差比和算法、对数算法、函数拟合法、归一化中心法、多项式拟合法、无穷积分法、Boltzmann 函数拟合法、Composite 拟合算法和无穷积分改进算法。除了光斑检测算法外, 光斑的形状和分布, 探测器自身缺陷, 环境因素和光、电噪声等因素也影响光斑位置检测精度。

综上所述, 目前光斑位置检测技术的研究主要围绕光斑位置检测算法和影响光斑位置检测精度的因素开展。因此, 本文介绍了光斑检测中涉及的几种常用光斑模型, 然后围绕四象限探测器, 从检测原理、国内外研究进展、影响因素、检测算法和应用等方面进行分析总结, 并根据发展现状对光斑检测技术的应用及其发展前景进行了展望。

## 1 QD 光斑位置检测原理

四象限探测器是根据四象限探测器的四路输出信号进行光斑的质心位置解算, 在目标定位、跟踪中应用广泛。为了能更好地运用四象限探测器, 需要了解基本的光斑模型和检测原理。

### 1.1 光斑模型

输入的光斑模型不同, QD 的输出信号值也不同, 所以讨论光斑模型有一定的意义。光斑模型按能量可分为均匀分布和高斯分布, 按形状可分为圆形光斑、椭圆光斑和环形光斑。

如图 1 所示, 理想光斑为均匀分布的圆形光斑, 其能量密度分布函数<sup>[6]</sup>为

$$I(x,y) = \begin{cases} I_0, & (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 \leq R^2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $I_0$  为光强的均值;  $R$  为光斑的半径; 光斑的中心坐标是  $(x_0, y_0)$ 。

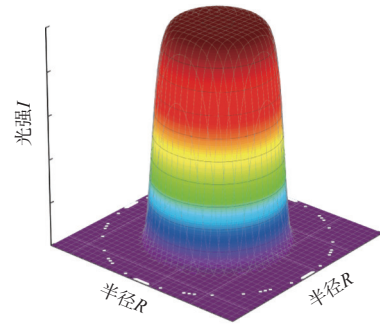


图 1 均匀分布的圆形光斑

Fig. 1 Uniformly-distributed circular light spot

如图 2 所示, 激光器输出的光斑可看作高斯分布的圆形光斑, 其能量密度分布函数为<sup>[7-8]</sup>

$$I(x,y) = I_0 \exp\left\{-\frac{2\left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2\right]}{R^2}\right\} \quad (2)$$

式中:  $I_0$  为光强的峰值;  $R$  为圆形光斑的半径, 光斑的中心坐标是  $(x_0, y_0)$ 。

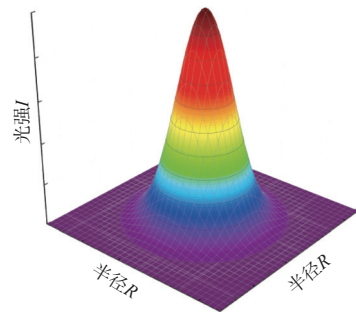


图 2 高斯分布的圆形光斑

Fig. 2 Gaussian-distributed circular light spot

如图 3 所示, 为了减小实验误差, 在实验分析中将接收到的光斑近似看为均匀分布的椭圆光斑, 其能量密度分布函数为

$$I(x,y) = \begin{cases} I_0, & \frac{x^2}{w_a^2} + \frac{y^2}{w_b^2} \leq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $I_0$  为光强的峰值;  $w_a$ 、 $w_b$  分别为椭圆光斑的长、短轴。

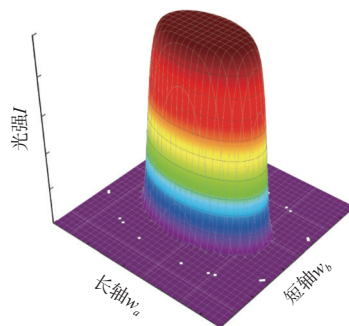


图 3 均匀分布的椭圆光斑

Fig. 3 Uniformly-distributed elliptical light spot

如图4所示,当光斑漂移时,将被遮挡的光斑看为高斯分布的椭圆光斑,其能量密度分布函数为<sup>[9-10]</sup>

$$I = I_0 \frac{2}{\pi w_a w_b} \exp \left[ -2 \left( \frac{x^2}{w_a^2} + \frac{y^2}{w_b^2} \right) \right] \quad (4)$$

式中:  $I_0$  为光强的峰值;  $w_a$ 、 $w_b$  分别为椭圆光斑的长、短轴。

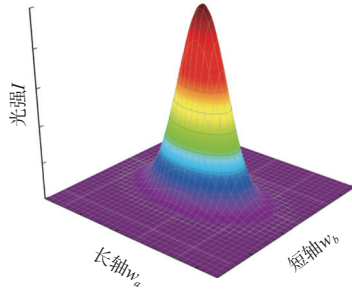


图4 高斯分布的椭圆光斑

Fig. 4 Gaussian-distributed elliptical light spot

在实际实验中,使用卡塞格林望远镜<sup>[11]</sup>接收光斑时副镜会使光斑中心受到遮挡,从而呈现环形光斑。如图5所示为高斯分布的环形光斑,其能量密度分布函数为<sup>[12]</sup>

$$I = k \iint_{S_2-S_1} I_0 \frac{2}{\pi R^2} \exp(-2((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2)/R^2) ds \quad (5)$$

式中:  $k$  为转换因子;  $R$  为外环光斑半径;  $S_1$  为光斑内环圆的面积;  $S_2$  为光斑外环圆的面积。

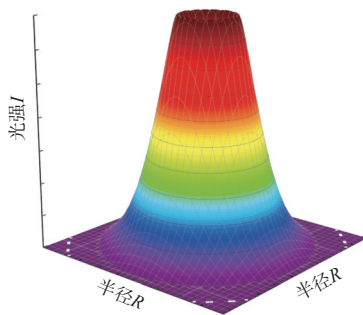


图5 高斯分布的环形光斑

Fig. 5 Gaussian-distributed ring light spots

## 1.2 基于 QD 的光斑位置检测原理

光斑检测技术中常用的光斑探测器有3种,分别是 PSD、CCD 和 QD。如表1所示,为3种探测器的对比。QD 相比 CCD 和 PSD,信号处理难度较大;但 QD 体积小、响应速度快、位置分辨率高,在空间激光通信跟踪系统中使用更具潜力。

表1 三种探测器的对比<sup>[13]</sup>

Table 1 Comparison of three detectors

参数	QD	CCD	PSD
性能	可靠	可靠	可靠
驱动电路	复杂	较复杂	简单
信号处理	复杂	复杂	简单
噪声处理	外电路窄带滤波	复杂	外电路窄带滤波
响应时间	<4 ns	1 μs左右	0.5 μs左右
极限分辨率	0.01 μm	像元间距(几微米)	0.3 μm

QD 是一种光伏型半导体探测器件,如图6所示为 QD 示意图。它由4个象限组成,每个象限都是1个光电二极管或雪崩光电二极管安装在光敏面上。当光斑照射在 QD 上时,通过4个象限的输出电流对光斑中心进行定位<sup>[14]</sup>。

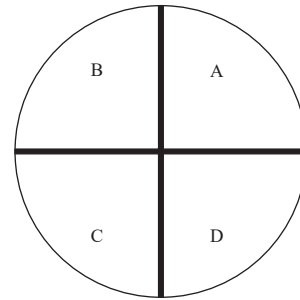


图6 QD 示意图

Fig. 6 Schematic diagram of QD

当激光光斑入射在 QD 上时,4个象限输出不同的光电流  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  和  $I_D$ ,通过计算得到偏移量,从而实现光斑中心定位。用  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  表示归一化后的结果,假设光斑能量均匀分布,则光斑面积与光斑能量成正比,使用传统加减算法的计算公式为<sup>[15]</sup>

$$\sigma_x = \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D} = \frac{(E_A + E_D) - (E_B + E_C)}{E_A + E_B + E_C + E_D} = \frac{(S_A + S_D) - (S_B + S_C)}{S_A + S_B + S_C + S_D} \quad (6)$$

$$\sigma_y = \frac{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} = \frac{(E_A + E_B) - (E_C + E_D)}{E_A + E_B + E_C + E_D} = \frac{(S_A + S_B) - (S_C + S_D)}{S_A + S_B + S_C + S_D} \quad (7)$$

式中:  $E_A$ 、 $E_B$ 、 $E_C$  和  $E_D$  表示4个象限的光斑总能量;  $S_A$ 、 $S_B$ 、 $S_C$  和  $S_D$  表示4个象限的光斑面积。

## 2 基于四象限探测器的光斑位置检测

空间激光通信系统需要具有捕获、瞄准和跟踪(APT)系统,以保证通信两端实现精密对准与稳定跟踪。APT系统的跟踪效果往往取决于光电探



测器光斑位置检测的精度, QD作为精密测向器件,更适合于动态目标的跟踪测量。

### 2.1 国外研究进展

基于 QD 的光斑位置检测技术是 APT 系统中的关键技术, 光斑位置检测精度影响系统性能, 因此开展光斑位置检测技术的研究至关重要。国外众多学者对 QD 检测光斑进行了深入研究, 其进展如下。

1985 年, 日本航天局研制了 LUCE(laser utilizing communication equipment)系统<sup>[16]</sup>。LUCE 系统的 APT 子系统的精跟踪探测器和超前瞄准探测器都采用的是 QD, 精跟踪精度优于 0.7 μrad。如图 7 所示为 LUCE 终端<sup>[17]</sup>的内部结构示意图。

1995 年, 日本邮电部实验室<sup>[18]</sup>用工程测试卫星 VI 进行了卫星终端 LCE(laser communication

equipment)与地面站的激光通信试验, 跟踪模块采用 QD, 精度可以达到 2 μrad 以下。如图 8 所示为 LCE 的原理框图。

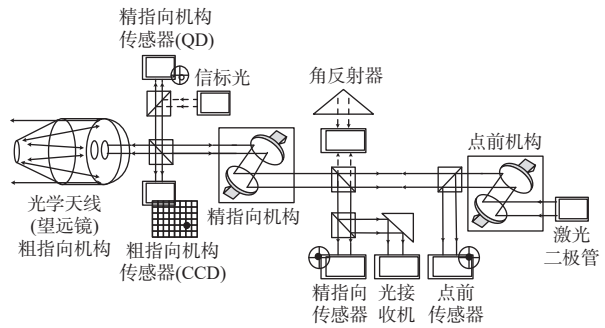


图 7 LUCE 终端的内部结构示意图<sup>[17]</sup>

Fig. 7 Schematic diagram of internal structure of LUCE terminal

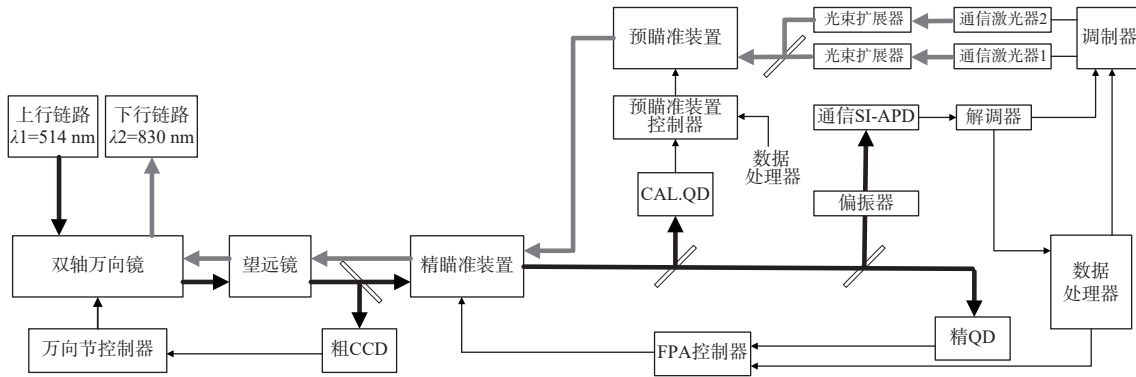


图 8 LCE 原理框图<sup>[18]</sup>

Fig. 8 Schematic block diagram of LCE

2001 年, GUELMAN M 等人研发了宽带激光链路 BLISL(broadband laser inter-satellite link)系统, 采用 QD 对光斑进行对准、跟踪<sup>[19]</sup>。如图 9 所示为设计的 BLISL 系统结构图。

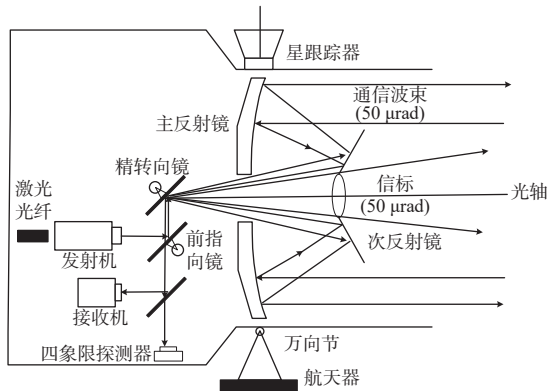


图 9 BLISL 系统结构图<sup>[19]</sup>

Fig. 9 Structure diagram of BLISL system

2002 年, TOYODA M 等人对光斑检测传感器进行了对比研究<sup>[20]</sup>, 如图 10 所示为激光跟踪系

统。研究表明, 在大于 4 pW 的接收光功率下实现了小于 1 μrad 的等效噪声角。

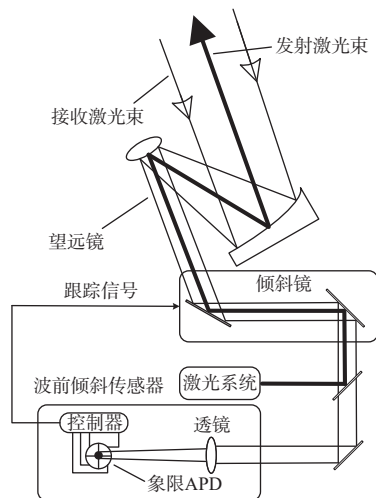


图 10 基于象限 APD 的激光跟踪系统示意图<sup>[20]</sup>

Fig. 10 Schematic diagram of laser tracking system based on quadrant APD

2006年, 光学轨道间通信工程试验卫星与光学地面站终端 KODEN<sup>[21]</sup> 成功实现了星地双向通信试验,

如图 11 所示为 KODEN 的接收机。该试验采用 QD 对光斑位置进行检测定位, 其跟踪精度可达 2  $\mu$ rad。

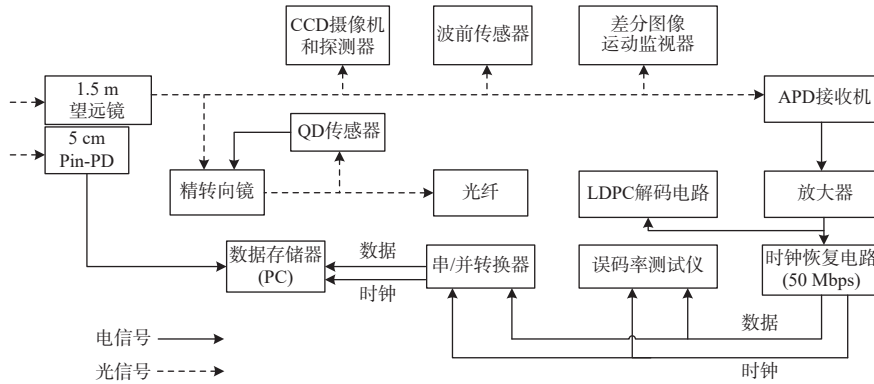


图 11 KODEN 接收机示意图<sup>[21]</sup>

Fig. 11 Schematic diagram of KODEN receiver

2009年, LEE E J 等人研究了入射光斑尺寸对四象限光电探测器的影响<sup>[22]</sup>。实验和分析研究表明, 随着高斯光斑的减小, 检测灵敏度增加。实验装置如图 12 所示, 通过改变光束扩展器的 2 个透镜  $L_1$  和  $L_2$  之间的距离来改变光斑的大小。

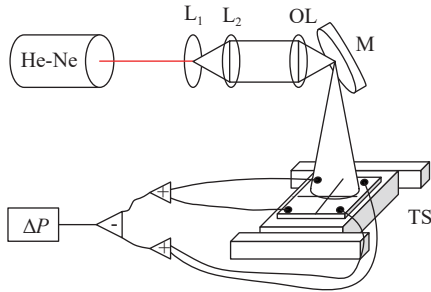


图 12 实验装置图<sup>[22]</sup>

Fig. 12 Schematic diagram of experimental device

2012年, SCHMIDT C 等人设计了一种小型激光终端 SLT (small laser terminals), 采用 QD 作为光斑探测器件, 最大通信距离为 3 km, 误码率为  $10^{-6}$ <sup>[23]</sup>。如图 13 所示为 SLT 的基本框图。

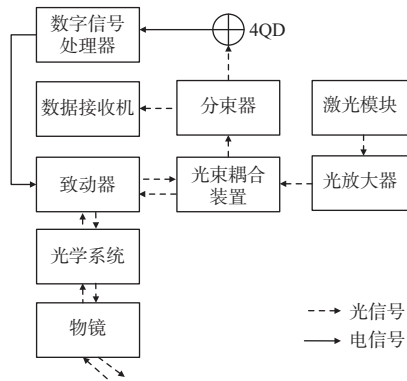


图 13 SLT 的基本框图<sup>[23]</sup>

Fig. 13 Basic block diagram of SLT

2013年, BARBARIĆ Ž P 等人推导了 QD 面积与位置的全新关系, 并分析了激光跟踪器系统模型<sup>[24]</sup>。结果表明, 全新关系信号处理可以将跟踪精度提高 30%。同年, LADEE (lunar atmosphere and dust environment explorer) 搭载着光通信终端 LLST (lunar lasercom space terminal) 与地面进行了双向激光通信试验, LLST 终端<sup>[25-27]</sup> 的 APT 子系统如图 14 所示。

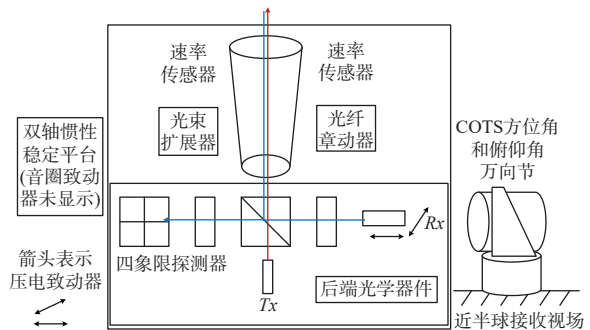


图 14 LLST 光路图<sup>[28]</sup>

Fig. 14 Optical path diagram of LLST

2021年, SAFI H 等人研究了一种用于多旋翼悬停无人机的地对空自由空间光学链路, 在光学接收机上使用 1 个四象限的光电探测器阵列来探测光斑<sup>[29]</sup>。

## 2.2 国内研究现状

我国的研究学者在基于 QD 的激光光斑位置检测技术方面也进行了深入的研究, 如研究了影响光斑位置检测精度的因素, 提出了不同的检测算法, 并设计了不同的 QD 光斑检测系统。

### 2.2.1 光斑位置检测精度影响因素研究现状

采用 QD 检测光斑时, 由于探测器自身的缺陷

以及外部因素的影响,会对检测精度产生影响。因此,近年来我国研究学者对影响光斑位置检测精度的因素进行了如下研究。

2007年,徐代升研究了QD误差信号与光斑位置、大小及探测器的关系,对引起因素进行了分析和定量估算<sup>[30]</sup>。2010年,赵馨等人研究了QD的各种性能及外部环境对其性能的影响,并进行了实验测试<sup>[31]</sup>。2015年,张辉等人推导出高斯光斑模型下位置检测精度与光斑半径、质心位置和系统信噪比关系的数学模型<sup>[32]</sup>。2016年,张骏等人对背景光干扰、暗电流噪声、各象限光学效率及放大电路非均匀性等因素对QD定位误差的影响进行了研究分析,并提出了相应的修正方法<sup>[33]</sup>。2017年,李世艳提出了一种光斑检测方法,判别光斑状态,并进行调节,提高了检测准确度<sup>[34]</sup>。2021年,李树德等人研究了各个噪声因素对采用QD用于光斑位置定位的影响<sup>[35]</sup>。2022年,刁宽等人建立了光斑半径、能量分布和探测器死区等影响因素下QD输出与光斑位置的表征方程<sup>[36]</sup>。表2所示为光斑检测影响因素研究进展总结。

表2 光斑检测影响因素研究进展总结

Table 2 Summary of research progress on influencing factors of spot detection

年份	研究人员	研究内容
2007	徐代升	提出了光斑大小优化设计,改善系统性能
2010	赵馨等人	研究了QD的各种性能及外部环境对其性能的影响,并进行了实验测试
2015	张辉等人	推导出高斯光斑模型下位置检测精度的数学模型
2016	张骏等人	对QD定位误差的影响进行了研究,并提出了相应的修正方法
2017	李世艳	提出了一种光斑检测方法,减小了检测误差
2021	李树德等人	研究噪声因素对QD光斑位置定位的影响
2022	刁宽等人	建立了光斑半径、能量分布和探测器死区等影响因素下QD输出与光斑位置的表征方程

基于QD的光斑检测精度和稳定性受到多种因素的影响,从上述研究进展可以发现,通过对影响因素进行优化,可以提高光斑检测系统的精度和稳定性,从而推动该领域的发展。不同因素对QD光斑检测精度的影响将在第3章进行叙述。

### 2.2.2 光斑检测算法研究现状

光斑检测算法的本质,是根据4路光电流信号对光斑的质心位置进行解算。为了扩展检测范围和提高检测精度,我国研究学者对光斑检测算法进行了如下研究。

2009年,陈勇等人提出了将插值法和对角线算法相结合的一种改进算法<sup>[37]</sup>。2012年,司栋森等人提出了一种增益可调的快速跟踪定位(GAFT)算法<sup>[38]</sup>。2012年,陈梦苇等人对各种光斑模型讨论了和差、对角线、 $\Delta/\Sigma$ 和对数4种算法,并进行了比较<sup>[39]</sup>。2015年,WU J B等人提出了Composite拟合算法,提高了测量精度<sup>[40]</sup>。2017年,郭小康等人简化了二段式多项式拟合算法,将检测精度提高到 $10^{-4}$  mm数量级<sup>[41]</sup>。2021年,苟晔鹏等人提出了一种基于无穷积分拟合方法的改进算法(GII)<sup>[42]</sup>。GII算法的线性检测范围优于传统无穷积分拟合算法和8次多项式拟合法,灵敏度高。2021年,秦立存等人改进了高斯光斑模型下的定位算法,提高了定位精度和线性范围<sup>[43]</sup>。表3所示为光斑检测算法研究进展总结。

表3 光斑检测算法研究进展总结

Table 3 Summary of research progress on spot detection algorithms

年份	研究人员	研究内容
2009	陈勇等人	提出将插值法和对角线算法相结合的一种改进算法,将测角误差控制在 $0.1^\circ$ 之内
2012	司栋森等人	提出了增益可调的快速跟踪定位算法,将跟踪精度提高到 $0.0497$ mm
2012	陈梦苇等人	对各种光斑模型讨论了和差、对角线、 $\Delta/\Sigma$ 和对数四种算法,并进行了比较
2015	WU J B等人	提出了Composite拟合算法,提高了测量精度
2017	郭小康等人	简化了二段式多项式拟合算法,将精度提高到 $10^{-4}$ mm数量级
2021	苟晔鹏等人	提出了基于无穷积分拟合方法的改进算法,提高了灵敏度
2021	秦立存等人	改进高斯光斑模型下的定位算法,均方根误差减小60.4%

目前四象限探测器的光斑检测算法已经达到了很高的精度和准确性,但还存在一些问题,如环境噪声对测量结果的影响、光斑变形等。因此,在未来的研究中,我们需要进一步改进和优化现有的算法,并与其他相关技术相结合,以提高整个系统的性能和稳定性。光斑检测算法将在第4章进行叙述。

### 2.2.3 光斑检测系统研究现状

我国研究学者对基于QD的光斑检测系统进行了如下研究。2003年,王岱等人设计了双轴跟踪控制试验演示系统,能够快速捕获并平稳跟踪目标<sup>[44]</sup>。2013年,ZHANG W等人研制了一种利用QD做光斑检测探测器的小型激光跟踪系统<sup>[45]</sup>。2017年,范新坤等人提出了使用雪崩二极管型QD

实现跟踪与通信复用的方案<sup>[46]</sup>。2018年,林鑫等人设计了一套基于QD的激光束二维扫描跟踪系统,并进行了测试<sup>[47]</sup>。2019年,刘思鸣等人提出了一种基于QD的激光跟踪系统<sup>[48]</sup>。2019年,王睿扬等人采用QD作为通信接收机的探头,设计数字跟踪通信复合接收机<sup>[49]</sup>。2020年,王淋正等人提出了一种中心开孔型四象限探测器光纤定位技术,并设计了定位算法<sup>[50]</sup>。2021年,KE X Z等人及梁韩立设计了一种基于步进电机和QD的新型机载激光通信结构,实现光束的捕获、对准和跟踪<sup>[51-52]</sup>。2022年,陈韵等人设计了一套基于QD与MEMS(micro-electro-mechanical system)振镜为伺服架构的微纳激光通信终端<sup>[53]</sup>。表4所示为光斑检测系统研究进展总结。

表4 光斑检测系统研究进展总结

Table 4 Summary of research progress on spot detection systems

年份	研究人员	研究内容
2003	王岱等人	设计了双轴跟踪控制试验演示系统
2013	ZHANG W 等人	研制了一种利用QD做光斑检测探测器的小型激光跟踪系统
2017	范新坤等人	提出了使用雪崩二极管型QD实现跟踪与通信复用的方案,角分辨率为0.8 μrad
2018	林鑫等人	设计了一套基于QD的激光束二维扫描跟踪系统,并进行了测试
2019	刘思鸣等人	提出了一种基于QD的激光跟踪系统,跟踪误差约为0.1%
2019	王睿扬等人	设计数字跟踪通信复合接收机,探测灵敏度为-30 dBm
2020	王淋正等人	提出了一种中心开孔型四象限探测器光纤定位技术,并设计了定位算法
2021	KE X Z等人	设计了一种新型机载激光通信结构
2022	陈韵等人	设计微纳激光通信终端,跟踪误差为84 μrad

光斑检测系统主要是光束对准检测系统、QD的跟踪与通信复合系统和微纳激光通信系统等,将在第5章进行叙述。

### 3 QD光斑检测影响因素

影响光斑位置检测精度的因素有:光斑形状和分布,QD自身缺陷,环境因素和光、电噪声,以及检测算法的影响。

#### 3.1 不同模式光斑对QD的输出影响

不同的光斑模式对QD的输出是有影响的,一般研究的能量分布模型为均匀分布和高斯分布。对于高斯光斑,在x方向上QD的输出与光斑移动距离关系可表示为<sup>[36]</sup>

$$\sigma_x = \frac{(S_A + S_D) - (S_B + S_C)}{S_A + S_B + S_C + S_D} = 1 - \left( \frac{2\theta}{\pi} - \frac{2x_0 \sin\theta}{\pi r} \right) \operatorname{erf} \left( \frac{\sqrt{2}x_0}{r} \right) \quad (8)$$

式中: $\theta = \arccos\left(\frac{x_0}{r}\right)$ ;  $\sigma_x$ 为光斑实际偏移量; $r$ 为光斑半径; $x_0$ 为移动距离; $S_A$ 、 $S_B$ 、 $S_C$ 和 $S_D$ 分别表示入射到4个象限的光斑面积。

如图15所示,为不同光斑模式下光斑中心与QD输出值的关系。均匀光斑的光斑位置检测灵敏度差,线性动态范围大;高斯光斑的光斑位置检测灵敏度高,线性动态范围小。

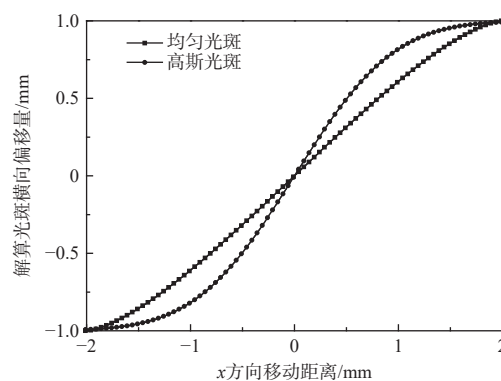
图15 不同光斑模式下的QD输出值<sup>[36]</sup>

Fig. 15 QD output values under different spot modes

#### 3.2 不同光斑半径对QD的输出影响

假设光斑模型为均匀光斑,研究不同光斑半径下光斑中心与QD输出值的关系,如图16所示,光斑半径分别为 $r=1$  mm、 $2$  mm、 $3$  mm。随着光斑半径的增大,QD的检测灵敏度下降。

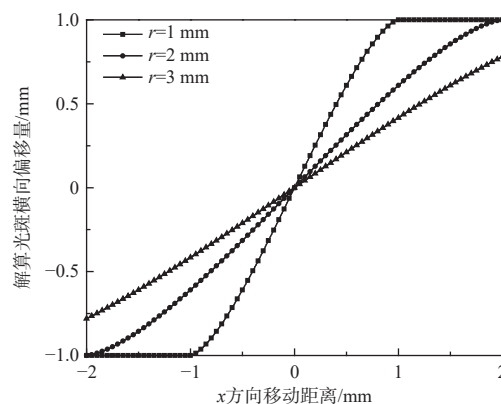
图16 不同光斑半径下的QD输出值<sup>[36]</sup>

Fig. 16 QD output values under different spot radius

#### 3.3 不同死区宽度对QD的输出影响

QD每相邻的2个象限之间存在死区,死区的



大小会影响探测器对光斑总能量的接收,从而影响光斑定位的精度。当死区宽度为  $d$  时,在  $x$  方向上,探测器的输出与光斑移动距离关系可表示为<sup>[36]</sup>

$$\sigma_x = 1 - \frac{(2\theta r^2 - 2x_0 r \sin\theta - (2d(r - x_0) + 2d\sqrt{r^2 - x_0^2}))}{(\pi r^2 - (2dr + 2d\sqrt{r^2 - x_0^2}) - d^2)} \quad (9)$$

假设光斑半径为 2 mm,死区宽度为 0、0.04 mm、0.2 mm、0.3 mm 时,如图 17 所示,随着死区宽度增大,QD 的线性动态范围减小。

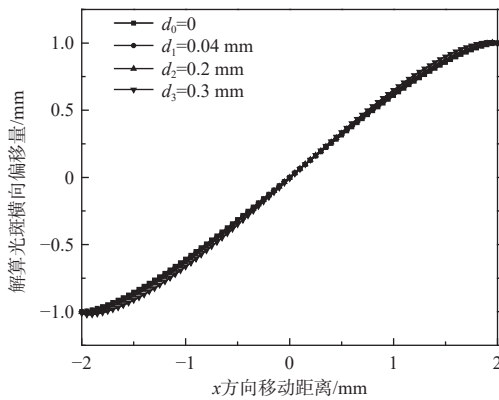


图 17 不同死区宽度下的 QD 输出值<sup>[36]</sup>

Fig. 17 QD output values under different deadband widths

### 3.4 不同背景光对 QD 的输出影响

如图 18 所示,为不同比例的背景光下光斑中心与 QD 输出值的关系。随着背景光的增加,检测精度和灵敏度都在一定程度上降低。

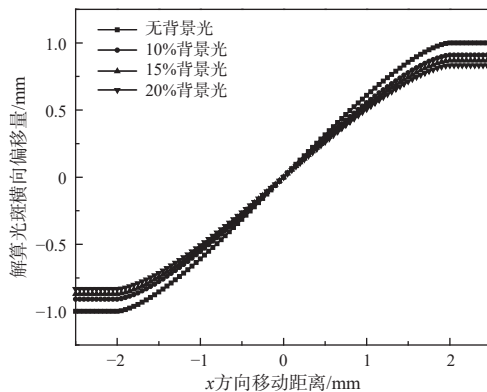


图 18 不同比例背景光下的 QD 输出值<sup>[33]</sup>

Fig. 18 QD output values under different scales of background light

背景光的存在会使 QD 接收到的总能量增加,从而使输出电流增加。而通常情况下,环境光强可以认为是均匀的,因而也可认为背景光在 QD 上

各象限的分布是均匀的。因此,QD 在  $x$  方向上的输出信号与光斑移动距离关系可表示为<sup>[33]</sup>

$$\sigma_x = \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_D + I_B + I_C + I_{BF} + I_{DK}} \quad (10)$$

式中:  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 、 $I_D$  代表各个象限产生的光电流;  $I_{BF}$  代表整个 QD 受背景光照射产生的光电流;  $I_{DK}$  代表整个 QD 的暗电流。

### 3.5 不同信噪比对 QD 的输出影响

提高系统信噪比可以提高 QD 的位置检测精度。光斑位置标准差受光斑半径、位置和系统信噪比 3 个因素影响的关系为<sup>[28]</sup>

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\pi}r}{2\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{R_{SN\Sigma}}} \left[ 1 + \frac{x^2 \operatorname{erf}^2\left(\frac{\sqrt{2}x}{r}\right) + y^2 \operatorname{erf}^2\left(\frac{\sqrt{2}y}{r}\right)}{x^2 + y^2} \right] \quad (11)$$

式中:  $R_{SN\Sigma}$  为系统的总信噪比;  $r$  为光斑半径;  $x$ 、 $y$  为光斑位置。

如图 19 所示,随着信噪比增大,光斑位置标准差减小。

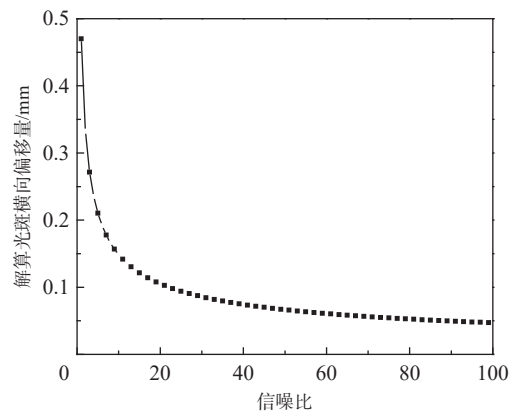


图 19 不同系统信噪比下光斑位置标准差的变化曲线<sup>[28]</sup>

Fig. 19 Variation curve of standard deviation of spot position under different SNR

### 3.6 不同定位算法对 QD 的输出影响

光斑质心检测算法是影响 QD 检测精度的重要因素,常用的算法有加减算法、对角线算法、差比和算法和对数算法。假设光斑是均匀的圆形光斑,对 4 种算法进行了对比,如图 20 所示,可以看出,对于能量分布均匀的圆形光斑,4 种算法的线性度及灵敏度均有差异。差比和算法灵敏度上最优,线性范围最差;对角线算法虽有良好的线性,但低于差比和算法,灵敏度也有所下降;加减算法在灵敏度和线性范围上更为平衡;对数算法则有更宽的线性范围。

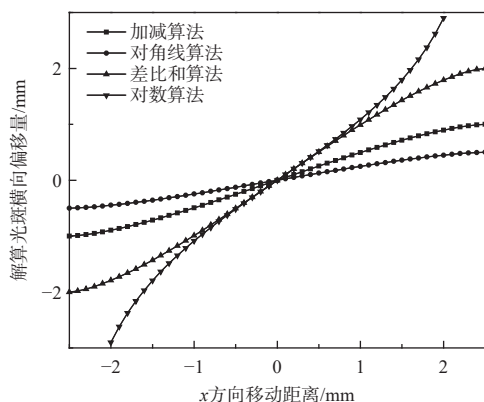


图 20 不同定位算法下的仿真对比

Fig. 20 Simulation comparison under different positioning algorithms

### 3.7 各象限光学响应效率及放大电路非均匀性的影响

实际中由于制造工艺、半导体材料的掺杂水平、掩膜误差等情况的影响,输出值并不完全相等,会影响检测精度。而这种象限间的不均匀程度越大,探测器的定位精度也会随之减少。检测精度与各象限的电路增益和实际增益均匀度的表达式为<sup>[33]</sup>

$$\sigma_x = \frac{(\rho_A A_A I_A + \rho_D A_D I_D) - (\rho_B A_B I_B + \rho_C A_C I_C)}{\rho_A A_A I_A + \rho_B A_B I_B + \rho_C A_C I_C + \rho_D A_D I_D} \quad (12)$$

式中:  $\rho_A$ 、 $\rho_B$ 、 $\rho_C$ 、 $\rho_D$  分别表示各象限的光敏响应程度;  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 、 $I_D$  代表各个象限产生的光电流;  $A_A$ 、 $A_B$ 、 $A_C$ 、 $A_D$  代表各个象限的电路增益。

如图 21 所示,当光响应均匀度不一致时,对探测器线性范围的影响不大,但对检测精度有较大的影响,会降低探测器的定位精度。

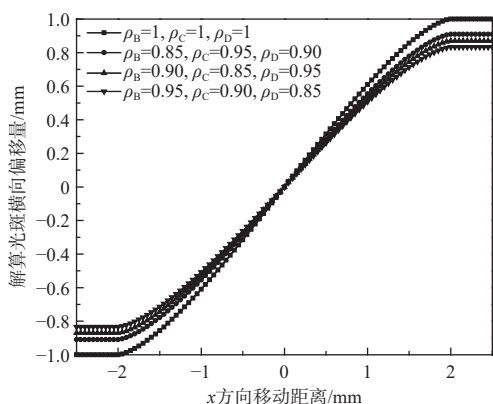
图 21 各象限响应均匀度不同时对 QD 输出的影响<sup>[33]</sup>

Fig. 21 Effect of different quadrant response uniformity on QD output

### 3.8 缺失光斑检测误差分析

将缺失光斑建模为理想的椭圆光斑,仿真分析

光斑缺失对光斑检测的影响。圆形光斑和椭圆光斑在  $x$ 、 $y$  轴方向上的偏移量  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta x_T$ 、 $\Delta y_T$  分别为

$$\Delta x = P_0 \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}x_0}{R}\right) \quad (13)$$

$$\Delta y = P_0 \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}y_0}{R}\right) \quad (14)$$

$$\Delta x_T = P_0 \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}x_0}{w_a}\right) \quad (15)$$

$$\Delta y_T = P_0 \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}y_0}{w_b}\right) \quad (16)$$

式中:  $P_0$  为接收光功率;  $x_0$  为  $x$  方向的移动距离;  $y_0$  为  $y$  方向的移动距离;  $r$  为圆形光斑半径;  $w_a$  为椭圆光斑长轴;  $w_b$  为椭圆光斑短轴。

如图 22 所示,为不同光斑模型下  $x$ 、 $y$  轴偏移量分别随偏移检测值的变化曲线。可以发现,光斑变化越大,线性区间越小,缺失光斑会使 QD 的可检测范围减小。

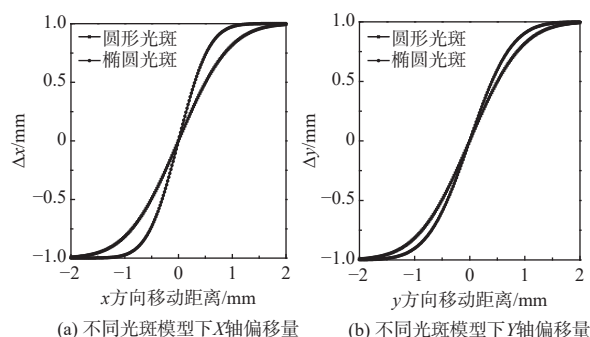
图 22 不同光斑模型下 X、Y 轴偏移量<sup>[34]</sup>

Fig. 22 Offset of X and Y axis under different spot models

总的来说,影响光斑位置检测精度的因素主要有:光斑形状和分布, QD 自身缺陷,环境因素和光、电噪声以及检测算法的影响。光斑形状复杂或者分布不均匀,会导致检测精度下降; QD 自身的缺陷会导致光斑位置的变化,从而影响检测精度,因此要尽量减少缺陷的产生;环境因素和光、电噪声会干扰检测,需要采用降噪技术来提高检测精度;检测算法的选择和优化直接影响光斑位置的检测精度。不同的算法具有不同的优缺点,需要根据光斑形状、分布和实际检测任务等因素进行选择和优化。因此,在进行光斑位置测量时,需要综合考虑以上因素,并尽可能采用可靠、精确的检测算法和技术,以提高光斑位置的检测精度。

## 4 光斑检测算法

采用 QD 检测光斑位置时,根据探测器输出的四路信号来求解光斑质心位置。常用的算法有加减算法、对角线算法、差比和算法、对数算法、函数拟合法、归一化中心法、多项式拟合法、无穷积分法、Boltzmann 函数拟合法、Composite 拟合算法和无穷积分改进算法。

### 4.1 加减算法

当光斑照射到 QD 上时,  $x$ 、 $y$  轴偏移量与光斑面积成正比,用  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  分别表示光斑相对探测面中心的偏移,使用加减算法计算偏移量得<sup>[20]</sup>:

$$\sigma_x = \frac{(U_A + U_D) - (U_B + U_C)}{U_A + U_B + U_C + U_D} = \frac{(S_A + S_D) - (S_B + S_C)}{S_A + S_B + S_C + S_D} \quad (17)$$

$$\sigma_y = \frac{(U_A + U_B) - (U_C + U_D)}{U_A + U_B + U_C + U_D} = \frac{(S_A + S_B) - (S_C + S_D)}{S_A + S_B + S_C + S_D} \quad (18)$$

式中:  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  和  $U_D$  表示 QD 中 4 个象限的电压;  $S_A$ 、 $S_B$ 、 $S_C$ 、 $S_D$  为 QD 中 4 个象限上的光斑面积。

### 4.2 对角线算法

为了扩展测量的线性区域,产生了对角线算法,在其线性区域内,光斑中心偏移量和光斑在探测器各象限面积成正比。使用对角线算法计算偏移量  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  得<sup>[20]</sup>:

$$\sigma_x = \frac{U_A - U_C}{U_A + U_B + U_C + U_D} = \frac{S_A - S_C}{S_A + S_B + S_C + S_D} \quad (19)$$

$$\sigma_y = \frac{U_B - U_D}{U_A + U_B + U_C + U_D} = \frac{S_B - S_D}{S_A + S_B + S_C + S_D} \quad (20)$$

### 4.3 差比和算法

对角线算法的测量灵敏度相较于加减算法有所降低,为提高测量灵敏度,提出差比和算法。在其线性区域内,光斑中心偏移量和光斑在探测器各象限面积成正比。使用差比和算法计算偏移量  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  得<sup>[20]</sup>:

$$\sigma_x = \frac{U_A - U_C}{U_A + U_C} = \frac{S_A - S_C}{S_A + S_C} \quad (21)$$

$$\sigma_y = \frac{U_B - U_D}{U_B + U_D} = \frac{S_B - S_D}{S_B + S_D} \quad (22)$$

### 4.4 对数算法

对数算法具有高带宽、宽动态范围和良好的线性,在其线性区域内,光斑中心偏移量和光斑在探测器上各象限面积成正比。使用对数算法计算偏移量  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  得<sup>[15]</sup>:

$$\sigma_x = \log\left(\frac{U_A}{U_C}\right) = \log\left(\frac{S_A}{S_C}\right) \quad (23)$$

$$\sigma_y = \log\left(\frac{U_B}{U_D}\right) = \log\left(\frac{S_B}{S_D}\right) \quad (24)$$

### 4.5 函数拟合法

函数拟合法<sup>[28]</sup>就是采用各种类型的函数对 QD 的解算值与光斑中心实际位置关系拟合,解出光斑中心的位置,它们之间的关系曲线呈“S”型。

### 4.6 归一化中心法

归一化中心法是近似地将靠近 QD 中心区域内的响应看作线性响应,用一阶函数来拟合得到光斑中心的实际位置<sup>[54]</sup>:

$$x_0 \approx k \times \sigma_x \quad (25)$$

式中:  $k$  是比例系数,与 QD 的形状大小、光斑强度分布以及死区宽度有关。

### 4.7 多项式拟合法

多项式拟合法采用高阶多项式对解算值与光斑实际位置之间的函数关系拟合<sup>[28]</sup>:

$$x_0 \approx \sum_{i=0}^n a_n \sigma_x^n \quad (26)$$

式中:  $a_n$  是拟合系数。

### 4.8 无穷积分法

无穷积分法是在假设 QD 没有死区且无限大的情况下使用的,光斑中心的实际位置可表示为<sup>[54]</sup>

$$x_0 \approx \frac{\text{erf}^{-1}(\sigma_x)r}{\sqrt{2}} \quad (27)$$

式中:  $r$  为光斑半径。

### 4.9 Boltzmann 函数拟合法

Boltzmann 函数拟合法是对解算值与光斑实际位置之间的函数关系拟合,函数表达式为<sup>[28]</sup>

$$x_0 \approx k \times \ln\left(\frac{1 + \sigma_x}{1 - \sigma_x}\right) \quad (28)$$

式中:  $k$  是比例系数,与 QD 的形状大小、光斑强度分布以及死区宽度有关。

### 4.10 Composite 拟合算法

Composite 拟合算法是通过将 Boltzmann 函数拟合法和无穷拟合法两种算法线性融合的一种新的拟合算法,其光斑质心位置表示为<sup>[40]</sup>

$$x_0 \approx m \times k_1 \frac{\text{erf}^{-1}(\sigma_x) \cdot \omega}{\sqrt{2}} + (1 - m) \times k_2 \ln\left(\frac{1 + \sigma_x}{1 - \sigma_x}\right) \quad (29)$$

式中:  $k_1$ 、 $k_2$  是修正系数;  $m$  是权重;  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $m$  可用  $N$  组实验或仿真数据按最小二乘法计算得到<sup>[40]</sup>。

### 4.11 无穷积分拟合改进算法

无穷积分拟合改进算法是在考虑 QD 光敏面半径和死区宽度影响的情况下提出的一种算法,

提高了定位精度。通过引入补偿因子, 并采用分段多项式拟合方法对补偿函数进行拟合。光斑质心位置的表达式为<sup>[28]</sup>

$$x_0 = \frac{\text{erf}^{-1}(\sigma_x)}{\sqrt{2}} \times r \times \lambda(r, R, d) = g(\sigma_x) \times \lambda_e(\sigma_x, r, R, d) \quad (30)$$

式中:  $r$  为高斯光斑半径;  $R$  为 QD 的半径;  $d$  为死

区宽度;  $\lambda_e = \frac{\sum_{i=1}^N g(\sigma_x) \times X_i}{\sum_{i=1}^N g^2(\sigma_x)}$ 。

如表 5 所示, 对四象限探测器常用的算法进行了总结。

表 5 光斑检测算法总结

Table 5 Summary of spot detection algorithms

函数名称	优点	缺点
加减算法	灵敏度和线性范围较为平衡	线性范围较窄
对角线算法	线性范围较宽	灵敏度较低
差比和算法	灵敏度高	线性范围窄
对数算法	线性范围宽	灵敏度较差
函数拟合法	简单、易实现	拟合效果取决于拟合函数
归一化中心法	公式简单、计算速度快、对硬件要求较低	使用范围小
多项式拟合法	检测范围较大、检测精度较高	公式复杂、对硬件要求高
无穷积分法	检测精度较高	未考虑探测器死区和大小, 检测误差较高
Boltzmann函数拟合法	检测精度较高	检测误差较高
Composite拟合法	检测误差较低、检测精度高	精度难以再次提升
无穷积分拟合改进算法	检测精度高、计算量小, 对硬件要求较低	反求导过程较为困难, 适应范围小

随着科技的发展, 四象限探测器光斑检测算法也不断发展和完善。算法的精度是影响光斑检测效果的关键因素, 研究者通过改进算法, 引入各种估计、优化等方法来提高光斑的检测精度。同时, 研究者着眼于提高光斑检测算法的计算速度和实时性, 以满足高速数据处理的需求。对于背景光的干扰, 研究者从过滤、噪声预处理等方面入手, 提高光斑检测的抗噪性和可靠性。研究者将自适应控制算法用于光斑检测, 使其能够统一地适应各种信号噪声干扰情况, 并为光斑检测提供更高效的处理方式。

随着 QD 的不断进步, 光斑检测算法也在不断地改进和完善, 从精度、速度、适应性、抗干扰等

方面提高了算法效果。

## 5 QD 光斑检测系统

基于 QD 的光斑检测技术一方面应用于对待测目标进行线位移和角位移测量, 另一方面应用于对待测目标或激光器发射端的动态跟踪。基于 QD 的光斑检测系统有光束对准检测系统、基于 QD 的跟踪与通信复合系统、微纳激光通信终端。

### 5.1 光束对准检测系统

如图 23 所示, 为光束对准检测系统结构。光学接收天线采用卡塞格林望远镜, 在接收望远镜后放置检测模块, 在分光棱镜的垂直方向放置圆筒状支架、调光镜头和 QD。系统通过两台电机进行光束对准检测。

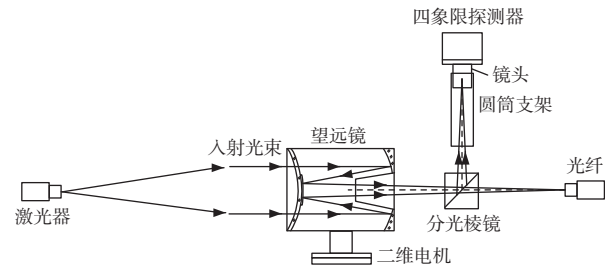


图 23 光束对准检测系统结构<sup>[34]</sup>

Fig. 23 Structure diagram of beam-alignment detection system

#### 5.1.1 缺失光斑检测测试

光斑通过捕获进入检测视场, 如图 24 所示为检测到的缺失光斑, 检测结果表明, 系统可以判别光斑状态。



图 24 缺失光斑检测图<sup>[34]</sup>

Fig. 24 Missing spot detection image

#### 5.1.2 系统对准测试

如图 25 所示, 为通过阈值检测算法将光斑调节至无缺失状态时检测到的完整光斑。如图 26 所示, 为光斑由缺失状态调节至完整光斑状态时探测器输出的结果。



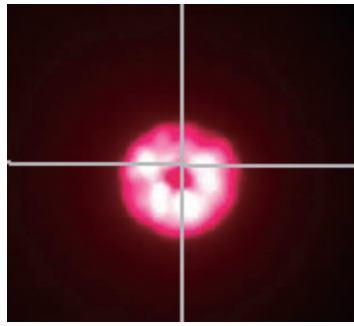


图 25 完整光斑检测图<sup>[34]</sup>

Fig. 25 Complete spot detection image

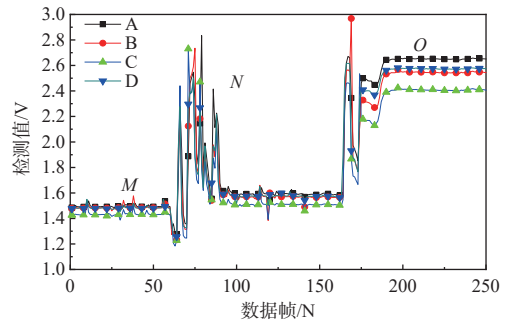


图 26 调节过程 QD 输出图<sup>[34]</sup>

Fig. 26 QD output diagram during adjustment process

### 5.2 QD 的跟踪与通信复合系统

QD 的跟踪与通信复合探测原理<sup>[46]</sup>如图 27 所

示,由激光调制发射单元、信号检测和处理单元、跟踪控制单元以及通信单元 4 部分组成。

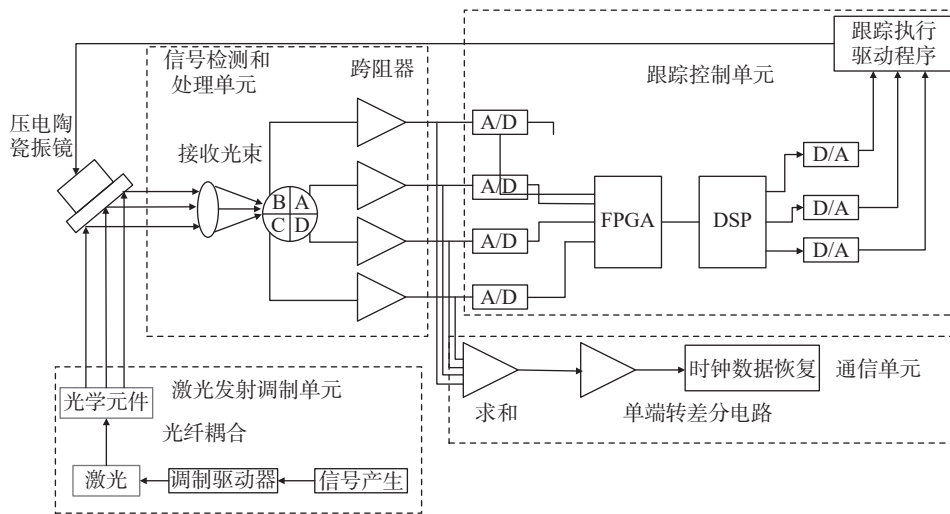


图 27 跟踪与通信复合探测系统<sup>[46]</sup>

Fig. 27 Tracking and communication composite detection system

### 5.3 微纳激光通信终端

微纳激光通信终端<sup>[53]</sup>的光学架构与伺服系统结构如图 28 所示。

该系统结构由四象限探测器、MEMS 振镜、振镜驱动、模数转换、数模转换等单元组成,通过四象限探测器和 MEMS 振镜完成对光斑进行跟踪。

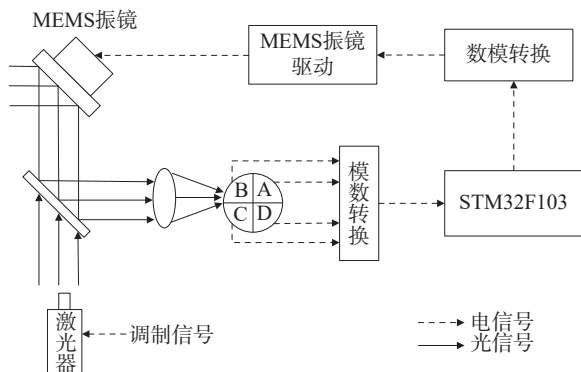


图 28 微纳激光通信终端系统结构示意图<sup>[53]</sup>

Fig. 28 Structure diagram of micro nano laser communication terminal system

## 6 光斑检测研究展望

本文以光斑检测为切入点,介绍了基本的光斑模型和 QD 检测原理,综述了 QD 检测光斑的发展现状,对 QD 光斑检测影响因素和光斑检测算法进行了叙述,对 QD 光斑检测系统进行了介绍。随着技术的发展,基于 QD 的光斑检测研究也在不断深入和拓展。以下是一些未来研究的展望。

四象限探测器作为高精密度器件,研究影响其检测精度的因素对提高光斑位置检测精度极其重要。随着制作工艺、材料质量的逐渐提高,死区和器件响应非均匀性的影响已经大大减少。因此,

影响光斑位置检测精度的因素主要为光斑位置检测算法和光、电噪声, 今后更多的研究可以集中于如何过滤和排除这些干扰因素。除了光斑的位置, 光斑的形状对于光斑检测也非常重要, 研究人员可以尝试开发能够同时检测光斑位置和光斑形状的技术。

不同的光斑检测算法具有不同的优缺点, 传统的光斑检测算法无法兼顾灵敏度和线性范围, 只适用于检测精度不高和线性范围不宽时的检测; 函数拟合法的的效果取决于算法采用的拟合函数, 由归一化中心法发展到 Composite 拟合算法, 虽然其算法精度得到提高, 却难以继续提升; 多项式拟合法通过增加阶数来提升精度, 但运算量也会随之提升。因此, 需要提出一种检测精度高、运算量小的新型光斑位置检测算法, 可以结合深度学习等现代技术, 实现 APT 系统中粗、精跟踪阶段的算法一体化。

总之, 基于四象限探测器的光斑检测技术具有广泛的应用前景, 未来研究可从提高精度、同时检测光斑位置和形状、结合深度学习等现代技术和多领域交叉相互融合等方向入手, 为实现更多的应用场景和实际需求提供更好的支持和帮助。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 柯熙政, 邓莉君. 无线光通信[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 11-14.  
KE Xizheng, DENG Lijun. Wireless optical communication[M]. Beijing: Science Press, 2016: 11-14.
- [ 2 ] 柯熙政, 吴加丽, 杨尚君. 面向无线光通信的大气湍流研究进展与展望[J]. 电波科学学报, 2021, 36(3): 323-339.  
KE Xizheng, WU Jiali, YANG Shangjun. Research progress and prospect of atmospheric turbulence for wireless optical communication[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(3): 323-339.
- [ 3 ] 李征, 廖志文, 梁静远, 等. 大气湍流模型与大气信道模型的研究与展望[J]. 光通信技术, 2023, 47(3): 9-17.  
LI Zheng, LIAO Zhiwen, LIANG Jingyuan, et al. Research and prospects of atmospheric turbulence model and atmospheric channel model[J]. Optical Communication Technology, 2023, 47(3): 9-17.
- [ 4 ] 姜清华, 李立京, 刘腾飞. 基于四象限探测器的导引头信号处理系统设计[J]. 电子测量技术, 2018, 41(2): 88-92.  
JIANG Qinghua, LI Lijing, LIU Tengfei. Design of seeker signal processing system based on four-quadrant detector[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(2): 88-92.
- [ 5 ] 刘鹏飞, 宋翠莲, 马昱超. 一种用于微光探测的四象限探测器设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(5): 99-104.  
LIU Pengfei, SONG Cuilian, MA Yuchao. Design of a four quadrant detector for shimmer detection[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(5): 99-104.
- [ 6 ] 李曦. 基于QD的精确定位技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.  
LI Xi. Research on precision positioning technology based on QD[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [ 7 ] LI D, LIU S, BIN W. Research on factors that influence detecting precision of quadrant detector[J]. International Journal of Advancements in Computing Technology, 2011, 3(2): 112-117.
- [ 8 ] HERMOSA N, AIELLO A, WOERDMAN J P. Quadrant detector calibration for vortex beams[J]. Optics Letters, 2011, 36(3): 409-411.
- [ 9 ] MENG Y, SUN A X, ZHANG G Y, et al. Research effect of four-quadrant detector detection spot in atmospheric turbulence[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 552: 123-127.
- [ 10 ] 赵馨, 佟首峰, 姜会林. 四象限探测器的特性测试[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2164-2170.  
ZHAO Xin, TONG Shoufeng, JIANG Huilin. Experimental testing on characteristics of four-quadrant detector[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(10): 2164-2170.
- [ 11 ] 梁静远, 亢维龙, 董壮, 等. 自由空间光通信系统光学天线技术研究进展[J]. 光通信技术, 2022, 46(4): 1-10.  
LIANG Jingyuan, KANG Weilong, DONG Zhuang, et al. Research progress of optical antenna technology in free space optical communication system[J]. Optical Communication Technology, 2022, 46(4): 1-10.
- [ 12 ] 柯熙政, 李世艳. 光斑缺碎情形下光学天线光轴对准实验研究[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 133-141.  
KE Xizheng, LI Shiyan. Experimental study on optical axis alignment of the optical antenna under the spot broken[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 133-141.
- [ 13 ] 张圆清. 空间激光通信光斑位置检测与跟踪系统设计[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.

- ZHANG Yuanqing. Design of spot position detection and tracking system for space laser communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [ 14 ] GUO H W, LIU R Q, DENG Z Q, et al. Performance analysis and testing of four-quadrant position sensitive detector[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 317/318/319: 1107-1113.
- [ 15 ] 陈梦苇. 基于象探测器的光斑中心定位算法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- CHEN Mengwei. Research on spot center location algorithm based on image detector[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [ 16 ] HEMMATI H, BISWAS A, DJORDJEVIC I B. Deep-space optical communications: future perspectives and applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(11): 2020-2039.
- [ 17 ] TAKASHI J. Optical inter-orbit communication experiment between OICETS and ARTEMIS[J]. *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, 2012, 59(1/2): 23-33.
- [ 18 ] BAILLY M, PEREZ E. Pointing, acquisition, and tracking system of the European SILEX program: a major technological step for intersatellite optical communication[C]// *Proceedings of Optics, Electro-Optics, and Laser Applications in Science and Engineering*. Los Angeles: SPIE, 1991, 1417: 142-157.
- [ 19 ] GUELMAN M, LIVNE A, MICHALIK H, et al. Broadband laser intersatellite link for microsattellites: project overview[J]. *Space Technology*, 2002, 22(3): 113-119.
- [ 20 ] TOYODA M, ARAKI K, SUZUKI Y. Measurement of the characteristics of a quadrant avalanche photo-diode application to a laser tracking system[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(1): 145-149.
- [ 21 ] TOYOSHIMA M, TAKENAKA H, SHOJI Y, et al. Results of Kirari optical communication demonstration experiments with NICT optical ground station (KODEN) aiming for future classical and quantum communications in space[J]. *Acta Astronautica*, 2012, 74: 40-49.
- [ 22 ] LEE E J, PARK Y, KIM C S, et al. Detection sensitivity of the optical beam deflection method characterized with the optical spot size on the detector[J]. *Current Applied Physics*, 2010, 10(3): 834-837.
- [ 23 ] SCHMIDT C, HORWATH J. Wide-field-of-regard pointing, acquisition and tracking-system for small laser communication terminals[J]. *Proceedings of ICSOS*, 2012, 8(4): 1-6.
- [ 24 ] BARBARIĆ Ž P, MANOJLOVIĆ S M, BONDŽULIĆ B P, et al. New relationship of displacement signal at quadrant photodiode: control signal analysis and simulation of a laser tracker[J]. *Optik*, 2014, 125(4): 1550-1557.
- [ 25 ] CHEN Z L, YAN J J. Impact of pointing errors on performance of a ground-to-satellite laser uplink communication system based on  $M$ -ary pulse position modulation[J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2009, 16(Sup.1): 20-23.
- [ 26 ] ROBINSON B S, BOROSON D M, BURIANEK D A, et al. The lunar laser communications demonstration[C]// *IEEE 2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*. Santa Monica: IEEE, 2011: 54-57.
- [ 27 ] ROBINSON B S, BOROSON D M, BURIANEK D A, et al. Overview of the lunar laser communications demonstration[C]// *Proceedings of Free-Space Laser Communication Technologies XXIII*. San Francisco: SPIE, 2011.
- [ 28 ] 吴佳彬. 基于四象限探测器的高精度激光光斑位置检测技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
- WU Jiabin. Research on high-precision laser spot position detection technology based on four-quadrant detector[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [ 29 ] SAFI H, DARGAHI A, CHENG J L. Beam tracking for UAV-assisted FSO links with a four-quadrant detector[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(12): 3908-3912.
- [ 30 ] 徐代升. 四象限探测系统信号光斑的优化设计[J]. *湖南理工学院学报(自然科学版)*, 2007, 20(1): 50-53.
- XU Daisheng. Optimal design for signal light spot of detecting systems with quadrant detectors[J]. *Journal of Hunan Institute of Science and Technology (Natural Sciences)*, 2007, 20(1): 50-53.
- [ 31 ] 赵馨, 佟首峰, 刘云清, 等. 四象限探测器在空间激光通信中应用研究[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(1): 46-49.
- ZHAO Xin, TONG Shoufeng, LIU Yunqing, et al. Application research on four-quadrant detector in space laser communication system[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, 21(1): 46-49.
- [ 32 ] 张辉, 陈云善, 耿天文, 等. 四象限探测器位置检测精度的主要影响因素研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 306-314.

- ZHANG Hui, CHEN Yunshan, GENG Tianwen, et al. Study on main factors affecting position detection accuracy of four-quadrant detector[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(12): 306-314.
- [ 33 ] 张骏, 钱惟贤, 刘泽伟. 四象限探测器输出非均匀性分析与矫正[J]. *红外技术*, 2016, 38(7): 565-570.
- ZHANG Jun, QIAN Weixian, LIU Zewei. Analysis and correction of the output non-uniformity of four quadrant detector[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(7): 565-570.
- [ 34 ] 李世艳. 无线激光通信系统中光斑精确对准实验方案研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- LI Shiyan. Research on experimental scheme of spot accurate alignment in wireless laser communication system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [ 35 ] 李树德, 刘彩霞, 徐林, 等. 星间激光通信中四象限探测器的定位精度研究[J]. *光通信研究*, 2021(4): 61-65.
- LI Shude, LIU Caixia, XU Lin, et al. Research on positioning accuracy of four quadrant detector in inter-satellite laser communication[J]. *Study on Optical Communications*, 2021(4): 61-65.
- [ 36 ] 刁宽, 刘晓军, 徐龙, 等. 四象限探测器光斑定位精度影响因素研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(4): 14-18.
- DIAO Kuan, LIU Xiaojun, XU Long, et al. Research on factors affecting spot positioning accuracy of four-quadrant detector[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2022, 50(4): 14-18.
- [ 37 ] 陈勇, 祝天瑞, 李焕功. 四象限探测器测角算法分析与改进[J]. *激光与红外*, 2009, 39(6): 669-672.
- CHEN Yong, ZHU Tianrui, LI Huangong. Analysis and improvement in angle-measurement algorithm of the four-quadrant detector[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(6): 669-672.
- [ 38 ] 司栋森, 李增智, 王晓旭. 采用四象限探测器的智能跟踪定位算法[J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(4): 13-17.
- SI Dongsen, LI Zengzhi, WANG Xiaoxu. An intelligent tracking algorithm using four-quadrant detector[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(4): 13-17.
- [ 39 ] 陈梦苇, 杨应平, 贾信庭, 等. 四象限探测器光斑中心定位算法研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2013, 37(5): 1124-1127.
- CHEN Mengwei, YANG Yingping, JIA Xinting, et al. Research of spot center location algorithm for four quadrant detector[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2013, 37(5): 1124-1127.
- [ 40 ] WU J B, CHEN Y S, GAO S J, et al. Improved measurement accuracy of spot position on an InGaAs quadrant detector[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(27): 8049-8054.
- [ 41 ] 郭小康, 张彦梅, 贺仕杰. 基于四象限探测器的光斑中心高精度定位算法[J]. *激光与红外*, 2017, 47(11): 1353-1357.
- GUO Xiaokang, ZHANG Yanmei, HE Shijie. Study on high precision positioning algorithm of spot center based on the four-quadrant detector[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(11): 1353-1357.
- [ 42 ] 苟晔鹏, 刘星, 刘强, 等. 基于Infinite integral的四象限探测器光斑位置检测算法[J]. *激光与红外*, 2021, 51(9): 1249-1256.
- GOU Yepeng, LIU Xing, LIU Qiang, et al. A four-quadrant detector spot position detection algorithm based on infinite integral algorithm[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(9): 1249-1256.
- [ 43 ] 秦立存, 贺伟. 基于四象限探测器的激光光斑中心定位算法[J]. *应用激光*, 2021, 41(3): 561-568.
- QIN Licun, HE Wei. Laser spot center location algorithm based on four-quadrant detector[J]. *Applied Laser*, 2021, 41(3): 561-568.
- [ 44 ] 王岱, 杨世洪. 采用四象限探测器的双轴跟踪控制技术[J]. *光电工程*, 2003, 30(5): 31-33.
- WANG Dai, YANG Shihong. Double-axis tracking control techniques based on four-quadrant detector[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, 30(5): 31-33.
- [ 45 ] ZHANG W, ZHANG H, LIU B, et al. Design of small laser tracking system based on four-quadrant detector[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 300/301: 393-399.
- [ 46 ] 范新坤, 张磊, 宋延嵩, 等. 四象限探测器的跟踪与通信复合探测技术[J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 247-254.
- FAN Xinkun, ZHANG Lei, SONG Yansong, et al. Simultaneous detection technology of tracking and communication based on four-quadrant detector[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 247-254.
- [ 47 ] 林鑫, 郭迎, 韩明珠, 等. 基于四象限探测器的激光束二维扫描跟踪系统的研究[J]. *半导体光电*, 2018, 39(3): 425-430.
- LIN Xin, GUO Ying, HAN Mingzhu, et al. Research on two-dimensional laser beam scanning and tracking system based on four quadrant detector[J]. *Semiconductor*



- Optoelectronics, 2018, 39(3): 425-430.
- [ 48 ] 刘思鸣, 何宁, 邓德迎. 基于四象限探测的激光跟踪系统的设计与实现[J]. 桂林电子科技大学学报, 2019, 39(1): 7-11.  
LIU Siming, HE Ning, DENG Deying. Design and implementation of laser tracking system based on four quadrant detection[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2019, 39(1): 7-11.
- [ 49 ] 王睿扬, 于笑楠, 佟首峰, 等. 四象限探测器数字跟踪通信复合接收机设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(3): 42-50.  
WANG Ruiyang, YU Xiaonan, TONG Shoufeng, et al. Design of tracking and communication composite digital receiver for four quadrant detector[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2019, 42(3): 42-50.
- [ 50 ] 王淋正, 邹华, 黄硕, 等. 中心开孔型四象限探测器光纤定位闭环控制方法[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(6): 264-270.  
WANG Linzheng, ZOU Hua, HUANG Shuo, et al. Closed-loop control method of optical fiber positioning of centeropening four-quadrant detector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(6): 264-270.
- [ 51 ] KE X Z, LIANG H L. Airborne laser communication system with automated tracking[J]. International Journal of Optics, 2021, 2021: 1-8.
- [ 52 ] 梁韩立. 机载激光通信自动跟踪控制系统设计与实现[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.  
LIANG Hanli. Design and implementation of automatic tracking control system for airborne laser communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [ 53 ] 陈韵, 于笑楠, 江伦, 等. 基于QD与MEMS振镜的微纳激光通信终端伺服技术研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(1): 39-44.  
CHEN Yun, YU Xiaonan, JIANG Lun, et al. Research on servo technology of micro nano laser communication terminal based on QD and MEMS micromirror[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2022, 45(1): 39-44.
- [ 54 ] 李千. 基于阵列探测器的空间激光通信光斑位置检测技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.  
LI Qian. Research on spot position detection technology of space laser communication based on array detector[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020.