

脉冲激光四象限探测器测角不确定性统计分布

张伟 张合 陈勇 张祥金 徐孝彬

Angle measurement uncertainty statistical distribution of pulsed laser quadrant photodetector

Zhang Wei Zhang He Chen Yong Zhang Xiang-Jin Xu Xiao-Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 012901 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.012901

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.012901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二维格子神经网络的振动共振和非线性振动共振

Vibrational resonance and nonlinear vibrational resonance in square-lattice neural system

物理学报.2015, 64(11): 110501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.110501>

耦合系统的朗之万动力学产生法

The Langevin dynamics approach to generate solid interaction system

物理学报.2014, 63(17): 170502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.170502>

噪声环境下时滞耦合网络的广义投影滞后同步

Generalized projective lag synchronization between delay-coupled networks under circumstance noise

物理学报.2013, 62(24): 240502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.240502>

多阳极PMT的串扰对四象限倾斜跟踪传感器跟踪精度的影响

Error analysis of four-quadrant-based tracking sensor for inevitable crosstalk in multiple anode photomultiplier tube

物理学报.2012, 61(24): 242902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.242902>

死区对四象限跟踪传感器跟踪精度的影响

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

物理学报.2012, 61(7): 072903 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.072903>

脉冲激光四象限探测器测角不确定性统计分布*

张伟¹⁾ 张合^{1)†} 陈勇²⁾ 张祥金¹⁾ 徐孝彬¹⁾

1)(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

2)(南京工程学院工业中心, 南京 211167)

(2016年5月26日收到; 2016年9月28日收到修改稿)

针对噪声信号对脉冲激光四象限探测器(QPD)数字式测角算法产生的影响,分析了激光四象限探测器测角不确定性统计分布规律.建立了激光测角电路通道模型和QPD光敏面光斑模型,并根据随机噪声类型和理想信号类型,建立了单通道可测信号模型.考虑到QPD的对称性,对不同的理想信号时域分布类型、光斑总峰值功率、理想信号半峰宽度和等效噪声电压概率密度标准差等四种变量,在 $\theta \in [0, \pi/4]$ 的范围内通过蒙特卡罗仿真实验方法计算了五个不同光斑中心的QPD测角 α_y 值的统计分布规律.仿真结果表明:测角 α_y 值的统计分布呈正态分布,并被四种变量影响;特别是被单象限信噪比显著影响.光斑中心越靠近坐标轴中心,QPD测角精度越高;光斑中心不在坐标轴中心附近时QPD的测角 α_y 的统计分布均值都小于理想测角值.

关键词: 四象限探测器, 测角, 不确定性, 等效电压噪声

PACS: 29.40.Gx, 07.05.Kf, 05.40.Ca, 02.50.Ng

DOI: 10.7498/aps.66.012901

1 引言

激光四象限探测器(quadrant photodetector, QPD)作为一种位置敏感器件,具有高灵敏度、高精度、计算简便等优点,被广泛应用于激光制导武器、激光雷达、空间光通信等激光跟踪领域^[1-3].传统的QPD测量一般是采用模拟方法,但随着高速模数转换器件和处理器的的发展,QPD测量可以采用全数字方法来获得更高的动态特性和精度.在激光回波脉冲探测模式下,由于经过目标反射的激光回波信号受目标特性、大气传输等复杂因素的影响,到达QPD光敏面的激光脉冲信号会在幅值、脉宽和波形上产生变化^[4];同时,QPD自身和电路均存在随机噪声,主要包括散粒噪声和热噪声^[5]等.这些不确定性因素会对QPD的测角精度产生影响.

文献^[6, 7]对QPD位置检测精度的主要影响因素进行了研究,近似推导了噪声对QPD测角值

方差的理论值,但是其所用方法只讨论了激光信号的平均值,因此其结论只适用于连续激光信号,而不适用于脉冲激光信号,且也未考虑噪声引起测角值的变化.肖韶荣等^[8]研究了温度对光斑跟踪不确定度的影响,马晓燊等^[9]研究了串扰引起的QPD的测量误差,但均未从噪声角度进行研究.由于噪声等因素对QPD数字式测角的影响很大,需要对QPD测角的统计分布规律(包括测角均值、测角方差、分布类型等方面)进行研究,但目前还未见系统报道.

本文基于QPD归一化和差测角的算法,根据脉冲激光回波信号处理电路模型,通过建立由理想激光回波脉冲模型和随机噪声模型组成的可测信号模型,对不同的理想信号时域分布类型、光斑总峰值功率、理想信号半峰宽度和等效噪声电压概率密度标准差等四种影响QPD测角统计分布规律的因素变量进行分析,利用蒙特卡罗实验方法研究不同光斑中心的QPD测角的不确定性统计分布

* 武器装备预先研究项目(批准号: 51305020104)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hezhangz@njjust.edu.cn

规律.

2 系统原理及数学模型

2.1 QPD 测角原理

脉冲激光四象限探测器数字式测角的原理是利用激光目标指示器向待测目标发射一定频率的激光脉冲信号, 经过目标反射的激光回波信号被探测系统中的激光接收光学镜头俘获, 并在 QPD 光

敏面上形成半径为 r 的均匀分布光斑, 光斑中心位置为 (x_0, y_0) , QPD 的四个象限分别将所覆盖的激光能量转换成电流信号, 再经过跨阻放大器 (TIA) 和高速模数 (A/D) 转换进入处理器, 利用一定的算法计算探测系统中轴与探测系统-目标连线之间的夹角. 这一过程如图 1 (a) 所示, 激光回波信号在 QPD 光敏面形成光斑的示意图如图 1 (b) 所示, $o-xyz$ 为 QPD 光敏面坐标系, 在此坐标系内将光敏面划分为四个象限 A, B, C, D.

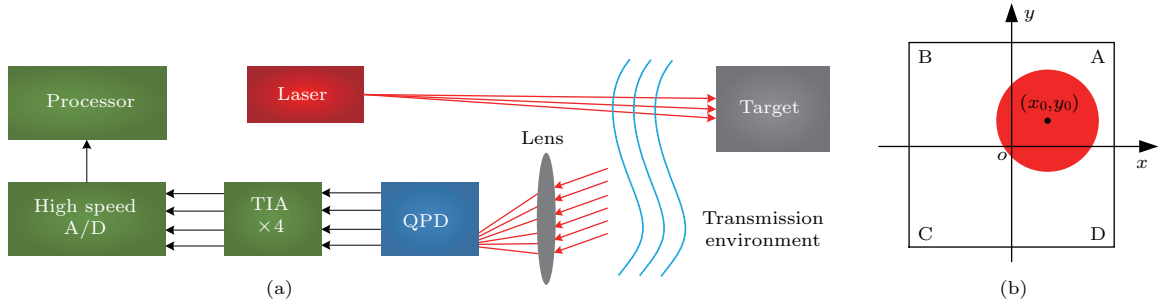


图 1 (网刊彩色) QPD 测角原理示意图 (a) 测角原理; (b) QPD 光敏面光斑示意图

Fig. 1. (color online) QPD angle measurement schematic: (a) Angle measurement principle; (b) spot on QPD photosensitive surface.

虽然不能直接利用四象限探测器获取精确的光斑中心坐标位置, 但是可以通过一定的算法得到光斑中心的估算值, 最常见的归一化和差算法如下式所示^[10]:

$$\begin{aligned} x_0 &\approx k\Delta x = k \frac{S_A + S_D - (S_B + S_C)}{S_A + S_B + S_C + S_D} \\ &= k \frac{P_A + P_D - (P_B + P_C)}{P_A + P_B + P_C + P_D}, \\ y_0 &\approx k\Delta y = k \frac{S_A + S_B - (S_C + S_D)}{S_A + S_B + S_C + S_D} \\ &= k \frac{P_A + P_B - (P_C + P_D)}{P_A + P_B + P_C + P_D}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, S_i , $i = A, B, C, D$ 分别表示 QPD 四个象限上被光斑覆盖的面积, P_i 分别表示 QPD 四个象限中光斑所占的激光脉冲峰值功率; Δx 和 Δy 表示归一化的光斑中心; k 是比例因子, 令正方形 QPD 光敏面的边长为 $2r_1$, 当光斑半径取最优时, 有 $r = r_1/2$ ^[7], 此时 $k = r$, 则 (1) 式有效的范围为 $\{x_0, y_0 \in [-r_1, r_1]\}$. 根据光斑中心位置坐标, 计算探测系统中轴与探测系统目标连线之间的夹角 α_x , α_y ^[7]:

$$\alpha_x = \arctan \frac{x_0}{f - \Delta z},$$

$$\alpha_y = \arctan \frac{y_0}{f - \Delta z}, \quad (2)$$

其中, f 为光学系统焦距, Δz 为 QPD 光敏面离焦量.

2.2 信号通道

QPD 中单象限将俘获到的激光回波脉冲能量 Signal1 转换为电流脉冲信号 Signal2, 再经过 TIA 将该电流信号转换成电压脉冲信号 Signal3, 便于后续的信号读取与测量, 同时能将电流信号放大. 电压脉冲信号 Signal3 是理想激光回波脉冲信号 Signal1 的放大信号, 具有相同的波形形状, 本文将其定义为理想电压脉冲信号. 这一过程如图 2 表示.

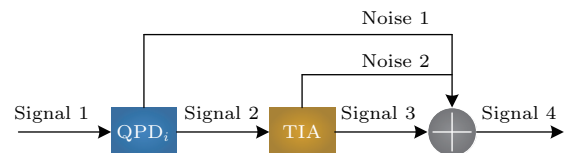


图 2 单通道激光脉冲信号的处理流程图

Fig. 2. One quadrant of QPD processing circuit channel.

单象限俘获的激光回波脉冲经过TIA形成的可测电压信号Signal4是由理想电压脉冲信号和噪声信号组成的. 理想电压信号Signal3是在时域上具有特定分布的信号, 噪声信号Noise1和Noise2是随机噪声信号, 其特点是四个象限的噪声类型是相同的, 但在任意时刻统计独立且互不相关. 单通道的电压信号 V_i 表示为

$$V_i(t) = L_i(t) + N_i(t) \quad (i = A, B, C, D), \quad (3)$$

其中, $V_i(t)$ 表示单通道的可测电压信号, $L_i(t)$ 表示QPD单通道中单象限回波信号对应的理想电压信号, $N_i(t)$ 表示单通道光电探测通道中噪声电压信号.

由图2, 单通道理想电压信号峰值与单象限 S_i 和 P_i 成正比例关系, 且存在如下关系:

$$L_{i-p} = \Re P_i R, \quad (4)$$

式中, L_{i-p} , $i = A, B, C, D$ 分别表示理想电压信号峰值; \Re 为QPD响应度, 单位为A/W, 认为四个象限的 \Re 是相同的; R 表示四个象限光电探测通道中跨阻放大单元的跨阻阻值, 即电流信号转换成电压信号的增益, 并对四通道信号取相同增益.

由于受随机噪声的影响, 经过测量得到的电压信号峰值在时域内和数值上产生随机变化, 且与QPD光敏面接收到的激光脉冲峰值不成正比例关系. 根据(1)和(3)式, 经过测量得到的归一化的光斑中心坐标如下:

$$\begin{aligned} \Delta x' &= \frac{V_{A-p} + V_{D-p} - (V_{B-p} + V_{C-p})}{V_{A-p} + V_{B-p} + V_{C-p} + V_{D-p}}, \\ \Delta y' &= \frac{V_{A-p} + V_{B-p} - (V_{C-p} + V_{D-p})}{V_{A-p} + V_{B-p} + V_{C-p} + V_{D-p}}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中, V_{i-p} , $i = A, B, C, D$ 分别表示可测电压信号峰值. 由于 $\Delta x'$ 和 $\Delta y'$ 存在不确定性, 因此由(2)式计算的角 α 也存在不确定性.

2.3 理想电压信号类型

经过目标反射的激光回波信号较为复杂, 不能精确表达. 但大气路径和目标对激光回波信号的影响一般体现在幅值、脉宽和波形上的变化, 可以认为QPD单象限对应的单通道理想电压脉冲信号Signal3在时域上是高斯分布型^[11]和倒置抛物线分布型等^[12]几种分布类型, 则 i 通道上的理想电压信号分别表示为

$$L_i(t) = L_{i-p} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{\tau^2}},$$

$$FWHM = 2\tau\sqrt{\ln 2}, \quad (6)$$

$$L_i(t) = L_{i-p} \left(1 - \frac{(t-t_0)^2}{\tau^2}\right) \text{rect}\left(\frac{t-t_0}{2\tau}\right),$$

$$FWHM = \sqrt{2}\tau, \quad (7)$$

式中, $FWHM$ 表示脉冲半峰宽度, τ 为系数, t_0 为系统延时.

记 $\sum L_{i-p} = L_p$, L_p 与光斑总面积 S 和光斑总峰值功率 P 成正比例关系. 光斑在QPD光敏面上不同位置, 单象限的激光信号峰值功率不同, 且与单象限中光斑所覆盖的面积成正比例关系. 为了方便求解单象限光斑覆盖的面积, 将图1中QPD光敏面坐标系化为极坐标, 设光斑中心坐标为 (ρ_0, θ_0) , $x = \rho \cos\theta$, $y = \rho \sin\theta$, 则光斑轮廓方程为

$$\rho^2 + \rho_0^2 - 2\rho\rho_0 \cos(\theta - \theta_0) = r^2, \quad (8)$$

解方程得到

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 \cos(\theta - \theta_0) \\ &\quad + \sqrt{[\rho_0 \cos(\theta - \theta_0)]^2 - \rho_0^2 + r^2} \\ &(r \geq \rho_0), \\ \rho &= \rho_0 \cos(\theta - \theta_0) \\ &\quad - \sqrt{[\rho_0 \cos(\theta - \theta_0)]^2 - \rho_0^2 + r^2} \\ &(r < \rho_0). \end{aligned} \quad (9)$$

光斑在QPD上四个象限中分别覆盖的面积分别为:

$$\begin{aligned} S_A &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\rho} \rho d\rho d\theta = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\rho^2}{2} d\theta, \\ S_B &= \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \frac{\rho^2}{2} d\theta, \\ S_C &= \int_{\pi}^{\frac{3\pi}{2}} \frac{\rho^2}{2} d\theta, \\ S_D &= \int_{\frac{3\pi}{2}}^{2\pi} \frac{\rho^2}{2} d\theta. \end{aligned} \quad (10)$$

则四路通道中理想电压信号的峰值为

$$L_{i-p} = P\Re R \frac{S_i}{S}. \quad (11)$$

2.4 噪声电压信号类型

QPD四通道噪声信号用等效噪声电压表示, 主要来源是QPD和TIA. 激光探测系统中随机等效噪声电压信号的概率密度函数可以用高斯函数描述^[13]. 由于四通道的光电效应和TIA器件特性

相同, TIA 增益相同, 四通道的等效噪声电压概率密度函数均可以表示为

$$\rho(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_N^2}} e^{-\frac{N^2}{2\sigma_N^2}}, \quad (12)$$

式中, σ_N 是 QPD 单象限和 TIA 复合的等效噪声电压概率密度标准差, N 是等效噪声电压值. 则单通道的信噪比 SNR_i 为,

$$SNR_i = \frac{L_{i-p}}{\sigma_N}. \quad (13)$$

3 仿真实验与分析

对于确定的理想信号模型和噪声模型, 通过蒙特卡罗仿真实验方法能够在统计上得到可测电压信号的分布, 进而得到 QPD 测角的统计分布. 对 QPD 光敏面坐标系内某一光斑中心的测角分布统计的仿真流程如下:

- 1) 选取 QPD 光敏面坐标系内某一光斑中心的坐标值, 在该光斑下, 根据系统参数分别确定 QPD 对应的四通道理想电压信号峰值;
- 2) 选取一种理想电压信号的时域分布型, 根据理想电压信号峰值, 由 (6) 式或 (7) 式确定信号的时域参数;

3) 利用计算机按照 (12) 式生成同一种随机噪声电压信号, 并将其按照 (3) 式叠加到理想电压信号中, 从而得到可测电压信号;

4) 在理想电压的一个脉冲时间内求得可测电压信号的最大值, 代入 (5) 式, 求出 $\Delta x'$ 和 $\Delta y'$, 再代入 (1) 和 (2) 式, 得到测角值;

5) 重复流程 3 和流程 4 共 10000 次, 通过统计计算, 得到此光斑中心下 QPD 测角值的统计分布.

系统参数设定如下: QPD 光敏面尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 形成的光斑半径为 $r = 2.5 \text{ mm}$, $f - \Delta z = 47.7 \text{ mm}$, QPD 响应度 $\mathfrak{R} = 0.3 \text{ A/W}$, TIA 的跨阻增益 $R = 200 \text{ k}\Omega$, 系统延时 $t = 100 \text{ ns}$. 假设数字处理电路中 AD 采样频率 1 GHz , 则仿真的信号分辨率设置为 1 ns . 理想电压信号的分布类型, 光斑总峰值功率为 P , 理想电压信号的 $FWHM$, 等效噪声电压概率密度标准差 σ_N 四个量作为仿真变量.

由于 QPD 象限的对称性, 仿真实验中只将光斑中心设置在 A 象限中的 $\theta_0 \in [0, \pi/4]$ 内, 且只需仿真 α_y 的统计分布. 在光敏面极坐标系内取 $(0, 0)$, $(0.5, \pi/6)$, $(1.5, \pi/6)$, $(0.5, \pi/4)$, $(1.5, \pi/4)$ 五个点作为光斑中心. 由 (11) 式分别得到五个光斑中心的单象限光斑峰值功率占比 S_i/S 如表 1 所列.

表 1 不同光斑中心的单象限光斑峰值功率占比 (单位: %)

Table 1. Spot peak power accounting in one quadrant with different spot center (unit: %).

Quadrant	1 (0, 0)	2 (0.5, $\pi/6$)	3 (1.5, $\pi/6$)	4 (0.5, $\pi/4$)	5 (1.5, $\pi/4$)
A	25.0	34.2	55.1	34.6	56.9
B	25.0	22.1	13.7	24.7	19.2
C	25.0	16.9	4.8	16.7	4.6
D	25.0	26.8	26.4	24.4	19.3

表 2 五个光斑中心坐标对应的 QPD 理想测角值

Table 2. Ideal angle measurement value for five different spot locations.

Spot center in polar coordinates	Ideal α_y /mrad
1 (0, 0)	0.00
2 (0.5, $\pi/6$)	6.662
3 (1.5, $\pi/6$)	19.712
4 (0.5, $\pi/4$)	9.405
5 (1.5, $\pi/4$)	27.431

根据系统参数、(1) 式及其适用有效范围、(2) 式, 得到系统测角范围为 $\{\alpha_x, \alpha_y \in [-52, 52] \text{ mrad}\}$. 当 $\sigma_N = 0$ 时为理想情况, 不存在测角误

差, 不同光斑中心坐标位置情况下的 QPD 理想测角 α_y 的值如表 2 所列.

3.1 理想电压信号时域分布类型的影响

设定光斑总峰值功率为 $P = 50 \text{ }\mu\text{W}$, 理想电压信号的半峰宽度 $FWHM = 50 \text{ ns}$, 等效噪声电压概率密度标准差 $\sigma_N = 20 \text{ mV}$, 分别得到理想电压信号在时域上高斯分布型和倒置抛物线分布型的测角 α_y 统计分布, 并呈正态分布的特性, 如图 3 所示, 图中的 $mean$ 表示测角分布统计的均值, std 表示标准差. $Mean$ 和 std 决定测角精度.

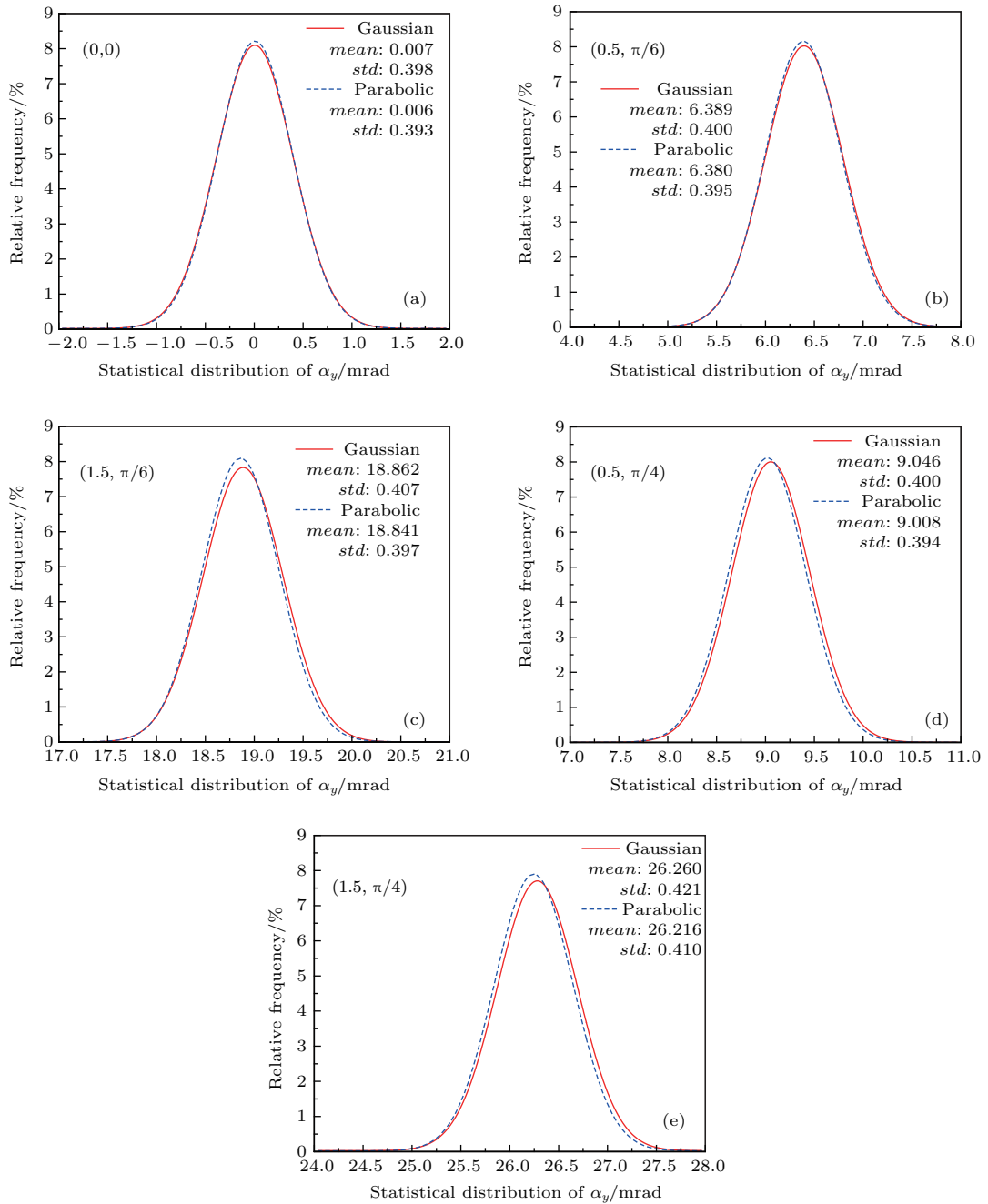


图3 (网刊彩色) 不同理想电压信号时域分布类型的测角 α_y 统计分布图 (a), (b), (c), (d), (e) 分别对应光斑中心坐标位置 1, 2, 3, 4, 5

Fig. 3. (color online) Statistical distribution of α_y measurement over different ideal signal type: (a), (b), (c), (d), (e) are corresponding to spot locations 1, 2, 3, 4, 5.

由图3可知, 高斯分布型与倒置抛物线分布型理想电压信号的测角统计分布规律类似, 当光斑中心在QPD光敏面坐标轴原点附近时两种分布规律差距最小, 光斑中心离坐标轴原点的距离 ρ_0 越大, 两种分布规律的差距也逐渐变大. 在第A象限 $\theta_0 \in [0, \pi/4]$ 内, 相同的 θ_0 时测角 α_y 统计分布的标准差均随着 ρ_0 的变大而变大, 统计的测角均值与理想测角值差值的绝对值随着 ρ_0 变大而变大; 相

同的 ρ_0 时, 统计的标准差随着 θ_0 的变大而变大, 统计的测角均值与理想测角值的差值随着 θ_0 的变大而变大; 除了光斑中心在坐标原点附近时, 测角 α_y 统计分布的均值都比理想测角值偏小; 倒置抛物线分布型理想电压信号的测角均值和标准差均比高斯分布型的小.

虽然实际激光回波理想信号类型更接近倒置抛物线分布型, 但高斯分布型和倒置抛物线分布型

理想电压信号的测角统计分布相差不大, 而且高斯分布型在仿真中更容易处理, 因此在后续仿真中只对高斯分布型进行分析.

3.2 光斑总峰值功率的影响

由于目标距离的轻微改变以及复杂大气条件下激光能量传输的轻微影响, 造成QPD光敏面俘获到的激光回波能量产生轻微变化, 从而使光斑总峰值功率产生轻微变化. 设定理想电压信号的半峰

宽度 $FWHM = 50$ ns, 等效噪声电压概率密度标准差 $\sigma_N = 20$ mV. 光斑总峰值功率 P 设为变量, 分别为 $P = 30, 50, 70 \mu\text{W}$. 对不同的 P 进行仿真, 得到理想电压信号在时域上是高斯分布型的测角 α_y 统计分布, 如图4所示.

由图4可知光斑总峰值功率 P 的变化明显影响QPD测角的统计分布规律: 1) 光斑中心离坐标轴原点的距离 ρ_0 越大, 光斑总峰值功率影响测角统计分布规律越明显; 2) 对单一光斑, 当 P 越大,

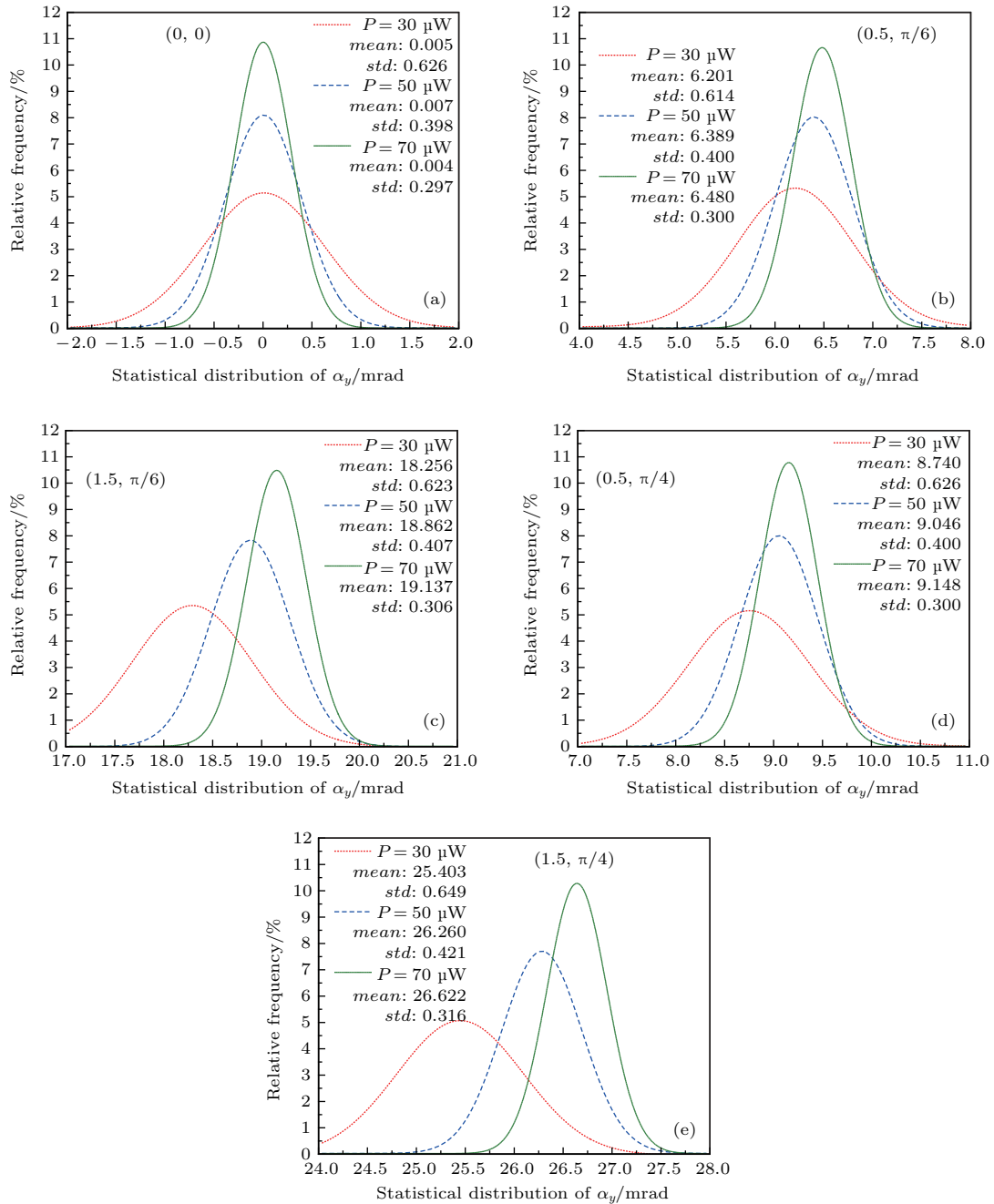


图4 (网刊彩色) 不同光斑总峰值功率的测角 α_y 统计分布图 (a), (b), (c), (d), (e) 分别对应光斑中心坐标位置 1, 2, 3, 4, 5
 Fig. 4. (color online) Statistical distribution of α_y measurement over different total peak power of the spots: (a), (b), (c), (d), (e) are corresponding to spot locations 1, 2, 3, 4, 5.

测角 α_y 统计分布的标准差越小, 分布越集中; 3) 对单一光斑, 当 P 越大, 统计分布的均值越大, 越接近理想测角值. 原因是 P 越大, 提高了4路通道的信噪比, 测角的统计分布受噪声的影响越小.

3.3 理想电压信号 $FWHM$ 的影响

由于目标反射表面以及复杂大气条件下激光传输的影响, 引起QPD光敏面俘获到的激光回波脉宽产生变化. 设定光斑总峰值功率为

$P = 50 \mu\text{W}$, 等效噪声电压概率密度标准差 $\sigma_N = 20 \text{ mV}$. 理想电压信号的半峰宽度 $FWHM$ 为变量, 分别为 $FWHM = 30, 50, 70 \text{ ns}$. 对不同的 $FWHM$ 进行仿真, 得到理想电压信号在时域上为高斯分布型的测角 α_y 统计分布, 如图5所示.

由图5可以得出不同的理想电压信号半峰宽度 $FWHM$ 影响测角 α_y 统计分布: 1) 光斑中心离坐标轴原点的距离 ρ_0 越大, $FWHM$ 影响测角统计分布规律越明显; 2) 对单一光斑, 当 $FWHM$ 越

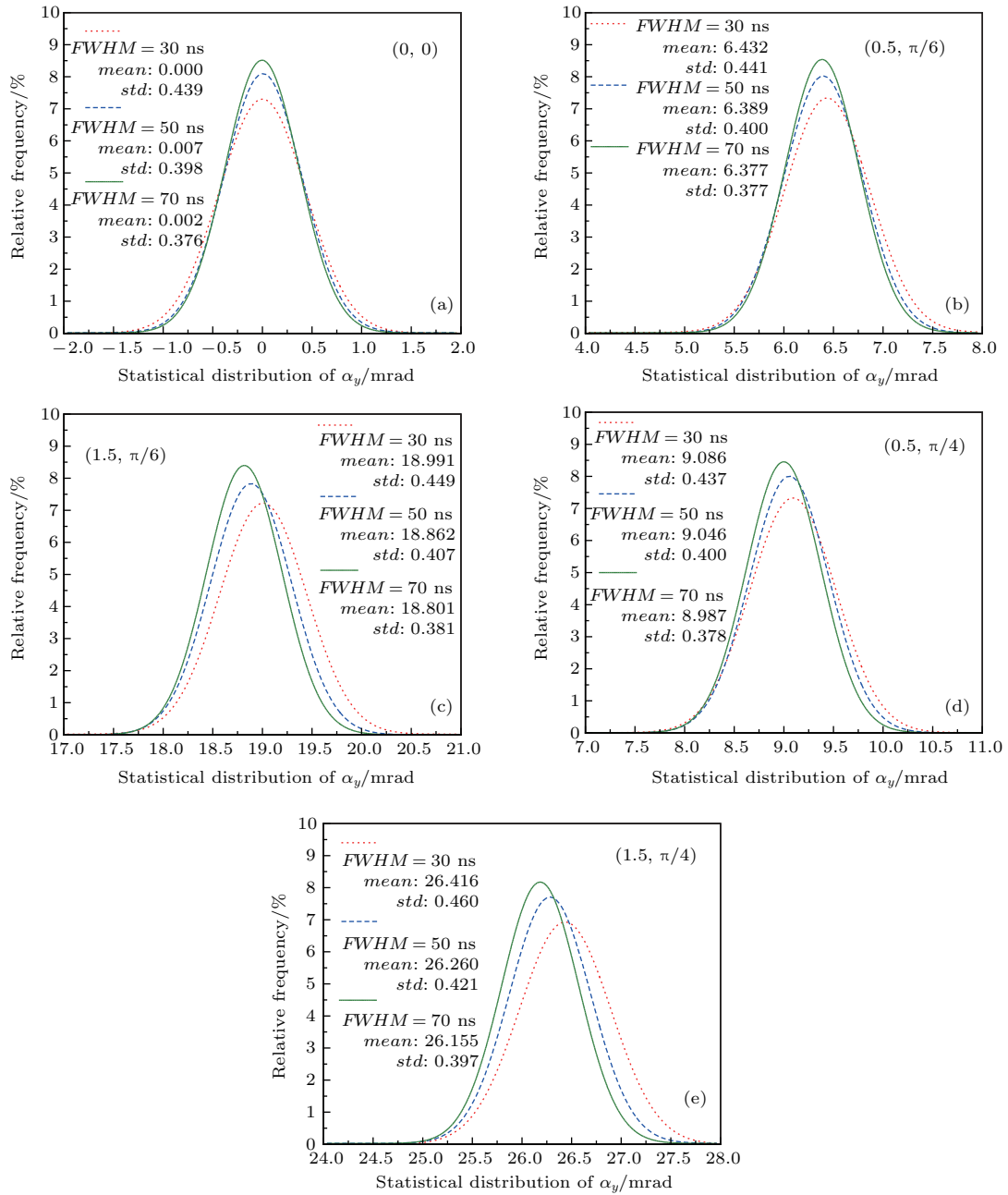


图5 (网刊彩色) 不同半峰宽度 $FWHM$ 的测角 α_y 统计分布图 (a), (b), (c), (d), (e) 分别对应光斑中心坐标位置 1, 2, 3, 4, 5
 Fig. 5. (color online) Statistical distribution of α_y measurement over different ideal signal $FWHM$: (a), (b), (c), (d), (e) are corresponding to spot locations 1, 2, 3, 4, 5.

大, 测角 α_y 统计分布的标准差越小, 分布越集中;
 3) 对单一光斑, $FWHM$ 越大, 统计分布的均值越小, 与理想测角值差值越大.

3.4 等效噪声电压信号概率密度标准差的影响

噪声的主要来源是 QPD 和 TIA, 容易受到环境及温度的影响, 造成噪声概率密度的改变. 设定

光斑总峰值功率为 $P = 50 \mu\text{W}$, 理想电压信号的 $FWHM = 50 \text{ ns}$. 等效噪声电压概率密度标准差为变量, 分别为 $\sigma_N = 10, 20, 30, 40 \text{ mV}$. 对不同的 σ_N 进行仿真, 得到理想电压信号在时域上为高斯分布型的测角 α_y 统计分布, 如图 6 所示.

由图 5 可以得出不同等效噪声电压概率密度标准差 σ_N 显著影响测角 α_y 统计分布: 1) 光斑中心离坐标轴原点的距离 ρ_0 越大, σ_N 影响测角统计分

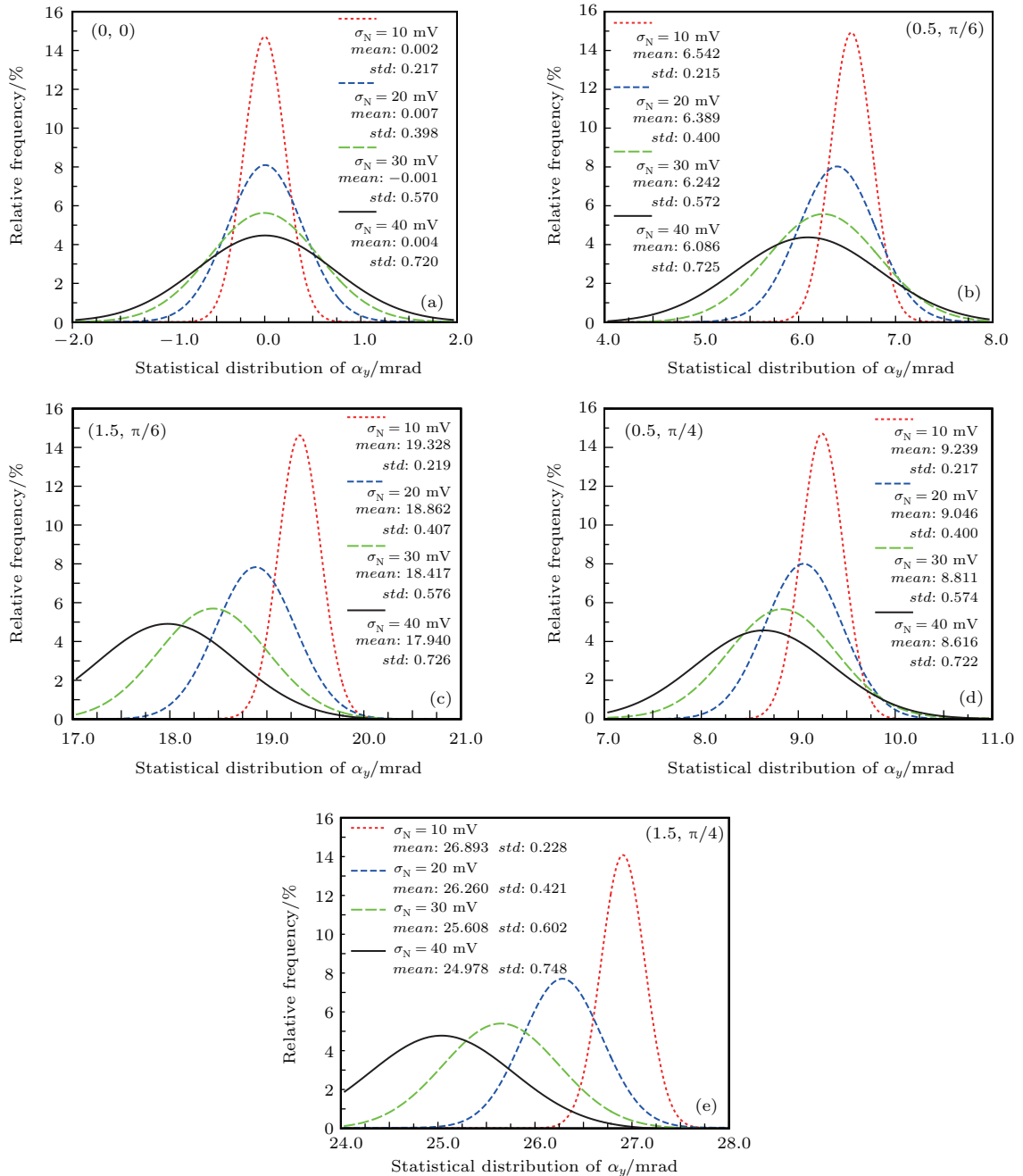


图 6 (网刊彩色) 不同等效噪声电压概率密度函数标准差的测角 α_y 统计分布图 (a), (b), (c), (d), (e) 分别对应光斑中心坐标位置 1, 2, 3, 4, 5

Fig. 6. (color online) Statistical distribution of α_y measurement over different standard deviations of equivalent noise voltage probability density: (a), (b), (c), (d), (e) are corresponding to spot locations 1, 2, 3, 4, 5.

布规律越明显; 2) 对单一光斑, 当 σ_N 越小, 测角 α_y 统计分布的标准差越小, 分布越集中; 3) 对单一光斑, 当 σ_N 越小, 统计分布均值越大, 与理想测角值差值越小. 原因是当等效噪声电压概率密度标准差越大时, 各路通道 SNR_i 越小, 导致测角统计分布越分散, 测角精度下降. 同时, 当 ρ_0 越大, 在本例中造成QPD的C通道理想电压信号越小, 则 SNR_C 越小, 导致测角精度下降.

4 结 论

本文通过模拟真实的激光回波脉冲探测模型, 利用蒙特卡罗仿真实验方法得到QPD归一化和差算法的测角统计分布规律. 结果表明, 测角 α_y 值的统计分布呈正态分布, QPD测角精度与光斑中心坐标位置有关, 并被激光回波时域上的波形分布和回波脉宽影响, 而且更重要的是被激光回波峰值功率和等效噪声电压概率密度标准差显著影响. 在 $\theta_0 \in [0, \pi/4]$ 范围内并除光斑中心在原点附近时, QPD的测角 α_y 的统计分布均值都小于理想测角值. 提高QPD测角电路各路通道的信噪比能有效提高QPD测角精度.

参考文献

[1] Fan S P, Lin D F, Lu Y L, Zong R 2014 *Infrared and Laser Engineering* **43** 394 (in Chinese) [范世鹏, 林德福,

路宇龙, 宗睿 2014 红外与激光工程 **43** 394]
 [2] Hu Y B, Wang M 2015 *J. Optoelectron. •laser* **26** 2199 (in Chinese) [胡亚斌, 王苗 2015 光电子·激光 **26** 2199]
 [3] Han C, Bai B X, Yang H M, Tong S F, Jiang H L, Fan J T 2009 *Chin. J. Lasers* **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]
 [4] Kou T, Wang H Y, Wang F, Chen M, Xu Q 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 0414001 (in Chinese) [寇添, 王海晏, 王芳, 陈闽, 徐强 2015 光学学报 **35** 0414001]
 [5] Yan Z G, Lin Y L, Yang J, Li Z H, Bian B M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 200502 (in Chinese) [闫振纲, 林颖璐, 杨娟, 李振华, 卞保民 2012 物理学报 **61** 200502]
 [6] Zhang H, Chen Y S, Geng T W, Wu J B, Chen T 2015 *Chin. J. Lasers* **42** 1217002 (in Chinese) [张辉, 陈云善, 耿天文, 吴佳彬, 陈涛 2015 中国激光 **42** 1217002]
 [7] Lazo M M, Žarko P B 2009 *IEEE Trans. Instrument. Measur.* **58** 681
 [8] Xiao S R, Zhou J, Zhao J, Huang X 2013 *Infrared and Laser Engineering* **42** 605 (in Chinese) [肖韶荣, 周洁, 赵静, 黄新 2013 红外与激光工程 **42** 605]
 [9] Ma X Y, Guo Y M, Rao C H, Wei K, Tian Y, Rao X J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 242902 (in Chinese) [马晓燠, 郭友明, 饶长辉, 魏凯, 田雨, 饶学军 2012 物理学报 **61** 242902]
 [10] Lu C, Zhai Y S, Wang X J, Guo Y Y, Du Y X, Yang G S 2014 *Optik* **125** 3519
 [11] Steven E J, Terry L N, Philip G, Klausutis T J 2004 *Proc. SPIE* **5412** 72
 [12] Grönwall C, Steinvall O, Gustafsson F, Chevalier T 2007 *Opt. Eng.* **46** 106201
 [13] Jiang H J, Lai J C, Yan W, Wang C Y, Li Z H 2013 *Opt. Laser Technol.* **45** 278

Angle measurement uncertainty statistical distribution of pulsed laser quadrant photodetector*

Zhang Wei¹⁾ Zhang He^{1)†} Chen Yong²⁾ Zhang Xiang-Jin¹⁾ Xu Xiao-Bin¹⁾

1) (ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

2) (Industrial Center, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

(Received 26 May 2016; revised manuscript received 28 September 2016)

Abstract

As a positionsensitive detector, laser quadrant photodetector (QPD) is widely used in the areas such as laser guidance, laser radar and space optical communication. In the echoed laser pulse detection mode, the laser pulse signal arrived at the QPD photosensitive surface is changed in pulse amplitude, pulse width and pulse waveform due to the influences of target characteristic, atmospheric transmission and other complex factors. In addition, there are random noises in QPD itself and the signal processing circuit. These factors will have an uncertainty effect on the angle measurement accuracy of the QPD. However, the study on the statistical distribution of digital angle measurement of pulsed laser QPD has not been carried out so far. To investigate this angle measurement statistical distribution, the channel of laser angle measurement circuit and the echoed laser spot on QPD photosensitive surface should be modeled first. A measurable signal model in one quadrant of QPD processing circuit channel is established based on the type of random noise and the type of desired ideal signal. The random noise model is considered to be a Gaussian distribution, and the ideal laser pulse signal is considered to have the Gaussian or inverted parabolic distribution in the time domain. Taking into account the QPD symmetry, the statistical distributions of angle measurement value α_y for five different spot centers are calculated by the Monte Carlo simulation method within the range $\theta_0 \in [0, \pi/4]$, under the conditions of different signal distribution types in the time domain, different total peak powers of the spots, different ideal signal widths at half maximum, and different standard deviations of equivalent noise voltage probability density. Simulation results show that the statistical distribution of the measured angle α_y value is a normal distribution, and is influenced by the above-mentioned conditions, especially by the signal-to-noise ratio in one quadrant. QPD possesses higher angular accuracy as the spot center is closer to the axis center. While the spot center is not closer to the axis center, the mean of statistical distribution of the QPD measurement angle α_y is always less than the ideal angle measurement value. Therefore, in order to improve the angle measurement accuracy of the pulsed laser QPD for digital purpose, laser pulse transmit power should be increased, or the noise of each circuit channel of QPD should be reduced, or the laser pulse width should be increased by modulating appropriately.

Keywords: quadrant photodetector, angle measurement, uncertainty statistical distribution, equivalent noise voltage

PACS: 29.40.Gx, 07.05.Kf, 05.40.Ca, 02.50.Ng

DOI: 10.7498/aps.66.012901

* Project supported by Weapon-equipment Pre-research Project Foundation, China (Grant No. 51305020104).

† Corresponding author. E-mail: hezhangz@njjust.edu.cn