

死区对四象限跟踪传感器跟踪精度的影响

马晓燊^{1)2)†} 母杰¹⁾²⁾³⁾ 饶长辉¹⁾²⁾

1) (中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

2) (中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

3) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2010 年 12 月 16 日收到; 2011 年 8 月 8 日收到修改稿)

介绍了四象限跟踪传感器原理后, 分析了存在噪声和死区条件下的四象限探测器的光斑能量探测率、质心探测误差和光斑位移敏感度, 推导了此时四象限跟踪传感器跟踪误差的理论公式, 并通过实验证明了理论分析的正确性. 理论分析和实验的结果都表明, 在相同的噪声情况下, 质心探测误差和位移敏感度都随着光斑的高斯宽度与死区宽度之比减小而增大, 但是位移敏感度增大的趋势要小于质心探测误差增大的趋势, 它们共同作用的结果就导致了光斑的高斯宽度与死区宽度之比越大, 四象限跟踪探测器的跟踪误差越小.

关键词: 光学工程, 跟踪传感器, 四象限探测器, 噪声分析

PACS: 29.40.Gx, 06.60.Sx, 42.15.Eq

1 引言

在对点源目标的跟踪系统中, 通常会在成像透镜焦平面处放置四象限探测器探测焦面光斑质心的移动从而动态地解算出入射波前的倾斜量^[1-5], 成像透镜和四象限探测器就构成了四象限跟踪传感器. 信号光光子噪声、背景光和探测器本身热噪声使得四象限跟踪传感器存在着跟踪误差; 而四象限探测器在制造过程中, 需要对光电探测器的光敏面进行象限分割, 因此象限间不可避免地存在着死区, 当跟踪系统用于天文观测或星-地通信等领域时, 由于望远镜口径处接收到的光能大部分需要用于成像系统, 所以跟踪传感器大都工作在光子计数模式下^[6], 此时死区对焦面光斑形状的改变和能量的遮挡会影响到四象限探测器的灵敏度和探测精度. 增大焦面光斑的高斯宽度可以减少死区的影响, 但焦面光斑的高斯宽度与跟踪传感器的动态范围成反比关系, 为了保证跟踪传感器的动态范围, 焦面光斑的高斯宽度不能无限制地增加, 所以, 详细地讨论死区对四象限跟踪传感器跟踪精度的影响是十分必要的.

在文献[7]中, 作者深入地讨论了四象限跟踪传感器对不同尺度目标的跟踪误差, 但是没有加入死区对该类传感器精度的影响, 然而当目标退化

点源时, 死区的影响是不可忽略的; 在文献[8]中, 作者分析了光子计数型四象限跟踪传感器的开环和闭环误差, 但是在提到死区的问题时, 仅指出了死区对四象限探测器的探测曲线的影响, 没有深入地分析死区对跟踪传感器整体性能的影响; 而在文献[9]中, 作者仅讨论了四象限探测器的精度受限情况, 没有将四象限探测器和成像透镜看作一个整体来讨论跟踪传感器的跟踪精度问题. 为了完整地讨论死区对四象限跟踪传感器跟踪精度的影响, 本文首先介绍了四象限跟踪传感器的原理, 在详细分析了噪声和死区对四象限探测器性能的影响后, 引入了死区对四象限跟踪传感器性能的影响, 最后, 利用一系列实验证实了理论推导的正确性, 为四象限跟踪传感器的设计或使用提供了理论支持.

2 基于四象限探测器的波前跟踪传感器的原理

如图 1 所示, 四象限跟踪传感器的工作原理是: 四象限探测器的光敏面放置在成像透镜的焦面处, 目标波前经成像透镜汇集后在焦面上形成焦面光斑, 当入射波前倾斜角改变时, 焦面光斑会在成像透镜的焦平面上移动, 从而改变了四个光敏面上四个象限的光能量分布, 根据四象限探测器四个

† E-mail: maxiaoyu001@126.com

象限输出的光电子数, 利用质心计算公式, 可以计算出目标光斑质心偏移的方向, 从而解算出入射波前的倾斜方向.

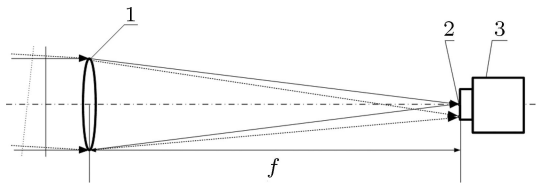


图1 四象限跟踪传感器的原理图 (1 为成像透镜; 2 为四象限探测器; 3 为焦面光斑)

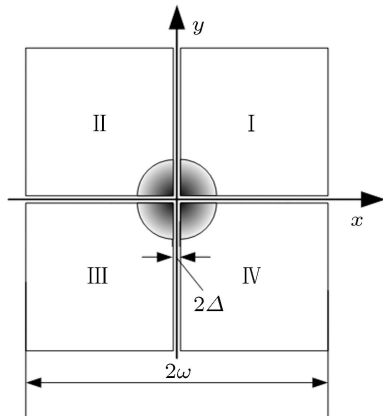


图2 光斑质心探测

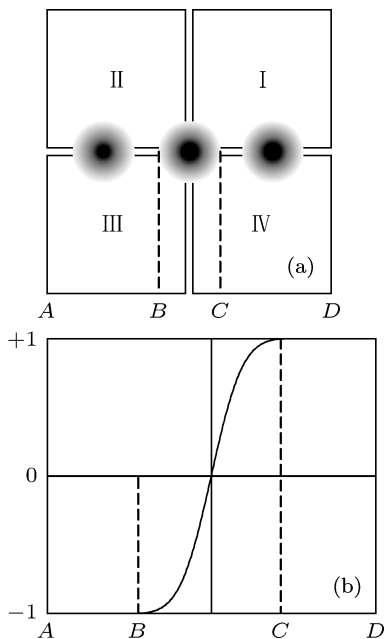


图3 质心探测中的线性区域和非线性区域

四象限探测器光敏面上光斑的质心 (x_c, y_c) 计算公式为

$$x_c = \frac{(N_1 + N_4) - (N_2 + N_3)}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4},$$

$$y_c = \frac{(N_1 + N_2) - (N_3 + N_4)}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4}, \quad (1)$$

其中, N_i 表示四象限探测器的第 i 象限输出的光子个数.

由 (1) 式计算得到的光斑质心位置 x_c 和 y_c 是一个无量纲的数, 并且由于四象限探测器仅在四个区域内对光斑的能量分布进行采样, 所以当光斑在四象限探测器的光敏面内移动时, x_c 和 y_c 的取值范围是 $[-1, +1]$. 在实际应用中, 一般会将 x_c 和 y_c 分为线性区域和非线性区域: 在线性区域内, x_c 和 y_c 的大小单调对应于光斑质心偏移的位移量; 在非线性区域, x_c 和 y_c 为 $+1$ 或 -1 对应于光斑质心偏移的方向.

由于计算得到的光斑质心位置 x_c 和 y_c 是一个无量纲的数, 所以需要定义一个位移系数 k_c , 当 x_c 和 y_c 处于线性区域内时, 利用 k_c 将计算得到的光斑质心位置 (x_c, y_c) 还原为光斑的真实质心位置 (x_0, y_0) , 此时, 入射波前在 x, y 两个方向上的倾斜角 α_x 和 α_y 的计算公式为 (α_x 和 α_y 都很小)

$$\alpha_x = \arctan\left(\frac{x_0}{f}\right) = \frac{k_c \cdot x_c}{f},$$

$$\alpha_y = \arctan\left(\frac{y_0}{f_e}\right) = \frac{k_c \cdot y_c}{f}, \quad (2)$$

其中, f 是跟踪传感器的有效焦距.

3 四象限探测器的性能分析

由于跟踪传感器的光路在 x 方向上和 y 方向上是对称的, 所以以下讨论都集中在 x 方向, y 方向上的情况与此相似.

通常情况下, 四象限探测器光敏面处光斑的光强呈高斯分布, 其分布函数如下:

$$I(x, y) = \frac{N_s}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\left(\frac{x-x_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2 - \left(\frac{y-y_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right], \quad (3)$$

其中, N_s 是到达四象限探测器光敏面的总光子数; σ 是光斑的高斯宽度; (x_0, y_0) 是光斑的质心位置坐标.

四象限探测器的光敏面上衍射光斑的高斯宽度 σ 的计算公式为

$$\sigma = \eta \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot f_e, \quad (4)$$

其中, η 是一个常数, 圆孔衍射时值为 0.431、方孔衍射时值为 0.353; d 是成像透镜入射光瞳的尺寸; λ 是入射波前的波长.

如图 2 所示, 当光斑的质心位置为 (x_0, y_0) , 并且四象限探测器单个象限的宽度为 ω 、单个象限上死区的宽度为 Δ 时, 各象限输出的光电子数为

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{E \cdot N_s}{4} (\omega_{x-} - \Delta_{x-}) (\omega_{y-} - \Delta_{y-}), \\ N_2 &= \frac{E \cdot N_s}{4} (\omega_{x+} - \Delta_{x+}) (\omega_{y-} - \Delta_{y-}), \\ N_3 &= \frac{E \cdot N_s}{4} (\omega_{x+} - \Delta_{x+}) (\omega_{y+} - \Delta_{y+}), \\ N_4 &= \frac{E \cdot N_s}{4} (\omega_{x-} - \Delta_{x-}) (\omega_{y+} - \Delta_{y+}), \end{aligned} \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} \omega_{x-} &= \text{erf}\left(\frac{\omega - x_0}{\sqrt{2}\sigma}\right), & \omega_{x+} &= \text{erf}\left(\frac{\omega + x_0}{\sqrt{2}\sigma}\right), \\ \omega_{y-} &= \text{erf}\left(\frac{\omega - y_0}{\sqrt{2}\sigma}\right), & \omega_{y+} &= \text{erf}\left(\frac{\omega + y_0}{\sqrt{2}\sigma}\right), \\ \Delta_{x-} &= \text{erf}\left(\frac{\Delta - x_0}{\sqrt{2}\sigma}\right), & \Delta_{x+} &= \text{erf}\left(\frac{\Delta + x_0}{\sqrt{2}\sigma}\right), \\ \Delta_{y-} &= \text{erf}\left(\frac{\Delta - y_0}{\sqrt{2}\sigma}\right), & \Delta_{y+} &= \text{erf}\left(\frac{\Delta + y_0}{\sqrt{2}\sigma}\right); \end{aligned}$$

E 是四象限探测器的量子效率; $\text{erf}(\varepsilon)$ 是误差累计函数: $\text{erf}(\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\varepsilon e^{-t^2} dt$.

3.1 四象限探测器的高斯光斑能量探测率

定义四象限探测器的高斯光斑能量探测率 ς , 为四象限探测器能够探测得到的光电子数与到达光子数之比, 即

$$\varsigma = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^4 N_i. \quad (6)$$

将 (5) 式代入 (6) 式, 得

$$\begin{aligned} \varsigma &= \frac{E}{4} (\omega_{x-} + \omega_{x+} - \Delta_{x-} - \Delta_{x+}) \\ &\quad \times (\omega_{y-} + \omega_{y+} - \Delta_{y-} - \Delta_{y+}). \end{aligned} \quad (7)$$

由 (7) 式可得, 四象限探测器的光斑能量探测率与器件的量子效率、光斑所在位置、光斑高斯宽度、光敏面尺寸和死区尺寸有关. 显然, 当光斑的质心处于原点时, ς 最小, 并且由于 $\text{erf}(3/\sqrt{2}) = 0.9973$, 所以当四象限探测器单个象限的宽度大于 3 倍光斑的高斯宽度时, 有

$$\varsigma_0 = E \cdot \left[1 - \text{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}\Gamma}\right) \right]^2, \quad (8)$$

其中, $\varsigma_0 = \varsigma|_{\omega > 3\sigma, x_0=0, y_0=0}$; $\Gamma = \frac{\sigma}{2 \cdot \Delta}$, 即光斑的

高斯宽度与死区宽度之比.

显然, 四象限探测器的死区会降低四象限探测器对光斑的能量探测率, 当光斑的质心位于原点, 并且四象限探测器单个象限的宽度大于 3 倍光斑的高斯宽度时, 光斑的高斯宽度与死区宽度之比越大, 四象限探测器的高斯光斑能量探测率越大, 如图 4 所示.

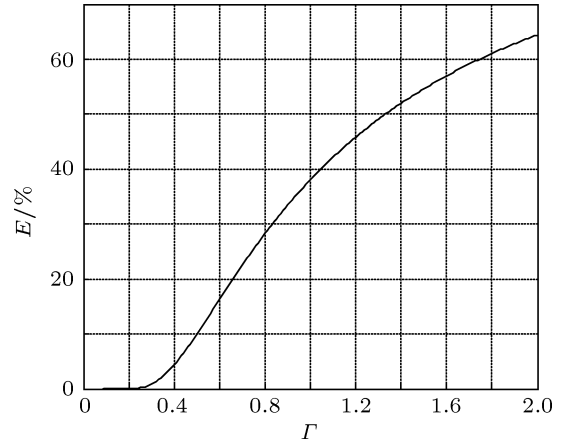


图 4 光斑处于原点时的能量探测率

3.2 四象限探测器对高斯光斑的质心探测误差

影响四象限探测器光斑质心探测精度的噪声主要有信号光的光子噪声、背景光噪声以及探测器的热噪声, 每个象限输出的信号光电子数的均值由 (5) 式决定. 根据文献 [8] 中的推导, 可得存在噪声时四象限探测器的光斑质心表达式为

$$x_{nc} = \frac{\varsigma \cdot N_s}{\varsigma \cdot N_s + n} \cdot x_c + \frac{n}{\varsigma \cdot N_s + n} \cdot x_n, \quad (9)$$

其中, n 是四象限探测器输出的背景光噪声和热噪声的电子数之和; x_n 是背景光噪声和热噪声的质心.

文献 [10, 11] 详细地分析了基于 CCD 相机的点源目标的质心探测误差, 噪声的均值会导致质心探测的偏移误差, 而噪声的随机起伏会导致质心探测的抖动误差. 四象限探测器的质心探测误差与此相类似的存在着偏移和抖动两种误差. 由于四象限探测器的象限的一致性, 并且背景光是均匀照射的, 所以每个象限输出的背景光噪声和热噪声的电子数之和的均值相等, 即 $x_n = 0$, 所以偏移误差为

$$\sigma_d = \frac{n}{\varsigma \cdot N_s + n} \cdot x_c. \quad (10)$$

抖动误差为

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{\varsigma \cdot N_s}{(\varsigma \cdot N_s + n)^2} \cdot (1 - x_c^2) + \frac{n}{(\varsigma \cdot N_s + n)^2}}. \quad (11)$$

四象限探测器的光斑质心探测误差为

$$\sigma_{x_{nc}} = \sqrt{\frac{\varsigma \cdot N_s}{(\varsigma \cdot N_s + n)^2} (1 - x_c^2) + \frac{n}{(\varsigma \cdot N_s + n)^2} (1 + n \cdot x_c^2)}. \quad (12)$$

(12) 式表明, 四象限探测器对光斑质心的探测误差与光斑质心的理论计算值 x_c 、信号光子数 N_s 、光斑能量探测率 ς 和噪声光电子数 n 相关.

当光斑的质心处于原点, 并且背景光噪声和四象限探测器的热噪声被抑制得足够小时, 四象限探测器的光斑质心探测误差为

$$\sigma_{x_{nc}}|_{x_c=0} = \frac{1}{\sqrt{\varsigma \cdot N_s}}. \quad (13)$$

由 (13) 式可得, 死区对光斑质心探测精度的影响体现在对光斑能量探测率的影响上, 死区对质心探测的误差影响因子为

$$\kappa_{\sigma_x} = \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2\sqrt{2}\Gamma} \right) \right]^{-1}. \quad (14)$$

如图 5 所示, 当光斑的质心处于原点时, 在相同情况下, 死区越大, 质心的探测误差也越大; 而图 6 表明, 光斑高斯宽度与死区宽度之比越大, 死区对质心探测误差的影响因子越小, 这是因为四象限探测器的高斯光斑能量探测率随着光斑的高斯宽度与死区宽度之比的增大而增大 (如图 4 所示), 从而增大了系统的信噪比, 减小了质心的探测误差.

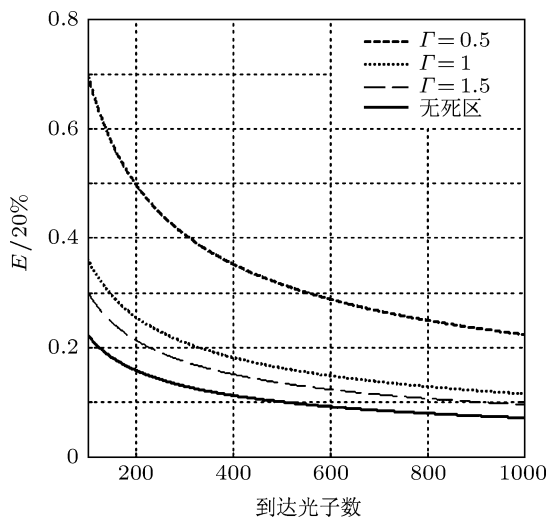


图 5 质心探测误差与到达光子数的关系

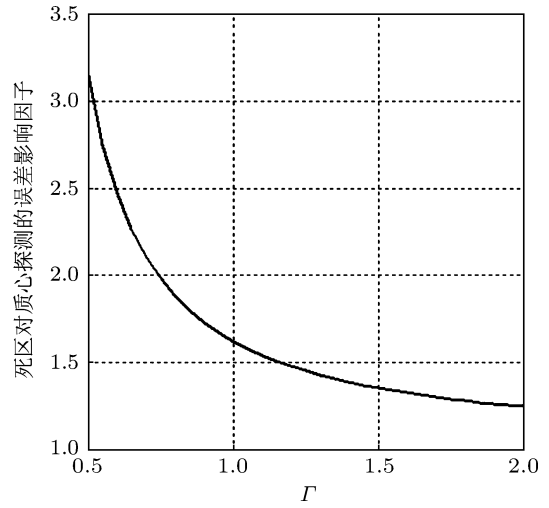


图 6 死区对质心探测误差的影响因子

3.3 四象限探测器的光斑位移敏感度

将 (4) 式代入 (1) 式可得

$$x_c = \frac{(\omega_{x-} - \Delta_{x-}) - (\omega_{x+} - \Delta_{x+})}{(\omega_{x-} - \Delta_{x-}) + (\omega_{x+} - \Delta_{x+})}. \quad (15)$$

定义四象限探测器的光斑位移敏感度 ρ_x 为计算得到的光斑质心位置 x_c 对光斑真实质心位置 x_d 的偏导, 它表示光斑的真实质心位置在不同位置发生微小移动时, 计算得到的光斑质心位置的变化趋势, 即

$$\rho_x = \partial x_c / \partial x_0. \quad (16)$$

由 (14) 式和 (15) 式可得

$$\rho_x = \frac{(C_a - C_b) \cdot (C'_a + C'_b) - (C_a + C_b) \cdot (C'_a - C'_b)}{(C_a + C_b)^2}, \quad (17)$$

其中

$$C_a = \omega_{x-} - \Delta_{x-}, C_b = \omega_{x+} - \Delta_{x+},$$

$$C'_a = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\sigma} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\omega - x_0}{\sqrt{2}\sigma} \right)^2 \right] - \exp \left[- \left(\frac{\Delta - x_0}{\sqrt{2}\sigma} \right)^2 \right],$$

$$C'_b = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\sigma} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\Delta + x_0}{\sqrt{2}\sigma} \right)^2 \right] - \exp \left[- \left(\frac{\omega + x_0}{\sqrt{2}\sigma} \right)^2 \right].$$

在实际应用中, 计算得到的光斑质心位置还会受到噪声的影响, 根据 (9) 式可得受噪声影响的光斑质心位移敏感度为

$$\rho_{x_n} = \frac{\varsigma \cdot N_s}{\varsigma \cdot N_s + n} \cdot \rho_x. \quad (18)$$

当光斑的质心处于原点, 并且背景光噪声和四象限探测器的热噪声被抑制得足够小时, 四象限探测器的光斑位移敏感度为

$$\rho_x|_{x_0=0} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\sigma} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}\right) - \exp\left(-\frac{\omega^2}{2\sigma^2}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{\omega}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\Delta}{\sqrt{2}\sigma}\right)}. \quad (19)$$

当不存在死区时, 通常取 $\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\sigma}$ 作为四象限探测器的位移敏感度, 所以, 死区位移敏感度的影响因子为

$$\kappa_{\rho_x} = \left[\exp\left(-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}\right) - \exp\left(-\frac{\omega^2}{2\sigma^2}\right) \right] \times \left[\operatorname{erf}\left(\frac{\omega}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\Delta}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right]^{-1}. \quad (20)$$

由于 $\exp(-9/2) = 0.011$, $\operatorname{erf}(3/\sqrt{2}) = 0.9973$, 所以当四象限探测器单个象限的宽度大于 3 倍光斑的高斯宽度时, 有

$$\kappa_{\rho_x} = \exp\left[-\left(\frac{1}{2\sqrt{2}\Gamma}\right)^2\right] \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}\Gamma}\right)\right]^{-1}. \quad (21)$$

如图 7 所示, 当死区的宽度一定时, 光斑高斯宽度越小, 四象限探测器的位移敏感度越高; 而图 8 表明, 死区对位移敏感度的影响因子随着光斑高斯宽度与死区宽度之比的增加而减小。

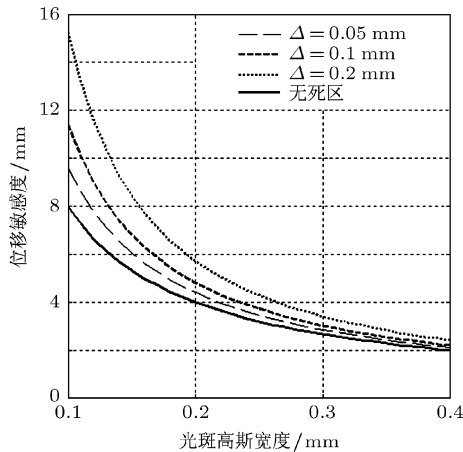


图 7 位移敏感性与光斑高斯宽度的关系

4 四象限跟踪传感器的跟踪误差

由 (2) 式可得, 四象限跟踪传感器的跟踪误差与四象限探测器对光斑质心探测误差的关系为

$$\sigma_{\alpha_x} = \frac{k_c}{f} \cdot \sigma_{x_c}. \quad (22)$$

由于跟踪系统的闭环带宽会远大于入射波前的倾斜扰动频率, 所以跟踪系统会在很短的时间内, 将入射波前的倾斜角校正到跟踪探测器的线性区域内, 最后稳定地跟踪目标. 因此, 四象限跟踪传感器的跟踪误差可以定义为: 当入射波前的倾斜角为 0 (光斑的质心位于四象限探测器的原点) 时, 四象限跟踪传感器的跟踪误差。

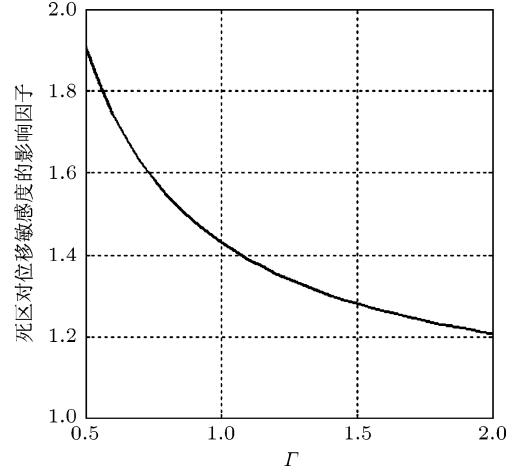


图 8 死区对位移敏感度的影响因子

当光斑的质心只在四象限探测器的原点附近做微小的移动时, 位移系数 $k_c|_{x_c=0}$ 可以由位移敏感度 $\rho_{x_n}^{-1}|_{x_0=0}$ 代替, 所以当背景光噪声和四象限探测器的热噪声被抑制得足够小时, 四象限跟踪传感器的跟踪误差为

$$\sigma_{\alpha_x}|_{\alpha_x=0} = \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2\zeta} \cdot N_s} \cdot \frac{\sigma}{f} \cdot \exp^{-1} \left[-\left(\frac{1}{2\sqrt{2}\Gamma}\right)^2 \right] \times \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}\Gamma}\right) \right]. \quad (23)$$

对 (23) 式化简, 可得四象限跟踪传感器的跟踪误差为

$$\sigma_{\alpha_x}|_{\alpha_x=0} = \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot E \cdot N_s}} \cdot \frac{\eta \cdot \lambda}{d} \cdot \exp^{-1} \left[-\left(\frac{1}{2\sqrt{2}\Gamma}\right)^2 \right]. \quad (24)$$

因此, 死区对跟踪传感器的误差影响因子为

$$\kappa_{\sigma_{\alpha_x}} = \exp^{-1} \left[-\left(\frac{1}{2\sqrt{2}\Gamma}\right)^2 \right]. \quad (25)$$

根据图 9 可得, 当到达光子数一定时, 在相同情况下, 死区宽度越小, 四象限跟踪传感器对点源目标的跟踪精度越高; 而图 10 表明, 光斑高斯宽度与死区宽度之比越大, 死区对质心探测误差的影响因子越小. 再将图 10 和图 6 比较可得, 当光斑的高斯宽度与死区宽度之比相同时, 死区对跟踪误差的

影响因子小于死区对质心探测误差的影响因子, 这是因为死区对跟踪误差的影响是死区对质心探测误差的影响和死区对位移敏感度的影响同时作用的结果. 质心探测误差和位移敏感度都随着光斑的高斯宽度与死区宽度之比减小而增大, 然而, 位移敏感度的增大的趋势要小于质心探测误差增大的趋势, 所以, 总体来说, 当其他条件不变时, 光斑的高斯宽度与死区宽度之比越小, 四象限跟踪探测器的跟踪误差越大.

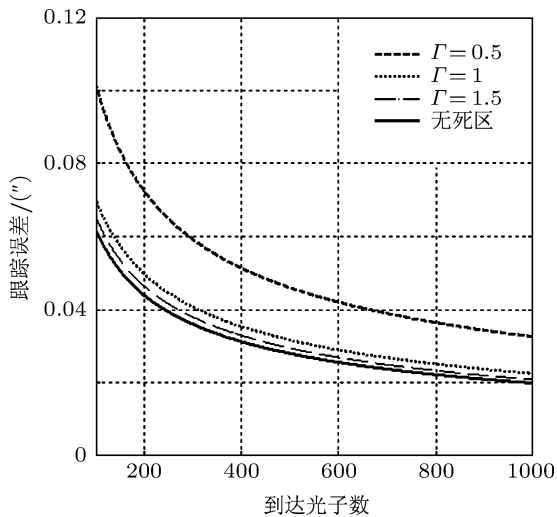


图 9 跟踪误差与到达光子数的关系 $E = 20\%$, $\lambda = 500\text{nm}$, $d = 200\text{mm}$, $\eta = 0.431$

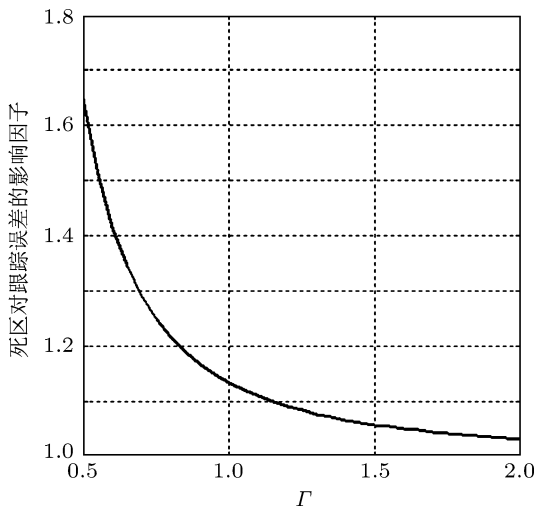


图 10 死区对位移敏感度的影响因子

5 实验

实验中采用的四象限探测器是 2×2 的多阳极光电倍增管, 每个阳极可以单独输出光 - 电脉冲信号, 并且具有高增益和低串扰的特性, 是一种比较理想的四象限探测器. 该多阳极光电倍增管的单个象限的宽度是 9mm , 死区宽度为 0.2mm .

实验框图如图 11 所示, 在暗室内, 激光器发出的光经可调衰减器和针孔挡板后形成点光源, 点光源发出的光经平行光管后形成平行光, 平行光经反射镜和倾斜镜反射后通过长焦透镜和匹配透镜后成汇聚光束, 汇聚光束再经 50/50 分光棱镜分光后分别在四象限探测器和光子计数器的光敏面上形成焦面光斑, 四象限探测器和光子计数器将接收到的光信号转换为电信号后经传输线传送到暗室外的计算机接收.

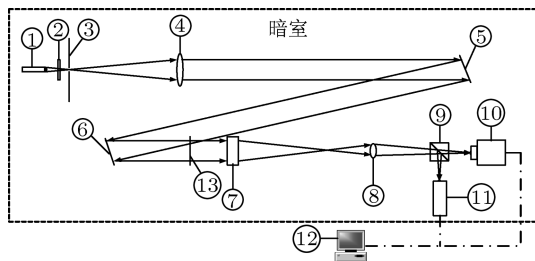


图 11 试验框图 (1 为激光器; 2 为可调衰减片; 3 为针孔挡板; 4 为平行光管; 5 为反射镜; 6 为倾斜镜; 7 为长焦透镜; 8 为匹配透镜; 9 为 50/50 分光棱镜; 10 为四象限探测器; 11 为光子计数器; 12 为计算机; 13 为入射波前)

在实验中, 改变匹配透镜的焦距以及与长焦透镜焦面的位置可以调整跟踪传感器的有效焦距, 从而改变四象限探测器上光斑的高斯宽度; 可调衰减器的作用是调整入射波前的光强, 从而改变到达四象限探测器处的光子数; 倾斜镜的作用是通过加电压来改变入射波前的倾斜角度, 从而改变四象限探测器处光斑的位置; 光子计数器的作用是监测到达四象限探测器光敏面处的光子数目, 当然, 在相同的入射光强下, 由于光子计数器和四象限探测器的量子效率不同, 两者计数的数值并不相等, 但是成线性关系, 通过标定后可以通过光子计数器的读数计算出四象限探测器输出光电子数的值, 以下各测量曲线中的光电子数目都是由光子计数器计数的结果反算得到的四象限探测器的光电子数.

图 12 表明, 当死区宽度一定时, 光斑的高斯宽度越小, 四象限探测器对光斑质心位置探测曲线越陡峭, 原点处的光斑位移敏感度越大; 图 13 表明, 当死区宽度一定时, 焦面光斑的高斯宽度越大, 四象限探测器的光斑能量探测率也越大; 图 14 表明, 当死区宽度一定, 并且光斑质心位于四象限探测器的原点时, 如果焦面光斑的高斯宽度相同, 则到达光子数越多, 四象限探测器的质心探测误差越小, 如果到达光子数相同, 则焦面光斑的高斯宽度越大, 四象限探测器质心探测误差越小; 图 15 表明, 跟踪探测器的跟踪误差随着与焦面光斑高斯宽度和死

区宽度之比的增大而减小. 从实验结果 (图 12 至图 15) 可以看出, 理论曲线与实验点符合得非常好, 由此证明了理论推导的正确性.

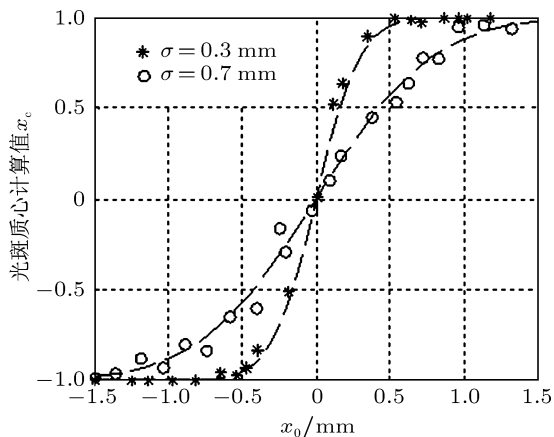


图 12 实验得到的光斑质心计算值与光斑质心位置的关系曲线 ($N = 123$ count, $\omega = 9$ mm, $\Delta = 0.1$ mm)

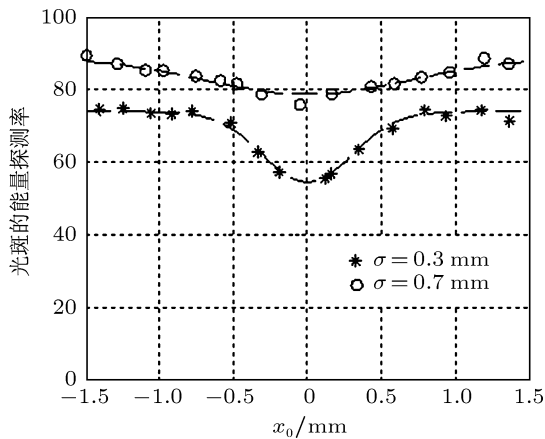


图 13 实验得到的光斑能量探测率的光斑质心位置的关系曲线 ($N = 206$ count, $\omega = 9$ mm, $\Delta = 0.1$ mm)

6 结论

当采用四象限探测器作为跟踪传感器的质心位移探测器件时, 四象限跟踪传感器的跟踪误差与四象限探测器的光斑能量探测率、质心探测误差和光斑位移敏感度有关. 死区对跟踪误差的影响是死区对质心探测误差的影响和死区对位移敏感度的影响同时作用的结果, 质心探测误差和位移敏感度都随着光斑的高斯宽度与死区宽度之比减小而增大, 但是位移敏感度的增大的趋势要小于质心探测误差增大的趋势, 所以, 总体来说, 当其他条件不

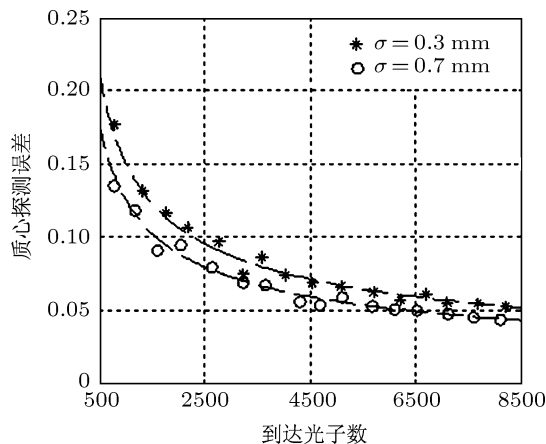


图 14 实验得到的质心探测误差与光电子数的关系曲线 (300 帧计算结果) ($\omega = 9$ mm, $\Delta = 0.1$ mm, $E = 8\%$, $x_0 = 0$, $y_0 = 0$)

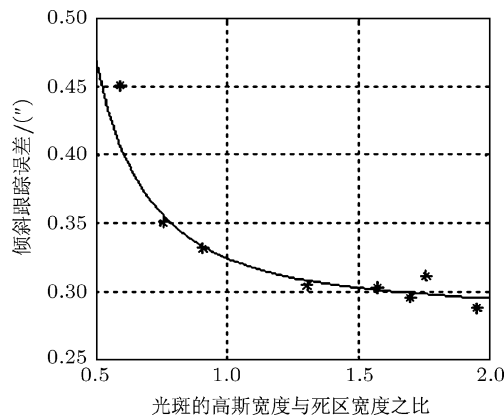


图 15 实验得到的质心探测误差与焦面光斑高斯宽度和死区宽度之比的关系曲线 (300 帧计算结果) ($d = 30$ mm, $N_s = 673$ count, $E = 8\%$, $x_0 = 0$, $y_0 = 0$)

变时, 光斑的高斯宽度与死区宽度之比越小, 四象限跟踪探测器的跟踪误差越大. 因此, 当死区一定时, 可以增大焦面光斑的高斯宽度来减小四象限跟踪传感器的跟踪误差; 然而四象限跟踪传感器的动态范围与焦面光斑的高斯宽度成反比; 所以四象限跟踪传感器的跟踪精度和动态范围存在着矛盾关系, 在实际设计或使用中需要根据需要做出适当的折衷, 找到四象限跟踪传感器最佳的有效焦距.

感谢光电技术研究所姜文汉院士对本文的建议和指导.

- [1] Rao C H, Zhang X J, Jiang W H, Tang G M, 2002 *Acta Optica Sinica* **22** 67 (in Chinese) [饶长辉, 张学军, 姜文汉, 汤国茂 2002 光学学报 **22** 67]
- [2] Manojlovic L M 2011 *Appl. Opt.* **50** 3461
- [3] Lee E J, Park Y, Kim C S, Kouh T 2010 *Curr. Appl. Phys.* **10** 834
- [4] Jiang W H, Li M Q, Tang G M 1995 *Opt. Engng.* **34** 15
- [5] Liu C X, Guo H L, Jiang Y Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1162 (in Chinese) [刘春香, 郭红莲, 降雨强 2005 物理学报 **54** 1162]
- [6] Rome M, Fleck H G, Hines D C 1964 *Appl. Opt.* **3** 691
- [7] Tyler G A, Fried D L 1982 *J. Opt. Soc. Am.* **72** 804
- [8] Zhu Y M, Li M Q, Tang G M, Jiang W H 1999 *Opt.-Elle. Eng.* **26** 1 (in Chinese) [朱雅茗, 李明全, 汤国茂, 姜文汉 1999 光电工程 **26** 1]
- [9] Han C, Bai B X, Yang H M, Dong S F, Jiang H L, Fan J T 2009 *Chinese Journal of Laser* **36** 2030 (in Chinese) [韩成, 白宝兴, 杨华民, 佟首峰, 姜会林, 范静涛 2009 中国激光 **36** 2030]
- [10] Ma X Y, Rao C H, Zheng H Q 2009 *Opt. Exp.* **17** 8525
- [11] Zhang Y Y, Rao C H, Li M, Ma X Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5905 (in Chinese) [张艳艳, 饶长辉, 李梅, 马晓燮 2010 物理学报 **59** 5905]

Error analysis of four-quadrant-based tracking sensor when dead zone is inevitable

Ma Xiao-Yu^{1)2)†} Mu Jie¹⁾²⁾³⁾ Rao Chang-Hui¹⁾²⁾

1) (The Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

2) (The Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

3) (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(Received 16 December 2010; revised manuscript received 8 August 2011)

Abstract

Based on the basic principle of four-quadrant-based tracking sensor, the energy detecting rate, centroid detecting error and the displacement sensitivity of four-quadrant detector caused by noise or dead zone are analyzed in detail. The tracking error formula of four-quadrant-based tracking sensor is put forward theoretically and verified experimentally. The results show that when the noises are constant, the tracking error of four-quadrant-based tracking sensor depends on the ration between the width of Gauss facula and the width of dead zone of four-quadrant detector.

Keywords: optical engineering, tracking sensor, four-quadrant detector, noise analysis

PACS: 29.40.Gx, 06.60.Sx, 42.15.Eq

† E-mail: maxiaoyu001@126.com