

# 非合作目标光子计数激光测距技术研究

田玉珍<sup>1,2</sup> 赵帅<sup>1,2</sup> 郭劲<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 为了实现对远距离非合作目标距离的精确测量, 将光子计数测距法与脉冲测距法相结合, 利用多像素光子计数器(MPPC)进行了远距离非合作目标测距实验研究。在实验室内模拟远距离非合作目标返回的微弱信号, 利用 MPPC 接收。通过分析返回光子信号特性, 研究目标反射回随机光子的统计分布特性; 利用不同的算法计算测距起始和终止脉冲间隔, 分析不同算法对测距精度的影响。实验室利用 MPPC, 4 GHz 采样率示波器和脉宽为 5 ns 的脉冲激光器进行测距实验, 获得 7220 个脉冲信号, 统计结果验证了目标返回信号为泊松分布; 利用恒比鉴别法得到了最优测距结果: 测距结果与被测距离偏差 2.8 cm, 加权均值标准差为 0.9 cm, 而固定幅值法和自相关法得到的测距结果偏差都超过了 40 cm。通过分析各算法与恒比鉴别法之间的差异, 给出了不同算法产生较大偏差的原因。

**关键词** 测量; 激光测距; 光子计数; 非合作目标; 多像素光子计数器

中图分类号 P208.5 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0514002

## Analysis of Non-Cooperative Target Photon Counting Laser Ranging

Tian Yuzhen<sup>1,2</sup> Zhao Shuai<sup>1,2</sup> Guo Jin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to analyze the faraway non-cooperative target, the research of faraway non-cooperative target ranging experiment is proceeded by using multi-pixel photon counter (MPPC) where photon counting laser ranging method and pulse ranging method is combined. Weak signal reflected by faraway non-cooperative target MPPC is simulated in the laboratory. By analyzing the return photons which are detected by MPPC, the distribution of photons reflected from the target is studied. The interval of start and stop pulses is calculated with different algorithms, and the influence of these algorithms on the ranging result is analyzed. 7220 pulses have been obtained by MPPC, 4 GHz sample rate oscillograph and pulsed laser with 5 ns pulse width. The statistic results prove that the return signals obey Poisson distribution. The optimal ranging result has been obtained by constant fraction discrimination method: the deviation of ranging result and measured distance is 2.8 cm, the weighted standard deviation is 0.9 cm, and the ranging result deviation obtained by constant amplitude method and autocorrelation method are both over 40 cm. The reasons why different methods do not produce the same results are given by comparing the constant fraction discrimination method with other algorithms.

**Key words** measurement; laser rangefinding; photon counting; non-cooperative target; multi-pixel photon counter

**OCIS codes** 140.3490; 280.3400; 150.5670

## 1 引 言

随着激光技术和探测器的发展激光测距技术日新月异, 测距精度在不断地提高, 从 20 世纪六七十

年代的米级精度, 发展到现在厘米级甚至更高的精度。激光测距按照测距原理的不同可以分为三类<sup>[1-3]</sup>: 三角测距法、飞行时间测距(脉冲测距、相移

收稿日期: 2010-11-03; 收到修改稿日期: 2010-11-23

基金项目: 中国科学院三期创新项目(098Y30C100)资助课题。

作者简介: 田玉珍(1985), 男, 硕士研究生, 主要从事激光主动探测方面的研究。E-mail: tyzaizl@gmail.com

导师简介: 郭劲(1964), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电对抗方面的研究。E-mail: guojin\_1964@126.com

测距及连续波调制测距)法及光子计数测距法。其中光子计数测距法是一种基于量子和统计理论的测距体制,从本质上区别于其他两种方法。它将由目标返回的信号看作是离散的光子,记录返回光子个数,通过分析返回光子数的统计特性给出目标距离信息。光子计数测距法可以实现对光子级返回信号的探测,具有极高的灵敏度;而且测距结果是通过统计分析得到,能够有效克服噪声对测距的影响,抑制虚警率,提高测距精度。

对于激光测距技术的研究,在各国学者的努力下,利用皮秒激光器及高速采样电路,使得测距精度达到了厘米甚至毫米级。Kilpela 等<sup>[4]</sup>利用脉宽为 35 ps 的半导体调 Q 激光器,在 0.5~34.5 m 的测距中,单脉冲测量实现了 2 mm 的误差。Ailisto 等<sup>[5]</sup>利用脉冲飞行时间激光测距技术,研制的非扫描成像系统,实现对反射率变化目标 50 m 内的成像,对高反射率目标 100 m 内的成像。而且,在 50 m 成像实验中,对 100 个脉冲进行了平均,测得距离标准差为 1.4 cm。Massa 等<sup>[6-8]</sup>将时间相关单光子计数技术与脉冲飞行时间激光测距相结合,利用脉宽为 10 ps 的脉冲半导体激光器和单光子计数器以及标准单光子计时电路实验中对 1 m 的距离反复测量,误差在 30 μm。在随后的研究中,Buller 等<sup>[9]</sup>将时间相关单光子计数技术已经应用于飞行时间测距和成像中,利用点对点光子计数成像系统对非合作目标进行了成像实验,320 m 成像获得了 1.7 cm 的距离分辨率。在克服脉冲飞行时间激光测距中固有的由时间抖动引起的误差研究中,Min 等<sup>[10]</sup>利用总光子数和统计的方法校正脉冲到达时间间隔,将实验中由脉冲抖动引起的误差从 14.36 cm 降到了 2.14 cm。杨馥等<sup>[11]</sup>提出了一种将伪随机码调制光纤激光器和单光子计数结合的新测距方法,测距分辨率达到了 15 cm。雷琳君等<sup>[12]</sup>研究的用于星载激光测距仪的高精度时间间隔测量单元,采用数字计数法结合数字延迟线插入法的技术,在 0.5~10 km 的测量距离范围内,时间分辨率达到了 500 ps,标准差小于 270 ps。

本文将结合脉冲测距法简单易行和光子计数法<sup>[13]</sup>高灵敏度的特点,对返回能量为光子级的远距离非合作目标测距能力进行研究,利用多像素光子计数器(MPPC)进行远距离非合作目标模拟测距实验,并且利用不同时间间隔判别算法处理实验结果,分析其对测距精度的影响。

## 2 实验装置及原理

### 2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,其中 PD 为高速光电二极管,M 为平面镜,BS 为分束镜,attenuator(1,2)为中性衰减片,NBF 532 nm(10 nm)为窄带滤光片。激光光束经分束镜后,一束光被分束镜反射照射到目标,另一束光直接入射到 MPPC 上(Hamamatsu C10507-1F-025U),形成计时起始信号,发射到目标的激光由目标反射后,经接收光学系统和窄带滤光片入射到 MPPC,形成计时终止信号。利用示波器(Agilent MSO7104B,1 G 带宽,4 GHz 采样率)观测并记录起始和终止光电脉冲信号,在激光器出光口放置高速光电探测器(Alphalabs UPD-200UP),作为示波器的触发信号。实验中所用激光器为 Nd:YAG 532 nm 脉冲激光器,脉宽为 5 ns,发射功率可调。利用衰减片 1 衰减起始信号光,保护探测器 MPPC,利用衰减片 2 衰减反射回光束能量,将回波信号能量降低到光子级,模拟远距离测距返回的微弱光子信号。

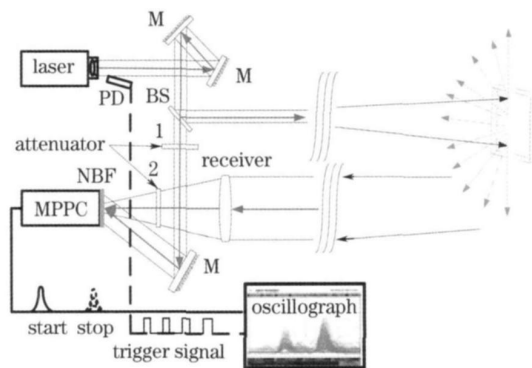


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental set up

实验中使用的 MPPC,实质上是一种硅光电倍增管(Si PM)。这种光子计数器是由多个工作在盖革模式<sup>[14]</sup>下的雪崩光电二极管(APD)像素并联组成。每个 APD 像素在探测到光子后都会输出脉冲信号,而 MPPC 的输出为所有 APD 像素输出信号的总和。具有高灵敏度,可以用来探测极微弱信号( $10^{-18}$  J,光子级信号)。由于工作在盖革模式下的 APD 在探测到光子后,在响应下一个入射光子之前会经历一段不响应入射光子的时间,所以需要一段恢复时间才能继续工作,称这段时间为死时间。实验室所用 MPPC 其死时间约为 20 ns,信号脉冲全宽为 30 ns(图 2),从响应入射光子完成一次探测需要 50 ns,其工作频率为 20 MHz。图 2 为实验室所

用探测器及其对入射光子的响应脉冲, 其中  $p_e$  为等效光子。可看出 MPPC 对于不同的入射光子数的响应, 只是幅值发生了变化, 而脉宽并没有变化, 且

实验室测得 MPPC 脉冲上升时间(10% ~ 90%) 均值为 9.06 ns。

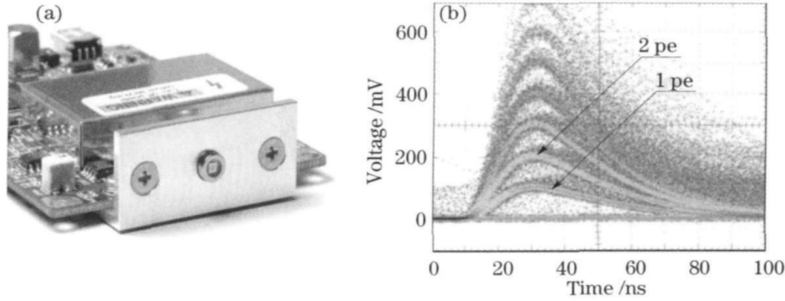


图 2 多光子计数器(a) 及入射光子脉冲信号(b)

Fig.2 MPPC (a) and response pulses of incident photons (b)

### 2.2 实验原理

在远距离非合作目标测距中, 随着距离的增加反射回信号极其微弱, 由离散光子组成, 此时返回信号的能量是随机分布的, 这样就不能用宏观方法进行分析返回信号, 对于随机信号只能采用统计的方法进行分析。由漫反射目标反射回的激光信号强度随机分布, 而 MPPC 吸收入射光子产生主电子<sup>[15, 16]</sup>的过程也是随机过程, 所以造成了主电子的产生服从负二项式分布<sup>[17, 18]</sup>。当负二项式分布中的  $d/M \rightarrow 1$  ( $d$  为信号自由度,  $M$  为测量时间内的主电子平均值) 时, 负二项式分布简化为泊松分布, 在 Fouche<sup>[15]</sup> 的文章中证明使用负二项式分布来代表主电子分布时使用泊松分布近似主电子统计分布基本无区别。所以假设  $d/M \rightarrow 1$ , 即 MPPC 在每个探测周期  $T$  探测到的入射光子服从泊松分布。

假设推导光子计数测距单脉冲返回平均光子  $N_r$ 。

激光器传输距离  $D$  后, 到达目标处的能量衰减为原来的  $\exp(-D)$  倍, 此时能量面密度变为

$$\frac{E_{t1} \exp(-D)}{S} = \frac{4E_{t1} \exp(-D)}{D^2 \tau^2}, \quad (2)$$

式中  $S$  为距离  $D$  处激光光斑面积。假设目标为粗糙无规则漫反射体, 漫反射系数为  $\rho$ , 则由目标反射回的能量  $E_r$  为

$$E_r = \frac{4E_{t1} \exp(-D) A_s \cos \theta}{D^2 \tau^2}. \quad (3)$$

同理, 这部分能量在向后反射时与系统发射时要经过相似的过程: 大气衰减、能量密度变化、部分被截获, 所不同的是这时能量向整个半球空间发散。由此可推算出回波能量为

$$E_r = \frac{4E_{t1} \exp(-D) A_s \cos \theta}{D^2 \tau^2} \frac{A_r \exp(-D)}{2 D^2}. \quad (4)$$

若用功率的形式表示, 上式可变换为

$$P_r = \frac{4P_{t1} \exp(-D) A_s \cos \theta}{D^2 \tau^2} \frac{A_r \exp(-D)}{2 D^2}, \quad (5)$$

这就是测距基本方程, 其物理意义为: 峰值功率为  $P_{t1}$  发散角为  $\tau$  的激光束, 穿过大气到达距离为  $D$  处的目标, 经目标漫反射后, 由接收系统接收到的光功率为  $P_r$ 。由  $E = nh\nu$  可以将(4) 式改写成返回光子数与发射激光能量的关系为

$$N_r = \frac{4E_{t1} \exp(-D) A_s \cos \theta}{D^2 \tau^2} \frac{A_r \exp(-D)}{2 D^2} \frac{1}{hc} = \frac{2E_{t1} \exp(-2D) \cos \theta A_s A_r}{D^4 \tau^2 hc}, \quad (6)$$

对于大的漫反射目标, 即激光能量全部被漫反射目

$P(k, T) = \frac{k \exp(-\lambda)}{k!}$ , ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ) (1)  
 式中  $\lambda$  是探测周期内的平均光子数,  $k$  为一次探测的光子数。(1) 式表示在一次探测实验中, 探测到  $k$  个入射光子的概率为  $P(k, T)$ 。

为了研究远距离光子计数测距, 利用脉冲测距方程<sup>[19]</sup> 推导光子计数测距中一个激光脉冲返回的平均光子数。在脉冲飞行时间激光测距中, 设被测距离为  $D$ , 激光器单个脉冲的能量为  $E_{t1}$ , 功率为  $P_{t1}$ , 接收系统接收到的能量和功率分别为  $E_r$  和  $P_r$ , 激光束的发散角为  $\tau$ , 发射光学系统的透射率为  $\tau$ , 激光束透过大气时单位长度的衰减系数为  $\alpha$ , 假设为常数, 所瞄准的目标面积为  $A_s$ , 且被照射部分表面法线与入射光束的夹角为  $\theta$ , 被测目标的距离为  $D$ , 接收系统的口径和透射率分别为  $A_r$ ,  $\tau_r$ 。根据这些

标截获并反射, 则返回能量及光子数方程为

$$E_r = \frac{E_{t \rightarrow r} \exp(-2D) A_r}{2 D^2}, \quad (7)$$

$$N_r = \frac{E_{t \rightarrow r} \exp(-2D) A_r}{2 D^2 h c}. \quad (8)$$

由(8)式可以确定光子计数测距单脉冲返回的平均光子  $N_r$ , 之所以称为平均光子数, 是因为当反射回信号光是离散光子时, 其能量分布是随机的, 但是如前所述服从统计规律。

由于引起激光测距误差的因素较多, 分析起来较为复杂。为了简化, 根据实验室的实际情况作如下假设: 实验中使用大漫反射目标, 即利用(8)式计算返回平均光子数; 利用衰减片模拟大气影响, 即  $\exp(-2D) = a$  ( $a$  为衰减片透射率); 目标漫反射系数均匀; 激光束是轴对称的, 在远处的能量分布是均匀的; 接收系统和发射系统的光轴的平行度很高; 接收视场足够大; 没有各种外界干扰, 背景辐射等均忽略不计。实验装置的参数为: 激光器重频为 100 Hz, 波长  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , 发射能量  $E_t = 3.81 \text{ mJ}$ , 发射光学系统透射率  $t = 0.75$ , 接收光学系统透射率  $r = 0.70$ , 衰减片透射率  $a = 0.0004$ , 接收光学系统面积  $A_r = 3.84 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ , 漫发射目标反射率  $\rho = 0.80$ , 普朗克常量  $h = 6.626 \times 10^{-34}$ , 光速  $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$ , 模拟测量距离  $D = 25 \text{ km}$ 。根据假设及各个参数, 由(8)式可以解得每个激光脉冲返回的平均光子数为

$$N_r = \frac{E_{t \rightarrow r} a A_r}{2 D^2 h c} = 1.68$$

所以对 25 km 处目标测距, 平均每个脉冲返回光子数约为 1.68 个。

### 3 实验结果及分析

实验室中激光行走的实际距离为 20.300 m, 在暗室中进行测量实验, 对每个激光脉冲利用 MPPC 探测发射和返回信号光子, 由示波器对 MPPC 信号采样得到脉冲序列  $x(n)$ 。4 G 采样率, 采样时间 200 ns, 采样点间隔 0.25 ns, 每个脉冲序列 800 个采样点。测量连续测量 380 个脉冲, 分别进行了 19 次测量实验, 共记录 7220 个脉冲序列。

#### 3.1 返回光子统计分布分析

图 3 是实验中 MPPC 对返回光子的脉冲响应, 其中图 3(a) 是某一个脉冲返回 1 个光子的脉冲信号, 图 3(b) 是一段时间内对多个脉冲返回光子的记录, 不同的脉冲幅值代表着不同的入射光子数, 每个

脉冲半峰全宽(FWHM)为 20 ns。下面对非合作目标返回信号测距实验的 7220 个脉冲的返回光子数进行统计分析。

图 4(a) 为实验中记录的每个脉冲返回的光子数, 图 4(b) 是对上图的统计分析。图 4(b) 中的归一化实验数据是对实验中 7220 个脉冲的返回光子以 1 个光子为间隔进行统计, 然后归一化(除以 7220), 求出实验所得光子分布律, 统计均值为 1.65; 而理论计算值是根据(1)式的泊松分布计算所得, 均值为 1.68 时光子理论分布规律。从图中可以看出实验数据与理论计算非常吻合, 为了更好的研究返回光子的分布规律, 分析光子分布与脉冲数关系。图 5 是不同脉冲光

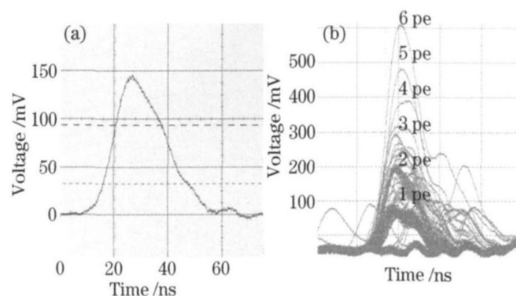


图 3 (a) 单脉冲返回信号与 (b) 多脉冲积累信号

Fig. 3 (a) Return information of single pulse and (b) accumulation information of multi-pulses with different incident photons

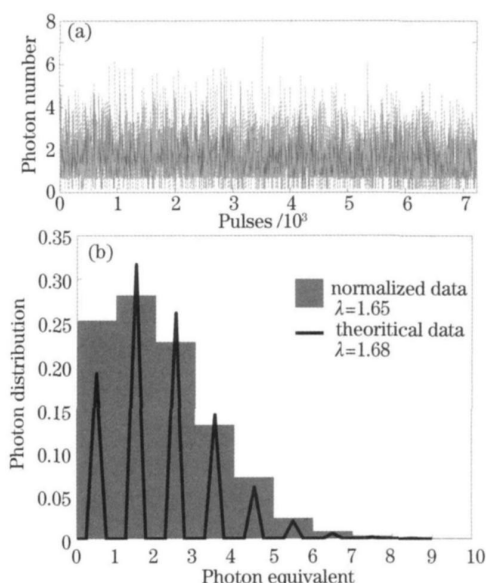


图 4 光子分布统计图。(a) 每个脉冲的光子数分布图, (b)图(a)的统计分析

Fig. 4 Distribution of return photons. (a) photon number distribution of every return pulse, (b) statistical results of (a)

子计数统计分布与泊松分布理论计算值的对比, 图中分别给出了 20 个脉冲、380 个脉冲、1900 个脉冲和

3800 个脉冲所记录返回光子的统计结果, 而根据泊松分布计算的理论值, 仍以 1.68 为均值。

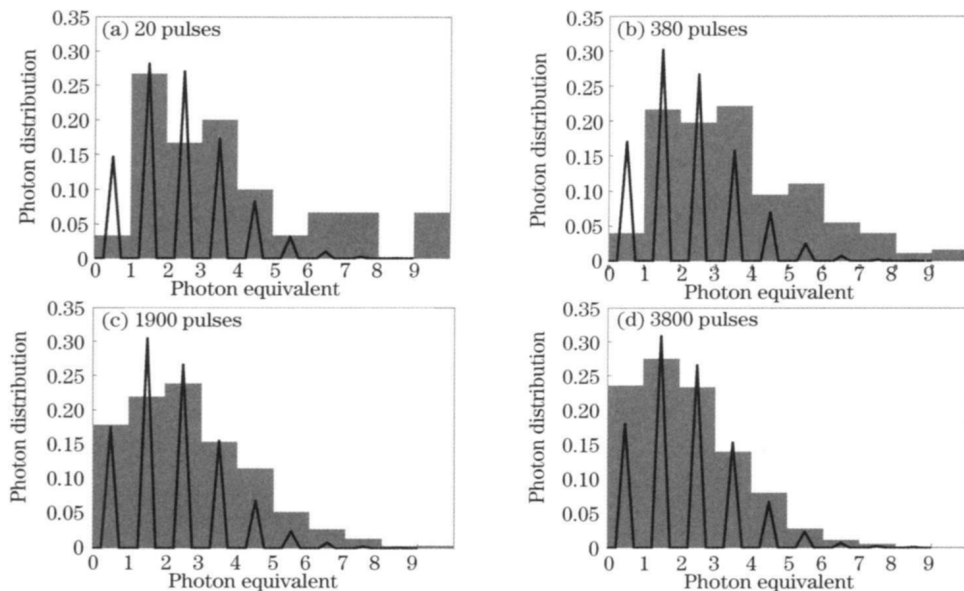


图 5 不同脉冲光子统计分布图

Fig. 5 Statistical distribution of photon with different pulses

从图 4 和图 5 可以看出随着实验脉冲数的增加, 光子的分布规律渐趋稳定, 前 20 个脉冲和 380 个脉冲所记录的光子分布律相对比较杂乱, 与理论偏差较大, 无法判断统计结果所服从的分布规律。随着测量次数的增加, 在 1900 个脉冲时, 虽然与理论值有一定的偏差, 但是可以确定为泊松分布, 从 3800~7220 个脉冲的分布率对比可以发现, 实验记录的光子分布率几乎没有变化, 而且与理论值的偏差相对较小。而实验与理论的偏差主要来自 0 个光子的分布律, 实验结果高于理论值, 这是由于理论计算做了很多假设, 忽略了实验中的一些实际因素, 如 MPPC 存在一定的量子效率, 不能百分之百响应返回光子, 这就导致 0 个光子的实验统计分布律增加。

实验中光子分布随着脉冲数增加趋于稳定, 这种变化与 2.2 节做出的假设, 离散光子是随机分布, 但服从统计规律相吻合, 随着实验次数的增加, 就可以得到其内在规律。而实验统计均值的确定, 是对归一化实验数据做泊松拟合, 求得拟合均值为 1.65, 与理论计算所得的 1.68 非常接近。因此可以确定远距离模拟测距实验中, 返回光子的分布服从理论假设, 并且实验所测返回光子均值与理论计算返回光子均值基本一致。

### 3.2 测距结果与分析

根据实验原理, 通过确定每个脉冲开始信号和返回信号的脉冲时间间隔, 即光子飞行时间, 就可以确定被测距离。图 6 是单脉冲与多脉冲测距实验结果。

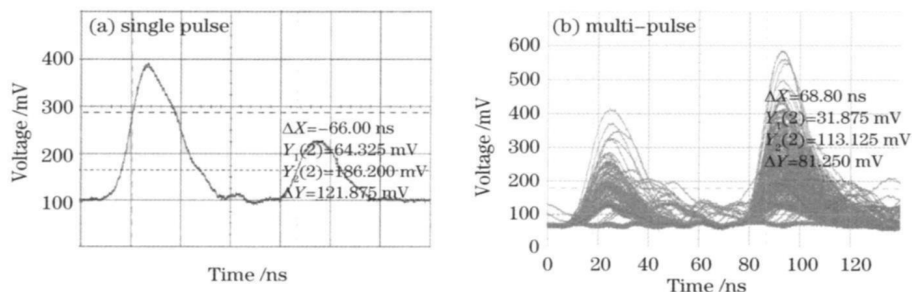


图 6 测距实验结果

Fig. 6 Experimental results of rangefinding

脉冲间隔计时的精确决定着测距的精度, 而脉冲间隔计时又被脉冲起点的判别所决定。由上节对

返回光子统计分布可知, 并不是每个脉冲都会探测到光子, 而且由于起始信号也是以光子计数方式进

行探测,所以某个激光脉冲可能会出现没有起始信号或终止信号,甚至两个信号都没有的情况。因此光子计数测距不能像普通的激光脉冲飞行时间测距法,直接利用脉冲时间间隔分析算法对脉冲数据分析。对于光子计数测距法,首先通过多脉冲积累消除没有信号对计时的影响,然后再分析脉冲间隔。传统的脉冲间隔计时将首先确定每个脉冲的起点,常用脉冲起点判别算法<sup>[1]</sup>有:固定幅值法、起点法、积分法及恒比鉴别法等。时间相关单光子计数测距中常用自相关法确定脉冲间隔。利用理想波形补偿由幅值和上升沿造成的计时游走误差的恒比鉴别法(CFD),常被用在飞行时间激光测距中。为了得到光子计数法测距最优结果,本文将采用固定幅值法、恒比鉴别法及自相关法确定时间起点,分析判别算法对测距精度的影响。所谓自相关法,就是省去判定起始和终止信号起点过程,直接对脉冲信号做自相关运算:

$$\hat{r}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)x^*(n+k),$$

$$k = 0, 1, 2 \quad (9)$$

上式为自相关序列的渐近无偏计算公式,其中  $x^*(n-k)$  是对序列取复共轭,由于采样序列是实序列,所以  $x^*(n-k) = x(n-k)$ ,  $N = 800$ 。由于起始和终止信号的相似性,使得和脉冲序列的自相关估计在零时刻之外出现了极大值点,所以极大值点的位置就是两个脉冲的间隔。在运用不同算法分析脉冲时间间隔过程中以 10 个脉冲为一组进行求和,以抵消没有信号对计时的影响,称 10 个脉冲的求和结果为和脉冲。运用不同算法分析时间间隔时,做如下规定:固定幅值法,以 3 个光子为起点阈值,计算时间间隔;恒比鉴别法,首先平滑和脉冲,将运算结果作为理想脉冲,再以脉冲最大值的 50%, 80% 和 90% 为起点阈值,计算时间间隔。

由上文所述三种算法,分析实验所得 7220 个脉冲序列时间间隔。以和脉冲返回信号的光子数作为每个脉冲所得时间间隔的权重,因为返回光子数越多其携带的光子飞行时间信息越可靠。图 7 给出了三种算法求得的脉冲时间间隔分布统计图,以及权重分布图。

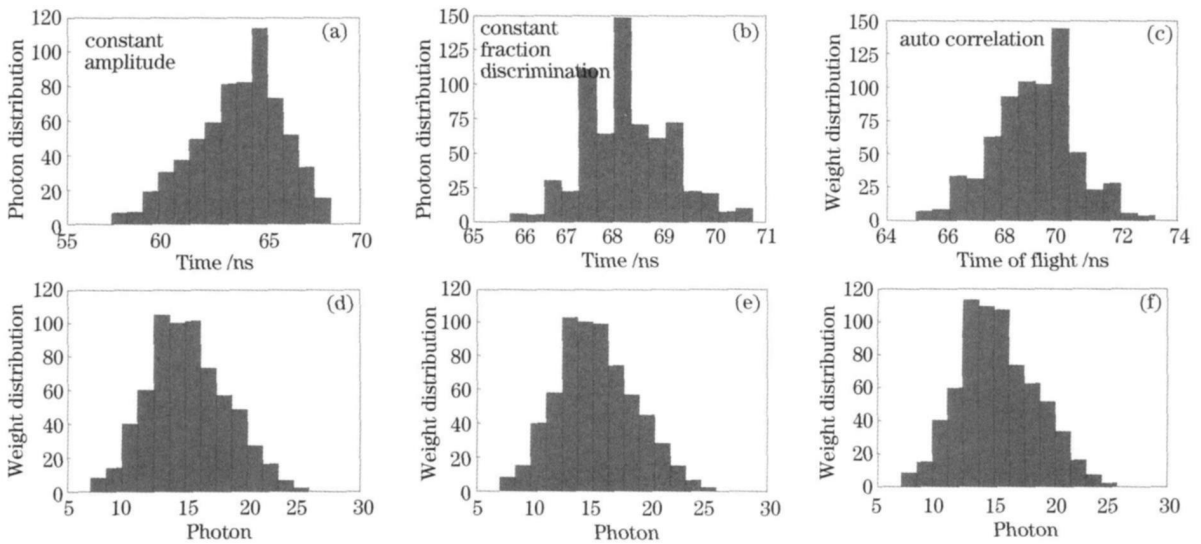


图 7 不同算法飞行时间分布[ (a), (b), (c) ]和相应时间对应的权重分布[ (d), (e), (f) ]

Fig. 7 Time of flight distribution by different algorithms (a), (b), (c) and the weight distribution of corresponding time (d), (e), (f)

通过不同算法得到的脉冲时间间隔,即光子飞行时间分布图可以看出,固定幅值法求得结果整体比其它两种方法所得小,而且固定幅值法求得的飞行时间序列的极差(11.25 ns)比其他两种算法所得的都大(恒比鉴别法 5 ns、自相关法 8.25 ns,极差就是序列最大值减最小值)。将光子飞行时间序列转化为距离信息,表 1 列出了三种不同算法计算所得

被测距离的均值、加权均值;标准差、加权均值标准差;距离极差值及与实际距离的偏差。其中 ConsAmp 为固定幅值法,CFD 为恒比鉴别法,AutoCorr 为自相关法,Mean 为均值,Mean.W 为加权均值,Std. 为标准差,Std.W 为加权均值标准差,Range 为极差,Bias 为均值/加权均值与真值偏差。

从表 1 中可以看出,固定幅值法所求结果与真

值相比较小,且有较大偏差,而恒比鉴别法在三种算法中精确度是最高的,特别是以80%为起点阈值时,将绝对误差降到了2.8 cm,而以50%和90%为起点阈值时,测距精度下降,测距均值标准差增大。自相关法求得的均值和偏差都介于固定幅值和恒比

鉴别法之间。对比测距均值和加权均值,标准差和加权均值标准差,可以看出权值对测距均值几乎没有影响,但是对加权均值标准差的影响极大,从几十厘米减小到几厘米甚至几毫米,所以权值可以使测距值更加稳定。

表1 不同算法测距信息( $D=20.300\text{ m}$ )Table 1 Ranging information with different algorithms ( $D=20.300\text{ m}$ )

Algorithm	Mean/m	Mean. W/m	Std./m	Std. W/m	Range/m	Bias/m
ConsAmp	19.104	19.127	0.675	0.026	3.373	-1.20/-1.17
CFD50%	20.458	20.445	0.268	0.010	1.499	0.158/0.145
CFD80%	20.338	20.328	0.236	0.009	1.274	0.038/0.028
CFD90%	20.378	20.369	0.246	0.009	1.349	0.078/0.069
AutoCorr	20.709	20.708	0.421	0.016	2.473	0.409/0.408

#### 4 时间间隔判别算法对测距结果的影响分析

使用固定幅值法获得的测距结果较真值小,而且极差大,造成这种现象的主要原因是由于探测器接收到的发射信号和返回信号光子数是随机的,所以起始信号和终止信号的幅值相差会较大。比如假设10个脉冲求和后起始信号有5个光子,而终止信号有15个光子返回,以3个光子为起点阈值,相当于起始信号60%处为起点,终止信号20%处为起点。这就相当于压缩了脉冲间隔,使光子飞行时间减小了一个信号脉冲整个上升沿的40%,根据实验室所测MPPC上升时间(10%~90%)9.06 ns可知,约减小了4.5 ns,即产生了约1.3 m的偏差。而对于起始信号和终止信号光子数相当的脉冲序列,得到的测距结果又比较准确。信号光子数的波动就造成了测距结果有较大的标准差和极差,从表1也可以看到这种差异。

根据算法,自相关估计在零时刻出现全局极大值,在起始信号脉冲极大值移动到终止信号极大值点时,自相关估计出现了第二个极大值点,计算零点极大值到第二极大值的距离就可以得到脉冲间隔。这个求解过程可以理解为,以100%为阈值起点的恒比鉴别法,但是由于开始和结束信号脉冲波形的波动,使得自相关法得到的测距结果相对恒比鉴别法有较大的标准差和极差。

综合考虑本文采用的三种算法,恒比鉴别法具有判别结果准确稳定的特点,但是它要求首先对脉冲序列进行平滑修正,得到理想波形;固定幅值法具有快速简单实时的特点,但是判别结果误差较大;自相关法运用在脉冲间隔判别中比较新颖,且判别结

果有一定的准确度,但是自相关运算比较费时。如果对实时性要求不是很高,恒比鉴别法不失为一种优秀的算法。

#### 5 结 论

通过实验室模拟,利用MPPC对远距离光子计数激光测距能力进行了详细研究。利用MPPC,4 GHz采样率示波器和5 ns脉宽脉冲激光器,对远距离非合作目标返回的微弱信号进行了实验室模拟,对目标反射回随机光子的统计分布,进行了实验验证分析。实验所得数据较好地吻合了文中给出的泊松统计分布模型。利用三种不同的算法分析了测距开始和终止信号脉冲间隔,对比所得结果,由恒比鉴别法得到了与其它算法相比测距偏差最小的结果,偏差为2.8 cm,测距结果加权均值标准差为0.9 cm。通过对三种算法的分析,得出了相同脉冲不同算法产生不同结果的原因。

#### 参 考 文 献

- 1 M. C. Amann, Thierry Bosch, Marc Lescure *et al.*. Laser ranging a critical review of usual techniques for distance measurement[J]. *Opt. Engng.*, 2001, 40(1): 10~19
- 2 Song Jianhui, Yuan Feng, Ding Zhenliang. High precision time interval measurement in pulsed laser ranging[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(5): 1046~1050  
宋建辉,袁峰,丁振良.脉冲激光测距中高精度时间间隔的测量[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5): 1046~1050
- 3 Jia Fangxiu, Ding Zhenliang, Yuan Feng. Phase-shift laser range finder receiver system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(10): 2377~2384  
贾方秀,丁振良,袁峰.相位法激光测距接收系统[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10): 2377~2384
- 4 Ari Kilpela, Riku Pennala, Juha Kostamovaara. Precise pulsed time-of-flight laser range finder for industrial distance measurements [J]. *Review of Scientific Instrument*, 2001, 72(4): 2197~2202

- 5 H. Ailisto, V. Heikkinen, R. Mitikka *et al.*. Scannerless imaging pulse laser range finding [J]. *Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2002, **4**: 337~ 346
- 6 J. S. Massa, A. M. Wallace, G. S. Buller *et al.*. Laser depth measurement based on time-correlated single-photon counting[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(8): 543~ 545
- 7 M. Umasuthan, A. M. Wallace, J. S. Massa. Processing time-correlated single photon counting data to acquire range images [J]. *IEEE Image Signal Process*, 1998, **145**(4): 237~ 243
- 8 John S. Massa, Gerald S. Buller, Andrew C. Walker. Time-of-flight optical ranging system based on time-correlated single-photon counting[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(31): 7298~ 7304
- 9 Gerald S. Buller, Andrew M. Wallace. Ranging and three-dimensional imaging using time correlated single-photon counting and point-by-point acquisition [J]. *IEEE Quantum Electron.*, 2007, **13**(4): 1006~ 1015
- 10 Min Seok Oh, Hong Jin Kong. An improvement on accuracy of laser radar using a Geiger-mode avalanche photodiode by time-of-flight analysis with Poisson statistics [J]. *Laser Radar Technology and Applications*, 2010, **7684**: 76841-1~ 10
- 11 Yang Fu, He Yan, Zhou Tianhua *et al.*. Simulation of spaceborne altimeter based on pseudorandom modulation and single-photon counting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 21~ 26  
杨 馥, 贺 岩, 周田华等. 基于伪随机码调制和单光子计数的星载测高计仿真[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 21~ 26
- 12 Lei Linjun, Yang Yan, Chen Weibiao. High-accuracy time-interval-unit for spaceborne laser range finder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1422~ 1426  
雷琳君, 杨 燕, 陈卫标. 星载激光测距仪的高精度时间间隔测量单元[J]. 中国激光, 2007, **34**(10): 1422~ 1426
- 13 Zhao Dong, Liu Liren, Wang Jiming *et al.*. A laser ranging method based on photon statistics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1091~ 1096  
赵 栋, 刘立人, 王吉明等. 基于光子数目比较的激光测距法[J]. 光学学报, 2006, **26**(7): 1091~ 1096
- 14 Zhao Feifei, Zhao Baosheng, Zhang Xinghua *et al.*. Properties of germanium thin film and its application in photon counting imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3237~ 3245  
赵菲菲, 赵宝升, 张兴华等. Ge 薄膜特性及其在光子计数成像系统中的应用[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3237~ 3245
- 15 Wang Fei, Zhao Yuan, Zhang Yu *et al.*. Theoretical analysis of influence of laser signal strength on range precision in single photon ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2772~ 2777  
王 飞, 赵 远, 张 宇等. 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): 2772~ 2777
- 16 D. G. Fouche. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(27): 5388~ 5398
- 17 J. W. Goodman. *Statistical Optics*[M]. John Wiley and Sons Inc, 1985
- 18 J. W. Goodman. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications*[M]. Berlin: Roberts and Company, 2007
- 19 Zhang Leihong, Yang Yan, Zang Huaguo *et al.*. Reflective characteristics of target in laser range finder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1001~ 1004  
张雷洪, 杨 艳, 臧华国等. 目标反射特性对激光测距的影响[J]. 中国激光, 2008, **35**(7): 1001~ 1004