

# 光子脉冲外差探测系统的测距精度

罗韩君<sup>1,2</sup> 元秀华<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 华中科技大学光学与电子信息学院武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)  
<sup>2</sup> 湖南科技大学物理与电子科学学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要** 测距精度是评价脉冲激光测距系统性能的重要参数之一,对基于盖革模式雪崩光电二极管的光子脉冲外差探测系统的测距精度进行了研究。利用激光外差探测原理和光子计数探测的统计理论,建立了系统测距精度模型。研究了激光回波强度、脉宽、本振光强度、噪声、回波位置与拍频等6个因素对测距精度的影响。研究结果表明,当回波脉冲强度较弱时,这6个因素对测距精度影响很大。当回波信号激发的初始电子数多于4个时,影响测距精度的因素主要是激光回波强度和脉宽。回波越强,脉宽越窄,本振光越强,噪声越低,回波位置越大,拍频越小,测距精度越高。

**关键词** 探测器; 外差探测; 盖革模式; 探测概率; 测距精度

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1208004

## Accuracy of Photon Pulsed Heterodyne Detection System

Luo Hanjun<sup>1,2</sup> Yuan Xiuhua<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China  
<sup>2</sup> School of Physics and Electronic Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

**Abstract** Range accuracy is one of the important parameters for evaluating the performance of the pulsed laser ranging system. In this paper, the range accuracy of the photon pulsed heterodyne detection system with Geiger-mode avalanche photodiode (GM-APD) is investigated. Based on the heterodyne principle and statistical detection theory of photon counting, the range accuracy model is established. The factors that influence the range accuracy, including pulse width, echo intensity, local oscillator (LO) intensity, noise, echo position, and beat frequency, are discussed. The results show that these six factors have significant influence on the range accuracy when the echo intensity is extremely weak. In the case that the primary electrons of the echo signal are beyond 4, the pulse width and echo intensity are the main factors. It is also shown that the stronger echo intensity, the narrower pulse width, the lower noise, the larger echo position, and the less beat frequency, the higher range accuracy in a pulsed photon heterodyne detection system based on GM-APD.

**Key words** detectors; heterodyne detection; Geiger mode; detection probability; range accuracy

**OCIS codes** 040.2840; 040.1345; 030.5260

## 1 引言

近年来,为探测远程非合作目标的微弱光子回波,将光子计数技术与外差探测技术相结合的光子

脉冲外差探测系统得到了研究<sup>[1]</sup>。外差探测具有灵敏度高与抗干扰能力强等优点,可同步探测回波信号强度与相位的能力,有较大探测信息量,因而可同

收稿日期: 2013-06-03; 收到修改稿日期: 2013-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(61275081)

作者简介: 罗韩君(1975—),男,博士研究生,主要从事单光子成像探测方面的研究。E-mail: 393593928@qq.com

导师简介: 元秀华(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信、光电检测、光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: yuanxh@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

时探测目标的距离与速度<sup>[2-3]</sup>。工作于盖革模式的雪崩光电二极管(GM-APD),其反偏电压略高于雪崩击穿电压,当探测到一个或多于一个光子时,GM-APD探测器就会发生雪崩效应,使输出电流迅速达到饱和值,而且这个过程通常是瞬态的,因而 GM-APD 探测器具有单光子探测灵敏度和很好的时间分辨率<sup>[4-6]</sup>。同时,GM-APD 探测器具有很高的雪崩增益,其输出可直接驱动后续数字信号处理电路,便于大规模阵列集成,是实现无扫描三维成像激光雷达的关键器件之一<sup>[6-10]</sup>。

基于光子计数和外差探测的优势,近年来国内外开展了基于 GM-APD 探测器的光子外差探测技术的研究。Luu 等<sup>[1]</sup>利用光子计数阵列的饱和效应,研究了光子脉冲外差探测系统的信噪比;Jiang 等<sup>[11]</sup>利用随机相幅矢量理论,建立和验证了基于弱本振光的光子脉冲外差探测激光雷达的最佳信噪比理论;刘立生<sup>[12-13]</sup>对光子外差探测系统的拍频获取方法和改善信噪比的方法进行了研究。但总体来说,将光子计数与外差探测结合起来的研究才起步,到目前为止,仅有少量文献研究了直接探测脉冲激光雷达的测距精度<sup>[14-15]</sup>,关于光子脉冲外差探测系统测距精度的研究的尚未有文献报道。

设计了光子脉冲外差探测系统,利用激光脉冲外差原理与光子探测统计理论,研究了目标探测概率分布、探测概率密度函数和光子到达时间的均值与方差,建立了基于 GM-APD 探测器的光子脉冲外差探测系统的测距精度理论模型。利用方波近似条件,根据光子脉冲外差探测系统典型参数,研究了回波强度、脉宽、噪声、回波位置、本振光强和拍频等参数对测距精度的影响。

## 2 系统结构与测距原理

光子脉冲外差探测系统利用飞行时间法测距,系统结构与测距原理如图 1 所示,工作过程如下。连续波激光器在信号控制与处理模块的控制下发射连续波激光,激光束经分束器 BS1,其中一束由声光调制器(AOM)移频后作为本振光(LO)信号。另一束经电光控制器后形成脉冲激光输出,经分束器 BS2,其中少部分能量由触发(APD)接收形成时间数字转换电路(TDC)的计时开始信号,另一束射向目标并反射回探测系统。回波光子与本振光子在 GM-APD 探测器光敏面上混频,混频输出形成的停止信号使 TDC 停止计时,对应的计时时间即为本次发射脉冲的往返飞行时间。在计时电路停止计时

的同时,增加一次对应于回波光子飞行时间的通道的光子计数操作。经过测量发射脉冲串的光子计数,获得回波光子计数的直方图,通过对光子计数直方图的处理,获得发射脉冲的往返飞行时间,即目标距离。同时,信号处理与控制系统产生 TDC 控制信号和距离门信号,并可对直方图进行处理得到目标距离。

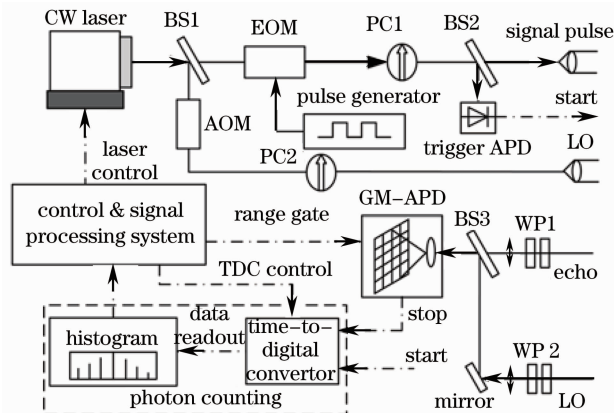


图 1 光子脉冲外差探测系统

Fig. 1 Block diagram of photon pulsed heterodyne detection system

在直接探测激光雷达系统中广泛使用距离门技术<sup>[16-17]</sup>。在距离门外,探测器不工作;在感兴趣的探测距离上,打开距离门,这样可大幅降低背景辐射和后向散射噪声的影响。对于采用距离门技术的光子脉冲外差探测系统,其探测时序如图 2 所示。距离门开始时间为  $T_s$ ,脉冲回波相对距离门开始时间为  $\tau_a$ ,距离门宽度为  $T_G$ 。

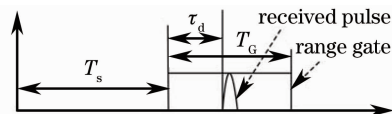


图 2 系统工作时序

Fig. 2 Time sequence of pulsed detection system

## 3 理论模型

### 3.1 脉冲激光外差探测原理

发射机发射的连续本振光和脉冲激光信号的光波场分别表示为

$$E_1(\mathbf{r}, t) = e_1 A_1(\mathbf{r}) \exp[-j\omega_1 t - \varphi_1(\mathbf{r})], \quad (1)$$

$$E_s(\mathbf{r}, t) = e_s A_s(\mathbf{r}) S_r(t) \exp[-j\omega_s t - \varphi_s(\mathbf{r})], \quad (2)$$

式中  $e_1$  和  $e_s$  分别为本振光与信号光偏振方向上的单位矢量;  $A_1(\mathbf{r})$  和  $A_s(\mathbf{r})$ 、 $\varphi_1(\mathbf{r})$  和  $\varphi_s(\mathbf{r})$  分别为本振光和信号光的振幅与初相位;  $\omega_1$  和  $\omega_s$  分别为本振

光和信号光的频率;  $S_r(t)$  为调 Q 激光脉冲的时间波形函数, 其归一化函数可表示为<sup>[18]</sup>

$$S_r(t) = \frac{1}{\tau_p} \frac{t}{\tau_p} \exp(-t/\tau_p), (t \geq 0), \quad (3)$$

脉宽  $p_w$  与参数  $\tau_p$  的关系为

$$p_w = 3.5\tau_p. \quad (4)$$

对于外差探测, 本振光与脉冲信号光的偏振方向一般保持一致, 探测器的输出中频信号可表示为

$$i_{IF}(t) = \frac{\eta_a e}{h\nu} \left\{ \int_{\sigma} |A_1(\mathbf{r})|^2 d^2r + S_r(t) \int_{\sigma} |A_1(\mathbf{r})|^2 d^2r + 2S_r(t - t_d) \int_{\sigma} |A_1(\mathbf{r})| |A_s(\mathbf{r})| \cos[\omega_{IF}(t - t_d) + \Delta\varphi(\mathbf{r})] d^2r \right\}, \quad (5)$$

式中  $e$  为元电荷,  $h$  为普朗克常数,  $\nu$  为光波频率,  $\sigma$  为探测器光敏面积。若目标距离为  $R$ , 光速为  $c$ , 则脉冲飞行时间为  $t_d = 2R/c = T_s + \tau_d$ 。因距离门外不发生探测, 可将距离门起始点作为相对计时零点, 因而 GM-APD 探测器上产生初始电子数的率函数为

$$R_{\text{Beat}}(t) = N_{\text{LO}} + N_s S_r(t - \tau_d) + 2M_e S_r(t - \tau_d) \sqrt{N_{\text{LO}} N_s} \cos[\omega_{IF}(t - \tau_d) + \Delta\varphi], \quad (6)$$

式中  $N_{\text{LO}}$  为平均本振初始电子数,  $N_s$  为平均信号初始电子数,  $M_e$  为混频效率,  $\omega_{IF} = |\omega_1 - \omega_s|$  为外差拍频,  $\Delta\varphi = \varphi_1(\mathbf{r}) - \varphi_s(\mathbf{r})$  为相位差。

设背景辐射噪声与探测器暗计数噪声引起的平均初始电子数为  $N_{\text{PE}}$ , 则在距离门  $T_G$  内, 初始电子数的率函数<sup>[14]</sup>

$$S_{\text{PE}}(t) = \begin{cases} N_{\text{PE}}, & 0 < t \leq \tau_d \\ N_{\text{PE}} + R_{\text{Beat}}(t), & \tau_d < t \leq \tau_d + p_w \\ N_{\text{PE}}, & \tau_d + p_w < t \leq T_G \end{cases} \quad (7)$$

在探测时间  $t$  内, 探测器探测到的平均初始电子数

$$\overline{N_e(t)} = \int_0^t S_{\text{PE}}(\xi) d\xi. \quad (8)$$

### 3.2 回波光子探测统计理论

在弱光探测情况下, 本振光与噪声服从 Poisson 分布, 镜面目标回波光子也服从 Poisson 分布, 而漫反射目标回波信号光服从负二项分布。但弱光探测时所接收的信号光子数很少, 当接收到的光子数比激光的模式数参数  $M$  小时, 负二项分布转化为 Poisson 分布<sup>[19]</sup>。则在时间间隔  $[t_1, t_2]$  内探测到  $k$  个初始电子的概率为<sup>[20]</sup>

$$P(k, t_1, t_2) = \frac{\left[ \int_{t_1}^{t_2} S_{\text{PE}}(t) dt \right]^k}{k!} \exp\left[-\int_{t_1}^{t_2} S_{\text{PE}}(t) dt\right]. \quad (9)$$

在  $[t_1, t_2]$  内无初始电子产生的概率为  $P(k=0)$ , 产生一个或多个于一个初始电子的概率为

$$P(k > 0) = 1 - P(k = 0) =$$

$$1 - \exp\left[-\int_{t_1}^{t_2} S_{\text{PE}}(t) dt\right]. \quad (10)$$

由于使用了距离门, 积分时间在距离门内进行, 在距离门内探测到信号的概率为

$$P_D(T_G) = 1 - \exp[-\overline{N_e(T_G)}]. \quad (11)$$

目标探测概率是以在距离门内探测到信号为条件的条件概率, 因此可得目标探测概率为

$$P_D(t) = \frac{P(k > 0)}{1 - \exp[-\overline{N_e(T_G)}]} = \frac{1 - P(k = 0)}{1 - \exp[-\overline{N_e(T_G)}]} = \frac{1 - \exp[-\overline{N_e(t)}]}{1 - \exp[-\overline{N_e(T_G)}]}. \quad (12)$$

根据概率理论, 探测器探测到目标的概率密度函数

$$p(t) = \frac{\partial P_D(t)}{\partial t}. \quad (13)$$

因而探测器探测到回波光子到达时间的均值与方差分别为

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t \cdot p(t) dt, \quad (14)$$

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} t^2 \cdot p(t) dt - \bar{t}^2, \quad (15)$$

在获得回波信号的到达时间均值后, 将其与真实回波时间位置的差乘以光速后即得到测距误差的均值, 误差均值越小, 测量得到的距离与目标真实距离越接近, 测距精度越高。测距精度

$$\Delta R = \frac{(\bar{t} - \tau_d)c}{2}, \quad (16)$$

回波信号的方差代表了探测值与平均到达时间的离散程度, 方差的平方根称为标准差, 标准差乘以光速得距离标准差。距离标准差代表探测距离与平

均距离之差,可用来表征系统的精密度。探测距离偏离平均距离越小,距离标准差越小,距离标准差可表示为

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{DC}}{2}. \quad (17)$$

## 4 测距精度分析

### 4.1 探测概率与测距精度

为简化分析,将  $S_r(t)$  简化为理想矩形激光脉冲,即在脉宽  $p_w$  内,  $S_r(t)=1$ ,由(8)式可得

$$\overline{N_e(t)} = \begin{cases} N_{PE}t, & 0 \leq t \leq \tau_d \\ N_{PE}t + (N_{LO} + N_s)(t - \tau_d) + \frac{2M_e \sqrt{N_{LO}N_s}}{\omega_{IF}} \{ \sin[\omega_{IF}(t - \tau_d) + \Delta\varphi] - \sin\Delta\varphi \}, & \tau_d \leq t \leq \tau_d + p_w \\ N_{PE}t + (N_{LO} + N_s)p_w + \frac{2M_e \sqrt{N_{LO}N_s}}{\omega_{IF}} [ \sin(\omega_{IF}p_w + \Delta\varphi) - \sin\Delta\varphi ], & \tau_d + p_w \leq t \leq T_G. \end{cases} \quad (18)$$

将(18)式代入(12)式,可得到目标探测概率分布表达式,由此得到目标探测概率分布如图3所示。

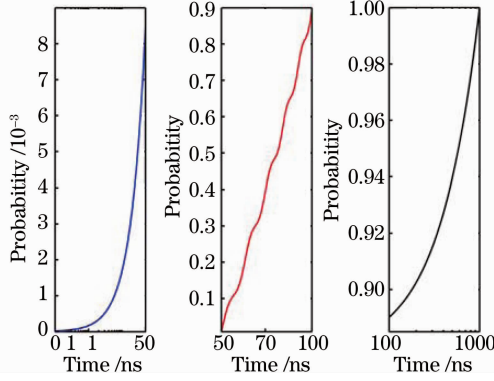


图3 目标探测概率与探测时间的关系

Fig. 3 Detection probability distribution versus detection time

由(13)式得目标探测概率密度函数为

$$p(t) = \begin{cases} \frac{N_{PE} \exp(-N_{PE}t)}{1 - \exp\{-N_{PE} \cdot T_G - (N_{LO} + N_s) \cdot p_w - (2M_e \sqrt{N_{LO}N_s}) [\sin(\omega_{IF}p_w + \Delta\varphi) - \sin\Delta\varphi] / \omega_{IF}\}}, & t \leq \tau_d \\ \frac{1}{1 - \exp\{-N_{PE} \cdot T_G - (N_{LO} + N_s) \cdot p_w - (2M_e \sqrt{N_{LO}N_s}) [\sin(\omega_{IF}p_w + \Delta\varphi) - \sin\Delta\varphi] / \omega_{IF}\}} \times \\ \exp - \left\{ N_{PE}t + (N_{LO} + N_s)(t - \tau_d) + \frac{2M_e \sqrt{N_{LO}N_s}}{\omega_{IF}} \{ \sin[\omega_{IF}(t - \tau_d) + \Delta\varphi] - \sin\Delta\varphi \} \right\} \times \\ \{ N_{PE} + N_{LO} + N_s + 2M_e \sqrt{N_{LO}N_s} \cos[\omega_{IF}(t - \tau_d) + \Delta\varphi] \}, & \tau_d < t \leq \tau_d + p_w \\ \frac{N_{PE}}{1 - \exp[-N_{PE} \cdot T_G - (N_{LO} + N_s) \cdot p_w - (2M_e \sqrt{N_{LO}N_s}) [\sin(\omega_{IF}p_w + \Delta\varphi) - \sin\Delta\varphi] / \omega_{IF}]} \times \\ \exp \left\{ - \left[ N_{PE}t + (N_{LO} + N_s)p_w + \frac{2M_e \sqrt{N_{LO}N_s}}{\omega_{IF}} [\sin(\omega_{IF}p_w + \Delta\varphi) - \sin\Delta\varphi] \right] \right\}, & \tau_d + p_w < t \leq T_G \end{cases} \quad (19)$$

由(14)、(15)式得到回波信号的时间均值与方差为

$$\begin{aligned}
 \bar{t} = & \int_0^{\tau_d} t \times \frac{N_{PE} \exp(-N_{PE} t)}{1 - \exp\{-N_{PE} \cdot T_G - (N_{LO} + N_s) \cdot p_w - (2M_e \sqrt{N_{LO} N_s} [\sin(\omega_{IF} p_w + \Delta\varphi) - \sin\Delta\varphi]) / \omega_{IF}\}} dt + \\
 & \int_{\tau_d}^{\tau_d + p_w} t \times \frac{1}{1 - \exp\{-N_{PE} \cdot T_G - (N_{LO} + N_s) \cdot p_w - (2M_e \sqrt{N_{LO} N_s} [\sin(\omega_{IF} p_w + \Delta\varphi) - \sin\Delta\varphi]) / \omega_{IF}\}} \times \\
 & \exp\left\{-\left\{N_{PE} t + (N_{LO} + N_s)(t - \tau_d) + \frac{2M_e \sqrt{N_{LO} N_s}}{\omega_{IF}} \{\sin[\omega_{IF}(t - \tau_d) + \Delta\varphi] - \sin\Delta\varphi\}\right\}\right\} \times \\
 & \{N_{PE} + N_{LO} + N_s + 2M_e \sqrt{N_{LO} N_s} \cos[\omega_{IF}(t - \tau_d) + \Delta\varphi]\} dt + \\
 & \int_{\tau_d + p_w}^{T_G} t \times \frac{N_{PE}}{1 - \exp\{-N_{PE} \cdot T_G - (N_{LO} + N_s) \cdot p_w - (2M_e \sqrt{N_{LO} N_s} [\sin(\omega_{IF} p_w + \Delta\varphi) - \sin\Delta\varphi]) / \omega_{IF}\}} \times \\
 & \exp\left\{-\left\{N_{PE} t + (N_{LO} + N_s) p_w + \frac{2M_e \sqrt{N_{LO} N_s}}{\omega_{IF}} [\sin(\omega_{IF} p_w + \Delta\varphi) - \sin\Delta\varphi]\right\}\right\} dt, \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_D^2 = & \int_0^{\tau_d} t^2 \times \frac{N_{PE} \exp(-N_{PE} t)}{1 - \exp\{-N_{PE} \cdot T_G - (N_{LO} + N_s) \cdot p_w - (2M_e \sqrt{N_{LO} N_s} [\sin(\omega_{IF} p_w + \Delta\varphi) - \sin\Delta\varphi]) / \omega_{IF}\}} dt + \\
 & \int_{\tau_d}^{\tau_d + p_w} t^2 \times \frac{1}{1 - \exp\{-N_{PE} \cdot T_G - (N_{LO} + N_s) \cdot p_w - (2M_e \sqrt{N_{LO} N_s} [\sin(\omega_{IF} p_w + \Delta\varphi) - \sin\Delta\varphi]) / \omega_{IF}\}} \times \\
 & \exp\left\{-\left\{N_{PE} t + (N_{LO} + N_s)(t - \tau_d) + \frac{2M_e \sqrt{N_{LO} N_s}}{\omega_{IF}} \{\sin[\omega_{IF}(t - \tau_d) + \Delta\varphi] - \sin\Delta\varphi\}\right\}\right\} \times \\
 & \{N_{PE} + N_{LO} + N_s + 2M_e \sqrt{N_{LO} N_s} \cos[\omega_{IF}(t - \tau_d) + \Delta\varphi]\} dt + \int_{\tau_d + p_w}^{T_G} t^2 \times \\
 & \frac{N_{PE}}{1 - \exp\{-N_{PE} \cdot T_G - (N_{LO} + N_s) \cdot p_w - (2M_e \sqrt{N_{LO} N_s} [\sin(\omega_{IF} p_w + \Delta\varphi) - \sin\Delta\varphi]) / \omega_{IF}\}} \times \\
 & \exp\left\{-\left\{N_{PE} t + (N_{LO} + N_s) p_w + \frac{2M_e \sqrt{N_{LO} N_s}}{\omega_{IF}} [\sin(\omega_{IF} p_w + \Delta\varphi) - \sin\Delta\varphi]\right\}\right\} dt - \bar{t}^2. \quad (21)
 \end{aligned}$$

上述积分(20)式和(21)式不存在简单的解析表达式,需要通过数值计算的方法计算均值与方差,用以研究激光脉冲外差探测系统的测距精度及其影响因素。

## 4.2 数值计算结果与分析

由(20)、(21)式可知,影响测距精度的因素有激光回波脉宽、回波强度、噪声、回波位置、本振光强度和拍频。在回波初始电子数大于10时,GM-APD探测器探测概率趋于饱和,分析时选择回波初始电子数范围是 $0.1 \leq N_s \leq 10$ <sup>[20]</sup>。同时为简化分析,设 $\Delta\varphi=0$ 。在矩形回波脉冲近似下,不同回波强度时各因素对精度的影响如图4、5所示。由图4、5可知,回波强度增加,探测器中激发的初始电子数越多,探测概率越高,因此回波光子的到达时间越接近于真实时间,从而测距精度越高,同时距离标准偏差减小,探测数据的离散程度变小。

回波脉宽对精度的影响如图4所示。结果表明,

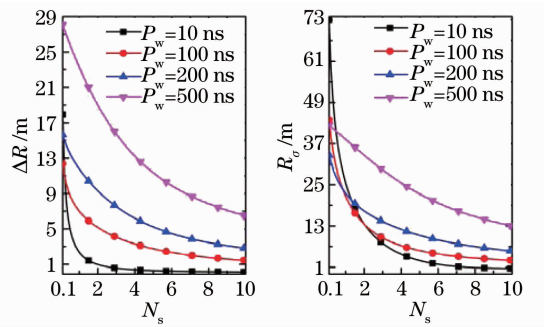


图4 脉宽对(a)距离精度和(b)距离标准差的影响  
Fig. 4 Influence of pulse width on (a) range accuracy and (b) range standard deviation

由于脉宽越窄,激光脉冲能量越集中,对应的探测概率越高。因此脉宽越窄,测距精度更高,距离标准偏差越小。在强回波时,脉宽对精度的影响比弱回波时的影响要小。当 $N_s < 1$ 时,窄脉宽时距离标准偏差反而比宽脉宽时大,即在回波较弱时,探测数据的离散程度变大,即使用窄脉宽在极弱回波时对精度的改善

作用有限。在  $N_s > 4$  时,系统可获得小于 50 cm 的测距精度。因此,对于光子脉冲外差探测系统,强回波强度与窄脉宽有利于获得高的测距精度。

噪声对精度的影响如图 5(a)、(b) 所示可知,噪声越低,测距精度越高,距离标准偏差越小。当回波较弱时,噪声的触发概率变大,因而噪声的影响较大。当回波较强时,外差混频信号的探测概率变大,所以在初始电子数高于 4 时,噪声对测距精度的影响趋于相同。

在距离门内,位于探测景深内不同距离的目标,回波位置  $\tau_d$  也不同。回波位置对测距精度的影响如图 5(c)、(d) 所示。GM-APD 探测器的特点是无法区分噪声与信号光子,因此,探测器也可能被  $\tau_d$

前的噪声所触发。在弱回波时,噪声光子触发探测的概率增加,因此弱回波时回波位置对测距精度的影响较大;回波较强时,回波位置对测距精度的影响变小。然而,在  $N_s > 2$  时,回波位置  $\tau_d$  越大,此时噪声的影响相应变大,因此探测数据的波动性变大,距离标准偏差变大。此外,对于大的  $\tau_d$ ,噪声触发概率增加,且噪声触发的时间位置更接近  $\tau_d$ 。同时,根据 GM-APD 探测器的探测特性,噪声的触发会阻止其后回波光子的触发。因此,平均到达时间将更接近于  $\tau_d$ ,随着  $\tau_d$  的增加,可获得了一个更好的测距精度,且在  $N_s < 2$  时,获得了更好的距离标准偏差。

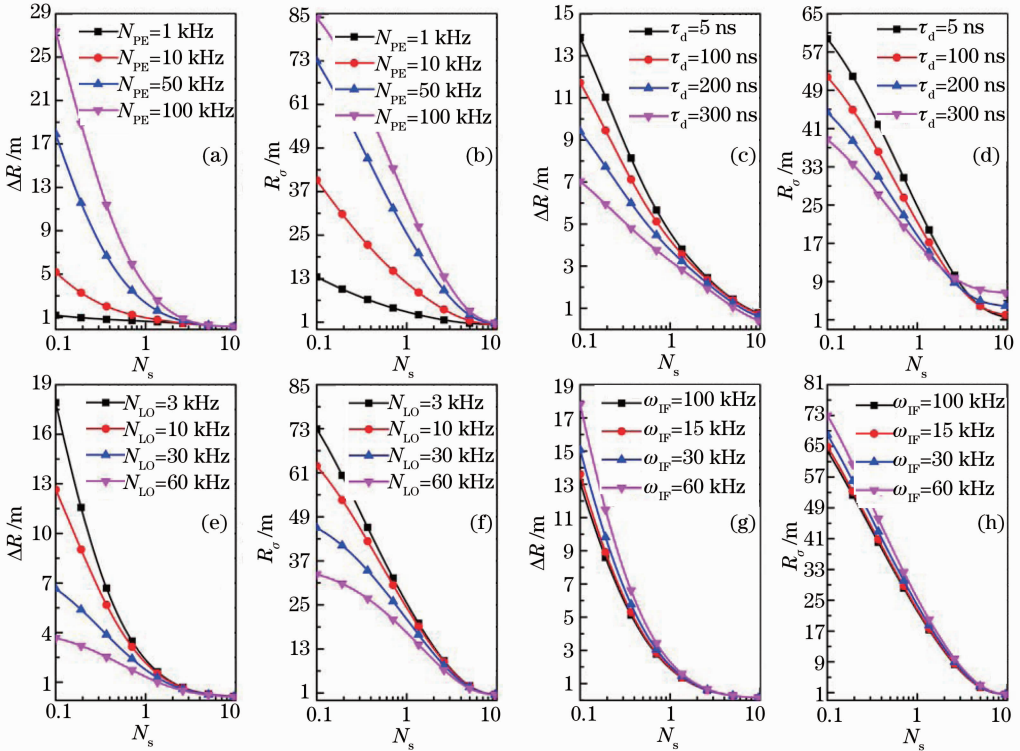


图 5 (a) 噪声对距离精度的影响;(b) 噪声对距离标准差的影响;(c) 回波位置对距离精度的影响;(d) 回波位置对距离标准差的影响;(e) 本振强度对距离精度的影响;(f) 本振强度对距离标准差的影响;(g) 拍频对距离精度的影响;(h) 拍频对距离标准差的影响

Fig. 5 (a) Influence of noise on  $\Delta R$ ; (b) influence of noise on  $R_\sigma$ ; (c) influence of echo position on  $\Delta R$ ; (d) influence of echo position on  $R_\sigma$ ; (e) influence of LD intensity on  $\Delta R$ ; (f) influence of LD intensity on  $R_\sigma$ ; (g) influence of beat frequency on  $\Delta R$ ; (h) influence of beat frequency on  $R_\sigma$

传统外差探测为了获得所需的信噪比,要采用尽可能强的本振光以实现较高的探测灵敏度,但过强的本振信号将引入较大的散粒噪声,在一定程度上降低了探测信噪比。因此,考虑到 GM-APD 探测器安全性要求和散粒噪声特性,在基于 GM-APD 探测器的光子脉冲外差探测系统中,需要使用弱本振

光进行混频<sup>[11,13]</sup>。本振光对测距精度的影响如图 5 (e)、(f) 所示,可见在弱回波时,本振光越强,目标探测概率越大,因而测距精度越高。当初始电子数多于 4 时,可以获得小于 50 cm 的测距精度,且不同强度本振光对精度的影响趋于一致。

拍频是本振光与信号光频率之差,如果目标是

运动的,那么将有多普勒频率叠加在信号频率上,因此对于不同运动速度的目标,其回波信号频率不同,即拍频不同。拍频对测距精度的影响如图 5(g), (h)所示,可知,弱回波时,拍频对测距精度与距离标准偏差的影响较大,拍频越小,可获得越好的测距精度与距离标准偏差,在  $N_s > 4$  时,不同拍频对精度的影响趋于相同。

## 5 结 论

分析了基于 GM-APD 探测器的光子脉冲外差探测系统工作原理,研究了系统探测性能,建立了系统测距精度模型。利用选定系统参数,研究了 6 个影响测距精度的主要因素。研究表明,回波越强,测距精度越高。在弱回波时,回波强度、脉宽、噪声、回波位置和拍频这 6 个因素对测距精度均有较大影响。在强回波时,回波强度和脉宽是影响测距精度的主要因素,其他 4 个因素对测距精度的影响趋于一致。总之,在光子脉冲外差探测系统中,回波强度与脉宽是影响测距精度的关键因素,强回波和窄脉宽更有利于获得高的测距精度。

## 参 考 文 献

- 1 J X Luu, L A Jiang. Saturation effects in heterodyne detection with Geiger-mode InGaAs avalanche photodiode detector arrays [J]. Appl Opt, 2006, 45(16): 3798—3804.
- 2 F Malota. Pulsed CO<sub>2</sub>-laser heterodyne radar for simultaneous measurements of range and velocity [J]. Appl Opt, 1984, 23(19): 3395—3399.
- 3 Zhang Heyong, Peng Shuping, Guo Jin, *et al.*. Experimental research of heterodyne velocity measurement for non-cooperative rotatable target [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 784—790.  
张合勇, 彭树萍, 郭 劲, 等. 非合作转动目标相干测速实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 784—790.
- 4 B F Aull, A H Loomis, D J Young, *et al.*. Geiger-mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging [J]. Lincoln Lab J, 2002, 13(2): 335—350.
- 5 D Renker. Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems [J]. Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect A, 2006, 567(1): 48—56.
- 6 S Johnson, P Gatt, T Nichols. Analysis of Geiger-mode APD laser radars [C]. SPIE, 2003, 5086: 359—368.

- 7 R M Marino, W R Davis Jigsaw: a foliage-penetrating 3D imaging laser radar system [J]. Lincoln Lab J, 2005, 15(1): 23—36.
- 8 M A Itzler, M Entwistle, M Owens, *et al.*. Geiger-mode avalanche photodiode focal plane arrays for three-dimensional imaging LADAR [C]. SPIE, 2010, 7808: 78080C.
- 9 D Stoppa, L Pancheri, M Scandiuzzo, *et al.*. A CMOS 3-D imager based on single photon avalanche diode [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2007, 54(1): 4—12.
- 10 C Niclass, K Ito, M Soga, *et al.*. Design and characterization of a 256 × 64-pixel single-photon imager in CMOS for a MEMS-based laser scanning time-of-flight sensor [J]. Opt Express, 2002, 20(11): 11863—11881.
- 11 L A Jiang, J X Luu. Heterodyne detection with a weak local oscillator [J]. Appl Opt, 2008, 47(10): 1486—1503.
- 12 Liu Lisheng, Zhang Heyong, Guo Jin, *et al.*. Characteristics analysis of the photons arrival time interval of laser beat signal [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0403001.  
刘立生, 张合勇, 郭 劲, 等. 激光拍频信号光子到达时间间隔特性分析 [J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0403001.
- 13 Zhang Heyong, Liu Lisheng, Zhao Shuai, *et al.*. Analysis of signal to noise ratio for laser heterodyne with weak local oscillator based on multi-pixel photon counter [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308008.  
张合勇, 刘立生, 赵 帅, 等. 基于多像素光子计数器的弱本振激光外差信噪比分析 [J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308008.
- 14 M S Oh, H J Kong, T H Kim, *et al.*. Reduction of range walk error in direct detection laser radar using a Geiger mode avalanche photodiode [J]. Opt Commun, 2010, 283(2): 304—308.
- 15 Wang Fei, Zhao Yuan, Sun Xiudong, *et al.*. Theoretical analysis of influence of laser signal strength on range precision in single photon ranging [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2771—2775.  
王 飞, 赵 远, 孙秀冬, 等. 激光脉冲强度对于盖革模式单光子探测测距精度影响的理论研究 [J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2771—2775.
- 16 Wu Fan, Zhang Yong, Zhao Yuan, *et al.*. Improved range-gating 3D imaging laser radar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2388—2392.  
吴 凡, 张 勇, 赵 远, 等. 改进的距离选通 3D 成像激光雷达系统 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2388—2392.
- 17 P Andersson. Long-range three-dimensional imaging using range-gated laser radar images [J]. Opt Eng, 2006, 45(3): 034301.
- 18 O Steinvall, T Chevalier. Range accuracy and resolution for laser radars [C]. SPIE, 2005, 5988: 598808.
- 19 J W Goodman. Statistical Optics [M]. New York: Wiley, 1985. 473—485.
- 20 D G Fouche. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors [J]. Appl Opt, 1997, 42(2): 5388—5398.

栏目编辑: 张 腾