

高精度近红外光斑位置检测模型研究

吴佳彬^{1,2}, 陈云善¹, 高世杰^{1,2}, 吴志勇¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了提高 1 550 nm 近红外波段光斑位置的检测精度, 提出了一种改进的积分无穷解算模型。以高斯光斑为入射光模型, 深入分析了 InGaAs 四象限探测器(Quadrant Detector, QD)输出信号与光斑实际位置之间的关系, 考虑探测器直径及沟道的影响, 通过引入误差补偿因子, 利用最小二乘拟合的方法得到有效光斑半径, 从而获得新解算模型的解析表达式, 最后在搭建的 InGaAs QD 光斑位置检测系统上对提出模型进行实验验证。仿真和实验结果表明: 新模型可有效降低不同半径光斑下的位置检测误差; 入射光总能量约为 10 μW , 光斑半径 0.75 mm 时, 在 $[-0.75\sim 0.75\text{ mm}]$ 检测范围内, 新模型均方根误差为 0.003 mm, 最大误差为 0.009 mm, 较原有模型分别降低了 78.6% 和 52.6%。新模型在激光通信和激光雷达等工程实际中具有较好的应用前景。

关键词: 1 550 nm 近红外波段; InGaAs 四象限探测器; 光斑位置检测

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0717001

High precision spot position detection model for the near infrared light

Wu Jiabin^{1,2}, Chen Yunshan¹, Gao Shijie^{1,2}, Wu Zhiyong¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve the spot position detection accuracy for 1 550 nm near infrared band, an innovative infinite integral model was proposed. At first, the relationship between InGaAs four-quadrant detector (QD) output signal and the spot real position was deeply analyzed where the laser spot energy displayed a Gaussian profile. By taking into account the error effects of detector diameter and gap size, and introducing the position error compensation factor, an effective spot radius was obtained with a best fit using the least square method, and then a new analytical expression was proposed. Finally, the experiment was made for verifying the performance of our new model in the established InGaAs QD spot position detection system. The results of simulation and experiment show that the new model could effectively reduce the spot position detection error for different radii; when the total energy of incident light is about 10 μW , the beam radius is 0.75 mm, in the detection range of $[-0.75\sim 0.75\text{ mm}]$, the root-mean-square error of 0.003 mm and the maximum position error of 0.009 mm with the new model, are reduced

收稿日期: 2015-11-24; 修订日期: 2015-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(11403064)

作者简介: 吴佳彬(1988-), 男, 博士生, 主要从事微弱信号检测及光通信技术方面的研究。Email: wujiabin777@163.com

导师简介: 吴志勇(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电测控设备总体技术和光通信技术方面的研究。

Email: wuzy@ciomp.ac.cn

78.6% and 52.6% than the original model, respectively. Therefore, the new model would have a good prospect in the engineering practice of laser communication or laser radar.

Key words: 1 550 nm near infrared band; InGaAs four-quadrant detector; spot position detection

0 引言

1 550 nm 近红外波段激光处于大气窗口, 受大气湍流影响较小, 被广泛应用在激光雷达、激光通信等系统中, 而对光斑位置检测的精度直接影响了这些系统的整体跟踪性能^[1-4]。用于光斑位置检测的探测器通常选择红外 CCD 或 InGaAs 四象限探测器 (Quadrant Detector, QD), 但由于前者在 1 550 nm 波段量子效率较低, 且帧频有限, 而与之相比的 InGaAs QD 具有更高的量子效率和灵敏度, 帧频可达几十 kHz, 可大大提高系统的性能^[5-6], 因此基于 InGaAs 四象限探测器位置检测系统成为近些年研究的热点。

当光斑中心在 InGaAs 四象限探测器原点附近时精度较高, 距离原点越远, 光斑位置检测精度越低, 这就限制了整个系统的跟踪精度。为了提高检测精度, 国内外专家学者已做了大量工作。目前关于四象限探测器光斑位置检测模型算法研究主要基于均匀光斑和高斯光斑两种模型, 针对均匀光斑模型, 参考文献[7]给出了解算偏差的解析解, 并分析了不同光斑半径对于解算偏差值误差的影响; 参考文献[8]利用微动法不仅给出光斑的具体位置, 同时得到光斑半径, 但微动量的大小对算法的影响较大。相比均匀光斑, 高斯光斑模型更接近实际情况, 并且在一定的探测范围内, 高斯光斑模型比均匀光斑灵敏度更高, 参考文献[9]针对高斯光斑模型, 给出了积分限近似为无穷时光斑位置的解析表达式, 取得一定的成果, 但由于其忽略了探测器直径大小和四象限探测器沟道对位置检测精度的影响, 仍存在较大位置检测误差。

文中深入分析了探测器输出信号与高斯光斑实际位置之间的关系, 在传统解算模型的基础上, 引入误差补偿因子, 对探测器直径及沟道的影响进行补偿, 利用最小二乘拟合的方法得到与光斑半径相对应的有效光斑半径, 获得新的解算模型。使用 Matlab 对不同半径光斑位置检测精度进行仿真分析, 搭建

基于半径为 1.5 mm 的 InGaAs QD 探测器位置检测实验系统, 对位置检测精度进行验证, 并使用均方根误差和最大误差对新模型的位置检测精度进行评价。结果表明: 文中模型可有效提高光斑位置的检测精度。

1 原积分无穷解算模型

1.1 高斯光斑下四象限探测器位置检测原理

四象限探测器可以看作是由 4 个完全相同的光电二极管组合在一起, 被没有光电效应的沟道所连接^[10-14], 如图 1 所示。当有光照入射的时候, 每个象限会感应出相应的光电流。设入射光的功率密度函数为 $p(x, y)$, 光电转换效率为 τ , 探测器在各象限所接收到的光斑所占面积为 M , 后端跨阻放大器放大倍数为 Σ_i , 则各象限输出的电压值为 U_i :

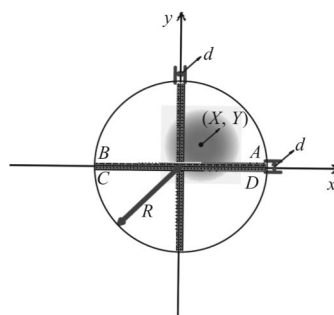


图 1 四象限探测器工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagrams for operating principle of four QD

$$U_i = \tau M \iint_{\Sigma_i} p(x, y) d\Sigma_i \quad (1)$$

x 轴和 y 轴解算偏差值分别为:

$$\sigma_x = \frac{2(U_A + U_D)}{U_A + U_B + U_C + U_D} - 1 \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{2(U_A + U_B)}{U_A + U_B + U_C + U_D} - 1 \quad (3)$$

若输出的四路电压分别相等, 则说明光斑在四象限探测器的中心位置, 若输出的四路电压不等, 则说明光斑在四象限探测器偏离中心的位置, 公式(2)和(3)分别呈现了 x 轴和 y 轴偏离中心位置的程

但并不是光斑能量中心所在的具体位置^[15-16]。

为了能够实时精确定位光斑在四象限探测器的位置,首先需要知道到达探测器靶面的光斑的能量分布形式,设其近似为高斯分布,功率密度函数如公式(4)所示:

$$p(x, y) = \frac{2P_0}{\pi\omega^2} \exp\left[-\frac{2((x-X)^2+(y-Y)^2)}{\omega^2}\right] \quad (4)$$

式中: X, Y 为光斑中心坐标位置; P_0 为高斯光斑总

$$\sigma_x = \frac{2 \left(\int_{-\sqrt{R-x^2}}^{\sqrt{R-x^2}} \int_{-\sqrt{R-d^2}/4}^{\sqrt{R-d^2}/4} p(x,y) dx dy - \int_{-d/2}^{d/2} \int_{d/2}^{\sqrt{R-d^2}/4} p(x,y) dx dy \right)}{\left(\int_{-\sqrt{R-x^2}}^{\sqrt{R-x^2}} \int_{-\sqrt{R-d^2}/4}^{-d/2} p(x,y) dx dy - \int_{-\sqrt{R-x^2}}^{\sqrt{R-x^2}} \int_{-\sqrt{R-d^2}/4}^{d/2} p(x,y) dx dy - \int_{-d/2}^{d/2} \int_{-\sqrt{R-d^2}/4}^{d/2} p(x,y) dx dy - \int_{-d/2}^{d/2} \int_{d/2}^{\sqrt{R-d^2}/4} p(x,y) dx dy \right)} - 1 \quad (5)$$

1.2 积分无穷解算模型

假设照射在探测器外面光斑能量很少,忽略沟道的影响,且积分限取为无穷进行求解,公式(6)所示:

$$\sigma_x \approx \frac{2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} p(x,y) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} p(x,y) dx dy} - 1 = \text{erf}\left(\frac{\sqrt{2} X}{\omega}\right) \quad (6)$$

得到光斑位置 X 的估计解算值 x_0 :

$$x_0 = \frac{\text{erf}^{-1}(\sigma_x) * \omega}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

式中: $\text{erf}^{-1}(\cdot)$ 为反误差函数。这就是传统的积分无穷解算模型。从 $\sigma_x \approx f(X, \omega)$ 中得到光斑位置的估计值 $x_0 = f^{-1}(\sigma_x, \omega)$ 见公式(7),它忽略了探测器光敏面直径 R 和沟道 d 对解算光斑位置误差的影响。

设 X 为光斑位置的理想值, x_0 为光斑位置的估计解算值,则 $\delta_x = x_0 - X$ 为每点对应的误差值。

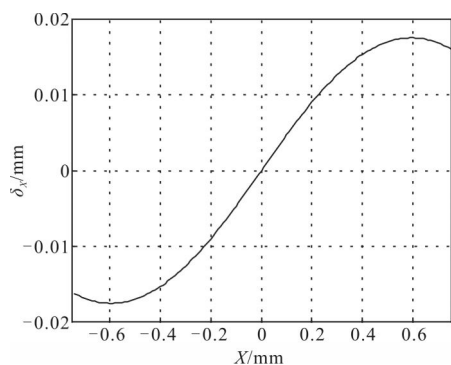


图 2 入射光斑半径为 0.75 mm,原模型位置误差曲线

Fig.2 Position error curves of the original model when radius is 0.75 mm

从图 2 中可以看出,采用探测器直径为 $R=3$ mm,沟道 $d=0.045$ mm 的 QD,当入射光斑半径为 0.75 mm 时,随着 X 的不断增大,误差呈现“S”形分布,在 $X=$

能量。

由于 x 和 y 轴具有类似的结论,所以只讨论 x 轴方向的情况。将公式(4)带入公式(2),积分限取四象限探测器边缘^[17-18],可以得到输出信号的解算偏差值与实际误差的关系表达式(5),光斑中心的具体位置 $X=f^{-1}(\sigma_x, \omega, R, d)$ 可以从公式(5)中 $\sigma_x=f(X, \omega, R, d)$ 中反解出,而上式化简后是一个超越方程,无法求解出解析表达式,给工程实际应用带来较大的困难。

0.6 mm 处,误差出现最大值,约为 0.017 mm,而在 $X=0.22$ mm 处,误差就达到 0.01 mm,这给整个系统的精度带来较大的影响,因此对原有传统解算模型进行改进是有必要的。

2 改进后的新解算模型

通过观察可以看出:公式(7)中的 x_0 由下面两部分相乘得到,即 $x_0=g(\sigma_x)*\omega$ 。这里 $g(\sigma_x)$ 仅是关于解算偏差值 σ_x 的函数,它决定了整个函数曲线的整体变化趋势, ω 为入射光斑半径,它可以看作光斑位置关系与探测器解算偏差函数的比例系数。

为了能够得到更高的精度,考虑到探测器直径与沟道对解算模型的影响,引入误差补偿因子函数 $\eta=f(\omega, R, d)$,则对光斑位置的估计可以写成:

$$x_0 = g(\sigma_x) * \omega * \eta(\omega, R, d) \quad (8)$$

$\eta(\omega, R, d)$ 中引入积分无穷模型没有考虑的因素 R 和 d ,而针对相同的 R, d ,不同的 ω ,仍会有不同的误差曲线,所以补偿因子还有因子。将后两项合成为一项,重新定义为:有效光斑半径 ω_e ,则有:

$$x_0 = g(\sigma_x) * \omega_e \quad (9)$$

其中:

$$g(\sigma_x) = \frac{\text{erf}^{-1}(\sigma_x)}{\sqrt{2}}$$

$$\omega_e = \omega * \eta(\omega, R, d) = h(\omega, R, d)$$

公式(9)为改进后的新模型,有效光斑半径 ω_e 表征了 ω, R, d 三项对光斑位置影响的贡献。

为了得到有效光斑半径的取值,假设一束光斑半径为 ω ,总能量为归一化 1 的高斯光斑入射到半径为 R ,沟道为 d 的 QD 靶面上,光斑以每 0.001 mm

的间隔从(-L mm, 0)移动到(L mm, 0)。记录下每相隔 0.001 mm 时,各点光斑位置的理想值 X_i 和各个象限输出电流值 I_{Ai} I_{Bi} I_{Ci} 和 I_{Di} , 积分限取探测器靶面边界,根据公式(3)计算出各点的偏差值 σ_{xi} 。这样就得到了理论上的 (X_i, σ_{xi}) 的一一对应值,同时也得到了各点的值 $g(\sigma_{xi})$,将各组值带入公式(9),利用最小二乘法构建如下的位置残差的数学模型:

$$I(\omega_e) = \|\delta_x\|^2 = \sum_{i=1}^{2L+1} [x_0(\omega_e) - X_i]^2 \quad (10)$$

上式对 ω_e 求一阶导数,得到:

$$\frac{\partial I}{\partial \omega_e} = 2 \sum_{i=1}^{2L+1} g^2(\sigma_{xi}) * \omega_e - 2 \sum_{i=1}^{2L+1} g(\sigma_{xi}) * X_i \quad (11)$$

令上式一阶导数为零,可以求出最优的,即:

$$\omega_e = \frac{\sum_{i=1}^{2L+1} g(\sigma_{xi}) * X_i}{\sum_{i=1}^{2L+1} g^2(\sigma_{xi})} \quad (12)$$

由此计算出了不同光斑半径、探测器直径和沟道下的有效光斑半径。文中利用 Matlab,仿真了不同的 $d/R, \omega/R$ 的条件下,有效半径的取值变化情况,如图 3 所示。

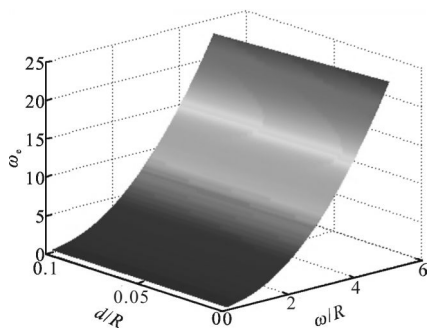


图 3 ω_e 取值仿真曲线

Fig.3 Values of ω_e simulation curves

从图 3 中可以看出, d/R 对有效光斑半径 ω_e 影响较小,而随着 ω/R 的逐渐增大, ω_e 的取值呈现非线性增大的趋势。在实际应用的系统中,探测器的 R 和 d 都是定值,文中以一种 $R=1.5$ mm, $d=0.045$ mm 的 InGaAs 四象限探测器为例进行讨论,方法同样适合于其他类型的四象限探测器系统。图 4 所示为 ω_e 在 $R=1.5$ mm, $d=0.045$ mm 的条件下,不同入射光斑半径 ω 的变化曲线。由于 R 和 d 取了定值,那么有效光斑半径 ω_e 仅是入射半径 ω 的函数。 ω_e 和 ω 呈现非

线性的关系,利用多项式拟合的方法可以拟合得到 $\omega_e=h(\omega)$ 的表达式,由于六次多项式与五次多项式最大残差仅相差 10^{-5} ,所以采用五次多项式拟合,表达式如下:

$$\omega_e = -0.071 * \omega^5 + 0.3 * \omega^4 - 0.3 * \omega^3 + 0.16 * \omega^2 + 0.94 * \omega + 0.0038 \quad (13)$$

将公式(13)代入公式(9)中,得到了 $R=1.5$ mm, $d=0.045$ mm 的 InGaAs 四象限探测器改进后的新解算模型:

$$x_0 = \frac{\text{erf}^{-1}(\sigma_x)}{\sqrt{2}} * (-0.071 * \omega^5 + 0.3 * \omega^4 - 0.3 * \omega^3 + 0.16 * \omega^2 + 0.94 * \omega + 0.0038) \quad (14)$$

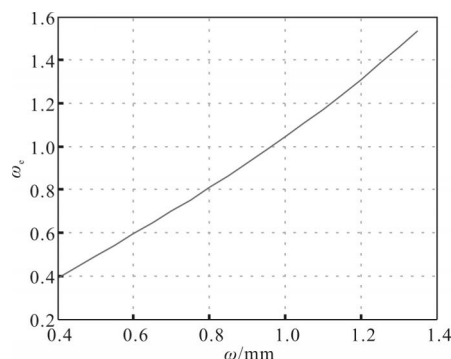


图 4 当 $R=3$ mm, $d=0.045$ mm 时, ω_e 取值仿真曲线

Fig.4 Values of ω_e simulation curves, when the R is 3 mm and the d is 0.045 mm

为了更好地对所提新模型进行评价,引入了最大误差和均方根误差。设 $|\delta_x|$ 的最大值为探测范围内的最大误差值 δ_{MAX} , $\sqrt{\sum_{i=1}^N \delta_i^2 / N}$ 为探测范围内的均方根误差值 δ_{RMSE} 。如图 5 所示,当入射光斑

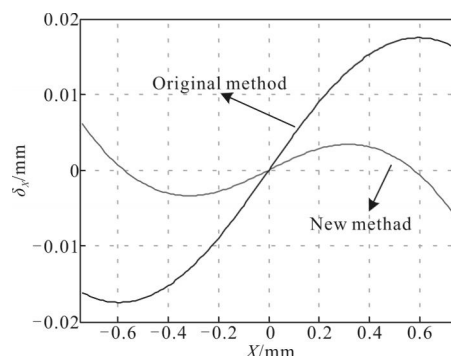


图 5 入射光斑半径为 0.75 mm,新解算模型与原模型误差对比仿真曲线

Fig.5 Simulation curves for comparison of position error the original model and the new model when radius is 0.75 mm

半径为 0.75 mm 时,有效光斑半径 ω_e 为 0.727 9 mm,新模型在 $[-0.22\sim 0.22\text{ mm}]$ 范围内最大误差 δ_{MAX} 为 0.0035 mm,相比原模型降低 65%。而在 $[-0.75\sim 0.75\text{ mm}]$ 范围内,原模型的解算最大误差 δ_{MAX} 为 0.017 mm,而改进后的模型最大误差 δ_{MAX} 约为 0.006 mm,最大误差降低约为 64.7%。在 $[-0.75\sim 0.75\text{ mm}]$ 范围内原模型的均方根误差 δ_{RMSE} 为 0.013 mm,新模型的均方根误差 δ_{RMSE} 仅为 0.003 mm,均方根误差降低 76.9%。

3 实验与分析

为了验证新解算模型对光斑位置检测精度的提升,搭建了以 InGaAs QD 为探测元件的 1 550 nm 近红外波段光斑位置检测系统。

3.1 实验平台搭建

图 6(a)为实验系统框图,图(b)为实物图。该实验系统选用长春新产业光电技术有限公司生产的 1 550 nm 光纤半导体激光器(MDL-1550),光功率连续可调,激光器发出高斯光束经准直、整形透镜组变成平行光,再经耦合透镜聚焦,QD 处在耦合透镜焦点前,调整物距大小可改变入射到 QD 上光斑半径的大小。InGaAs QD 选用 OSI 公司生产的 FCI-Q300,光敏面直径为 3 mm,沟道宽度为 0.045 mm,将 QD 安装在 PI 公司生产的一维纳米精密微位移

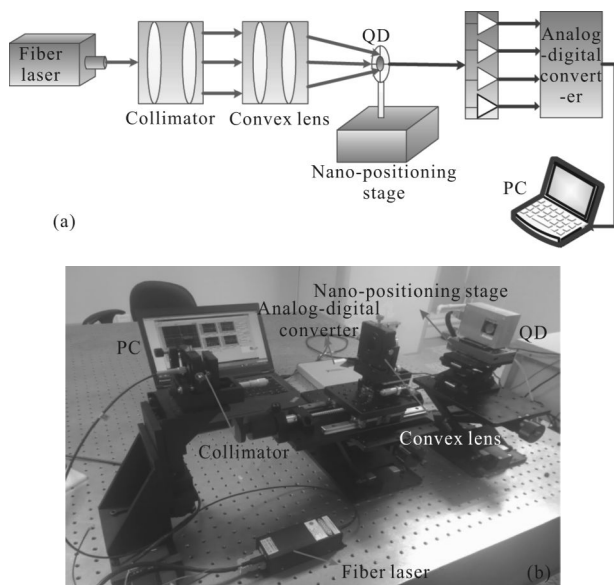


图 6 (a)实验系统框图;(b)实验系统实物图

Fig.6 (a)Schematic diagram of the system(b)Realy experimental system

平台(N-644.3A)上,重复定位精度 $2\times 10^{-6}\text{ mm}$,来实现 X 方向上的精密移动;采集卡为 NI 公司的 4 通道 16 位高精度 AD 采集板卡(USB-6356),每个通道都有独立的 AD 芯片,保证了采集数据的一致性和实时性;在 PC 机上,采用 LabVIEW 编写的软件采集数据。

3.2 结果与分析

3.2.1 光斑半径 $\omega=0.75\text{ mm}$ 时,新旧模型误差对比

调节激光器,输出功率约为 $10\mu\text{W}$,再通过调节透镜与探测器之间的距离使光斑半径 ω 调整到 0.75 mm,控制一维纳米微位移平台延 X 轴方向从 $(-0.75\text{ mm}, 0)$ 以速度 0.001 mm/s 开始移动,移至 $(+0.75\text{ mm}, 0)$ 处。设置 AD 采集卡采样速率为 1 kHz,分别采集下每个象限输出的电压值,利用公式(2)计算每个点的解算偏差值 σ_x ,再由公式(9)和公式(14)分别计算估算出两种解算模型下的光斑位置 x_{01i} 和 x_{02i} ,同时笔者视一维纳米平台的移动值为理论光斑位置值 x_i 。分别利用原积分无穷模型和改进后的新解算模型求解各点的误差值计 δ_{1i} 和 δ_{2i} ,绘制误差图,如图 7 所示。

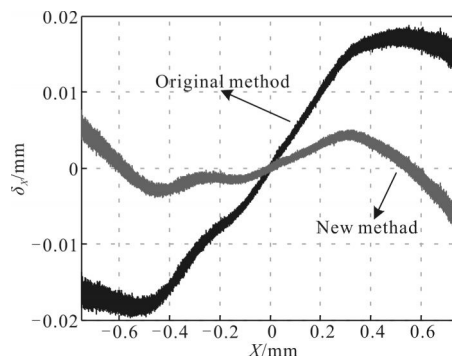


图 7 入射光斑半径为 0.75 mm,新解算模型与原模型位置误差对比实验曲线

Fig.7 Experiment curves for comparison of position error the original model and the new model when radius is 0.75 mm

对比图 5 和图 7,可以看出改进后的新模型在各个坐标点都有效的降低了误差,且和仿真分析的结果符合的较好。

实验中原模型解算最大误差 δ_{MAX} 约 0.019 mm,改进后模型解算的最大误差 δ_{MAX} 为 0.009 mm,最大误差降低 52.6%,原模型解算均方根误差 δ_{RMSE} 为 0.014 mm,新模型解算均方根误差 δ_{RMSE} 为 0.003 mm,均方根误差降低 78.6%。对于实验误差

结果比仿真误差稍大,且误差曲线有凹凸不平的现象,这是由于在实验过程中总会存在平台的振动、光源能量分布的不稳定性和以及光噪声和电路噪声的影响。

3.2.2 不同光斑半径下,新旧模型误差对比

探测范围仍为 $[-0.75\sim 0.75\text{ mm}]$,改变入射光斑半径重复上述实验,图 8 为光斑半径从 0.5~1.15 mm 之间,采用原有传统模型和改进后新模型的均方根误差对比图。从图中可以看出传统模型呈现“凹”型,在半径为 1 mm 附近处与新模型差距较小,而其他半径新模型都远小于原有模型,且新模型在各光斑半径下的均方根误差差异不大,仿真值都在都 0.004 mm 以下,实验值在 0.004 5 mm 以下。

表 1 在探测范围为 $[-0.75\sim 0.75\text{ mm}]$,不同光斑半径的条件下,两种解算模型的最大误差进行了对比,与均方根误差的讨论相似,原有模型在光斑半径为 0.95 mm 附近会取得较小的误差,而改进后的模型在不同的光斑半径都有较小的最大误差。新模

型在不同的光斑半径条件下,最大误差仿真结果都在 0.007 mm 左右,实验结果在 0.009 mm 左右。

通过以上讨论发现,文中所提出的改进模型无论从均方根误差还是最大误差都表现出具有更好的精度,且不同的入射光斑半径,新模型对于光斑位置检测表现出更稳定的定位精度。

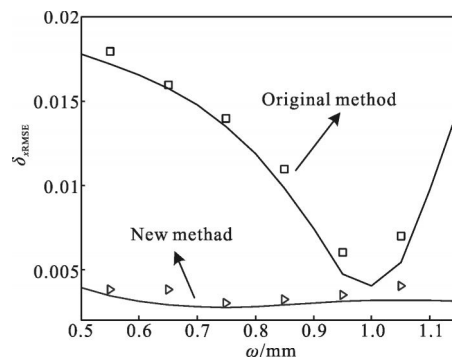


图 8 不同光斑半径条件下新解算模型与原模型均方根位置误差对比

Fig.8 Comparison of mean-root-square position error the original model and the new model for different radii

表 1 不同光斑半径条件下,新解算模型与原模型最大位置误差对比

Tab.1 Comparison of maximum position error the original model and the new model for different radii

ω/mm	ω_e/mm	δ_{MAX} of the original model/mm		δ_{MAX} of the new model/mm		Decrease percentage of δ_{MAX}	
		Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment
0.550	0.530	0.022	0.024	0.007	0.009	68.2%	62.5%
0.650	0.628	0.021	0.023	0.006	0.010	71.4%	56.5%
0.750	0.728	0.017	0.019	0.006	0.010	64.7%	47.4%
0.850	0.832	0.013	0.014	0.007	0.009	46.2%	35.7%
0.950	0.942	0.008	0.010	0.007	0.008	12.5%	20.0%
1.050	1.061	0.016	0.017	0.008	0.010	50.0%	41.2%

4 结 论

文中针对高斯光斑模型,在原有积分无穷模型的基础上,补偿了探测器直径和沟道对光斑位置检测的影响,得到了改进的新解算模型。在已搭建的以 InGaAs 四象限探测器(Quadrant Detector, QD)探测元件的光斑位置检测系统进行了实验验证。通过仿真和实验分析,文中所提的新模型对于不同的入射光斑半径,在一定的探测范围内均方根误差和最大误差变化不大,都具有较高的精度,较原有模型都有不同程度的提高,因此新模型可有效提高 1 550 mm 近红外波段激光光斑位置的探测精度,且对于其他类

型的四象限探测器,文中所提模型方法同样适用。

参考文献:

[1] Leonid G, Kazovsky. Theory of tracking accuracy of laser systems[J]. *Opt Eng*, 1983, (22): 339-347.

[2] Feng Longling, Deng Renliang. Study on optical tracking with Four-quadrant detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1996, 25(1): 16-21. (in Chinese)
冯龙龄, 邓仁亮. 四象限光电跟踪技术中若干问题探讨 [J]. *红外与激光工程*, 1996, 25(1): 16-21.

[3] Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin. Study four-quadrant detector in the free space laser communication [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2009, 36(8): 2030-2034. (in Chinese)

- 韩成, 白宝兴, 杨华民. 自由空间激光通信四象限探测器性能研究[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 2030–2034.
- [4] 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. (in Chinese)
- 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.
- [5] Zhang Weifeng, Zhang Ruolan, Zhao Lusheng, et al. Development progress of InGaAs short-wave infrared focal plane arrays[J]. *Infraed Technology*, 2012, 6(34): 361–365. (in Chinese)
- 张卫峰, 张若岚, 赵鲁生, 等. InGaAs 短波红外探测器研究进展[J]. 红外技术, 2012, 6(34):361–365.
- [6] Gong Haimei, Liu Dafu. Developments and trends in spaceborne infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 18–24. (in Chinese)
- 龚海梅, 刘大福. 航天红外探测器的发展现状与发展[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 18–24.
- [7] Zhang Lei, Zhang Guoyu, Liu Yunqing. Affecting factor dor detection accuracy of four-quadrant detector [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(6): 0605007. (in Chinese)
- 张雷, 张国玉, 刘云清. 影响四象限探测器精度的因素[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0605007.
- [8] Lin Zhiqi, Li Huijie, Lang Yonghui, et al. Obtaining spot parameters by quadrant photodetectors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(4): 764–770. (in Chinese)
- 林志琦, 李会杰, 郎永辉, 等. 用四象限光电探测器获得光斑参数[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4): 764–770.
- [9] Zhao Xin, Tong Shoufeng, Jiang Huilin. Experimental testing on characteristics of four quadrant detector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(10): 2164–2170. (in Chinese)
- 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.
- [10] 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)
- 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.
- [11] Mu Yining, Wang He, Li Ping, et al. Spot size on optical axis detection of constraint analysis and verification tests[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1061–1067. (in Chinese)
- 母一宁, 王贺, 李平, 等. 光斑尺寸对光轴检测的约束分析及验证试验[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 1061–1067.
- [12] Fan Shipeng, Lin Defu, Lu Yulong, et al. Design and achievement of hardware-in-the-loop simulation system for guided shell based on laser semi-active seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 394–397. (in Chinese)
- 范世鹏, 林德福, 路宇龙, 等. 激光制导武器半实物仿真系统的设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 394–397.
- [13] Wei Fenglin, Mu Yining, Shang Ruirui, et al. Method for optical alignment based on principle of maximum entropy of four-quadrant detector sequence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1902–1906. (in Chinese)
- 魏枫林, 母一宁, 尚瑞瑞, 等. 基于四象序列的最大熵原则的光轴对准方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1902–1906.
- [14] Yohannes, Tuck War Ng, Adrian Neild, et al. Intensity influence on Gaussian beam laser based measurements using quadrant photodiodes[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(19): 3669–3675.
- [15] Song Cui, Yeng Chai Soh. Improved measurement accuracy of the quadrant detector through improvement of linearity index[J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 96: 0811020.
- [16] Huang Lu, Guo Honglian, Qu E, et al. Method for displacement calibration of four-quadrant photodetector in optical tweezers system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1004001. (in Chinese)
- 黄璐, 郭红莲, 屈娥, 等. 四象限探测器位移测量的标定方法[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1004001.
- [17] Ma Xiaoyu, Rao Changhui, Wei Kai, et al. Error analysis of the de-crosstalk algorithm for the multianode-PMT-based quadrant tracking sensor [J]. *Opt Express*, 2012, 20: 29185–29195.
- [18] Yang Guishuan, Zhang Zhifeng, Zhai Yusheng, et al. Study on influence of dead zone on detection range and sensitivity four-quadrant detector[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 062303. (in Chinese)
- 杨桂栓, 张志峰, 翟玉生, 等. 死区对四象限探测器探测范围和灵敏度影响的研究 [J]. 激光与光电子进展, 2013, 50(6): 062303.