

# 激光测距多光子分立时刻的反卷积解算方法

薛 莉<sup>1,2</sup> 李 明<sup>1,2</sup> 李希宇<sup>1,2</sup> 王亮亮<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

<sup>2</sup>空间目标测量重点实验室, 北京 100094

**摘要** 针对多像素光子计数器(MPPC)各像素雪崩电流并联输出、存在光子间隔过小导致脉冲变形而无法分辨光子时刻的问题,结合光子分布与输出脉冲波形,通过数学反卷积,获得了激光测距接收端各探测光子分立时刻的解析解,从而实现了观测量倍增,有助于有效信号的分辨及提取。该方法将单脉冲响应函数近似为高斯形式,分析了MPPC时间抖动的影响,研究了在时间抖动为50~250 ps范围内,从三个入射光子输出的变形脉冲中解算出的分立时刻,得到分立时刻随光子间隔的统计分布图和峰谷分辨率随光子时间间隔、MPPC时间抖动的变化关系。并验证了在1 s观测时间内,千赫兹激光测距系统经反卷积解算前后观测量对比效果。分析结果表明,当统计分布中峰谷分辨率大于10时,各光子分立时刻可以有效分辨,该方法的时间分辨力达到0.2~0.7 ns。

**关键词** 激光光学; 光子分立时刻; 反卷积; 千赫兹激光测距; 多像素光子计数器

中图分类号 P228.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0702007

## Multi-Photon Time-of-Arrival Resolution Enhancement by Deconvolution in Laser Ranging

Xue Li<sup>1,2</sup> Li Ming<sup>1,2</sup> Li Xiyu<sup>1,2</sup> Wang Liangliang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Space Object Measurement, Beijing 100094, China

**Abstract** Avalanche photo diodes (APDs) are parallel connected in multi pixel photon counter (MPPC). The output pulse is distorted when photon arrival time gets closer, and discrete photon arrival time is unable to resolve. With photon distribution and output pulse considered, analytical form of discrete photon arrival time detected in laser ranging is derived with deconvolution from the output pulse. Also, ranging data size is increased, helpful for the recognition of efficient photons from noise. In the algorithm, single pulse response is approximated to Gaussian form, and effects of time jitter on photon discrimination are studied. Consumed the time jitter of pulse response is 50~250 ps, both statistical distribution histogram and the relation of peak-valley contrast, time interval and time jitter are obtained with three photons. Data sizes before and after deconvolution are compared in kHz laser ranging system during 1 s observation time. Results show discrete time is able to be resolved when peak-valley contrast is above 10 in histogram, and the discrimination time resolution is 0.2~0.7 ns.

**Key words** laser optics; discrete photon arrival time; deconvolution; kHz laser ranging; multi pixel photon counter

**OCIS codes** 040.1240; 040.1345; 120.1880; 250.0040; 250.1345

## 1 引言

多像素光子计数器(MPPC)是一种可工作于常温下的光子探测器,被广泛应用于高能物理<sup>[1]</sup>、医学成像<sup>[2-3]</sup>、光谱检测<sup>[4]</sup>、粒子与天体物理<sup>[5-6]</sup>、光子计数相干检测<sup>[7]</sup>等领域。MPPC已具备超过1000个雪崩光电二极管

收稿日期: 2015-01-15; 收到修改稿日期: 2015-03-23

基金项目: 国家863计划(2011AAXX0110)

作者简介: 薛莉(1990—),女,硕士研究生,主要从事空间碎片激光测距方面的研究。E-mail: xuelishirley1129@163.com

导师简介: 李明(1964—),男,教授,硕士生导师,主要从事空间目标光学测量技术方面的研究。

E-mail: limingbittt@163.com(通信联系人)

(APD)的集成能力。作为一种新型硅基光电倍增管,它具有高增益( $10^5 \sim 10^6$ )、高灵敏度(单光子量级)、低噪声(小于1 MHz)、低偏置电压(小于100 V)、高时间分辨力(100~300 ps)、高量子效率(在532 nm处为30%~50%)等特点。在激光测距这一重要潜在应用领域,MPPC可配合后端事件计时器,作为激光测距接收端。2011年,Kirchner等<sup>[8]</sup>已将MPPC成功用在奥地利Graz 2 kHz高重频激光测距系统中,实现了对低轨卫星的激光主动探测和数据传输。赵帅等<sup>[9]</sup>进一步采用半导体制冷将MPPC温度稳定在15 °C,暗计数达到了 $6.5 \times 10^{-4}$  counts/pulse。2013年,张国青等<sup>[10]</sup>给出MPPC光子数分辨模型,能够分析入射光子的统计分布情况。MPPC的低噪声和高光子数分辨特点,使其在激光测距领域具有极大的发展应用空间。

在空间碎片漫反射激光测距系统中,其回波光子的极其微弱,为单光子水平,往往被湮没在天光背景噪声以及探测器暗噪声中<sup>[11-12]</sup>。观测数据量决定了数据的拟合精度<sup>[13]</sup>,提高观测数据量有助于根据噪声随机性和有效光子相关性提取出分布有规律的有效信号<sup>[14-15]</sup>。然而MPPC由多个并联工作在Geiger模式的雪崩二极管组成,输出电流是各像素雪崩电流之和,存在因光子间隔过小而引起的脉冲变形,导致无法分辨各光子分立时刻,这牺牲了MPPC获取更多光子分立时刻的能力。本文结合MPPC时间延迟响应抖动,提出一种利用数学反卷积方法,解算MPPC所接收多光子分立时刻的方法。

## 2 多光子情形下的脉冲变形问题

### 2.1 以MPPC为光子接收器的激光测距系统

MPPC因为其良好的单光子探测能力和较高的商品化程度,目前有望成为继雪崩单光子探测器(APD)之后的又一种激光测距系统接收器件。MPPC由多个APD并联而成,每个APD即为一个MPPC像素,各像素工作在盖革模式下,具备独立探测光子的能力,产生的雪崩电流经并联电路输出。在实际激光测距系统中,千赫兹激光脉冲通过测站大口径望远镜发射(图1),经目标反射后经过光学系统被MPPC接收,经放大电路后由示波器获得响应脉冲,由脉冲读取和甄别处理模块得到光子到达时刻,由事件计时器予以记录,最后经数据处理系统处理所有观测数据。

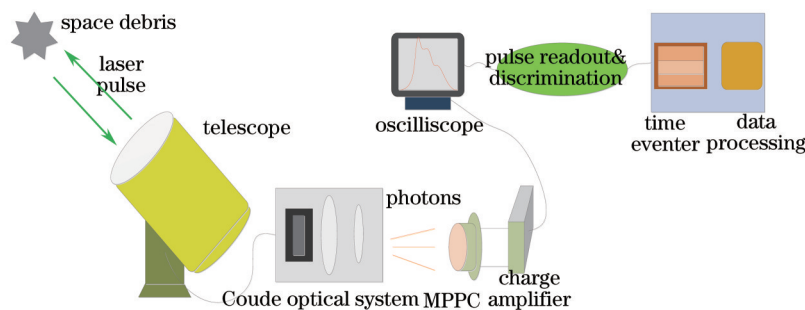


图1 MPPC作为激光测距探测器系统

Fig.1 Laser ranging system with MPPC as detector

### 2.2 MPPC 输出脉冲的变形问题

MPPC单光子冲击响应基本满足负指数分布<sup>[16]</sup>,其脉冲上升速度很快,上升时间约10 ns,脉冲下降较缓慢,恢复初始电压需要30 ns左右,脉冲下降之后进入约50 ns恢复时间,进入待工作模式。如图2所示,若多像素探测到的光子为同时到达,则经并联电路后的输出为多个脉冲幅值之和;若到达光子不同时,则会引发

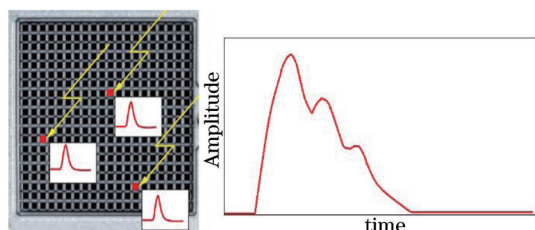


图2 多光子引起的输出脉冲变形

Fig.2 Pulse distortion by multi photons

脉冲变形,导致分立时刻的模糊,增加了光子到达时刻读取的难度,同时也会影响读取光子到达时刻精度,

从而影响激光测距测量精度。

### 2.3 MPPC 抑制电路的改进

在以 MPPC 作为回波接收器的激光测距系统中,为了防止 MPPC 各 APD 持续产生雪崩电流导致 APD 器件的损坏,往往需要设置抑制电路<sup>[17]</sup>,抑制雪崩电流的持续增加。一般采用被动式抑制电路<sup>[18]</sup>,设置阈值比较电压,控制 MPPC 工作状态。

在 MPPC 作为激光测距接收器的系统中,通常将阈值电压设定为 0.5 p.e. (p.e.表示光子等效量),即一个光子等效电压的一半,一个光子到达引发的脉冲响应即可达到阈值电压要求,通过外置淬灭电路结束 MPPC 该工作周期,并由事件计时器记录该光子到达时刻。然而该阈值电压的设定未有效利用 MPPC 多光子计数特点,限制了光子的输入量。一种简单的调整方案是增大阈值电压,例如将阈值电压设置为 2.5 p.e.,控制 MPPC 在测得至少三个光子输入时才停止工作,这样能够利用 MPPC 的多像素各自观测光子,输入端允许更多的观测量,可获得多光子到达时刻不同而导致的变形脉冲。然而提高抑制电路的阈值电压会由于光子到达时刻相近引起输出脉冲变形,导致光子时刻模糊。从提高阈值电压后获取的变形脉冲中解算分立时刻,对提高观测数据量和数据处理精度方面具有重要意义。

## 3 反卷积法光子分立时刻解算原理

数学反卷积可以集成在激光测距系统 MPPC 和事件计时器之间的脉冲读取和甄别模块中,为多光子导致的变形脉冲提供一种新的解算途径。因为单个或多个光子响应均通过 MPPC 完成,可认为光子具有相同的传递函数。传递函数和信号卷积的结果即最终输出脉冲。通过测量单光子响应,由反卷积方法可以得到系统传递函数,利用获得的总输出变形脉冲,再将其和传递函数做反卷积,解算出变形脉冲中各光子分立时刻,整个过程如下所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(t) \otimes h(t) = g_1(t) \\ F_1(x) \cdot H(x) = G_1(x) \\ H(x) = \frac{G_1(x)}{F_1(x)} \\ G_2(x) = \text{FFT}[g_2(t)] \\ F_2(x) = \frac{G_2(x)}{H(x)} \\ f_2(t) = \text{IFFT}[F_2(x)] \end{array} \right. \quad (1)$$

式中  $f_1(t)$  和  $F_1(x)$  分别表示单光子到达时刻和其傅里叶变换形式,  $h(t)$  和  $H(x)$  表示 MPPC 传递函数时域表达式和傅里叶域表达式,  $g_1(t)$  和  $G_1(x)$  表示单光子响应脉冲及其傅里叶变换形式,  $g_2(t)$  和  $G_2(x)$  表示多光子响应脉冲及其傅里叶变换形式,  $f_2(t)$  和  $F_2(x)$  分别表示多光子到达时刻和其傅里叶变换形式, FFT 表示快速傅里叶变换, IFFT 表示快速逆傅里叶变换。根据(1)式,通过测量单光子信号  $f_1(t)$  和单光子响应  $g_1(t)$ , 将其变换到傅里叶空间,可以得到 MPPC 系统的传递函数  $H(x)$ 。再测量多光子响应脉冲  $g_2(t)$ , 将其变换到傅里叶空间,与相同的传递函数  $H(x)$  做运算,获得含分立时刻的输入信号的傅里叶形式  $F_2(x)$ , 通过逆傅里叶变换,即解算出包含分立时刻(即  $\delta$  函数相加)的输入信号,获得入射光子分立时刻。再输入给系统后端的事件计时器,将解算出的分立时刻进行存储。

为方便获得解析形式,具体可将 MPPC 接收到  $t=0$  时刻单光子产生的冲击响应作  $N(\tau, \sigma^2)$  的高斯形式近似<sup>[19]</sup>:

$$f_1(t) = \delta(t - 0), \quad (2)$$

$$g_1(t) = \exp\left[-\frac{(t - \tau)^2}{\sigma^2}\right], \quad (3)$$

式中  $\tau$  为响应时延,一般可假设抖动符合  $N(\varepsilon, w^2)$  的高斯分布。

提高阈值电压后的 MPPC 的抑制电路,可使 MPPC 具备探测多光子输入的能力。为方便计算,假定阈值电压为 2.5 p.e.,假定三个光子(回波光子和噪声光子不可分辨)的到达时刻分别为  $t_1, t_2, t_3$ , 对应真实的输入信

号可以表达为 $\delta$ 函数相加,即

$$\hat{f}_2(t) = \delta(t - t_1) + \delta(t - t_2) + \delta(t - t_3), \quad (4)$$

其输出信号为三光子响应函数之和:

$$g_2(t) = \exp\left[-\frac{(t - t_1 - \tau_1)^2}{\sigma^2}\right] + \exp\left[-\frac{(t - t_2 - \tau_2)^2}{\sigma^2}\right] + \exp\left[-\frac{(t - t_3 - \tau_3)^2}{\sigma^2}\right], \quad (5)$$

通过测量单光子响应和单光子输出脉冲,对其做傅里叶变换得到傅里叶表达式

$$F_1(x) = \int \delta(t - 0) \exp(-ixt) dt = \exp(-ix \cdot 0) = 1, \quad (6)$$

$$G_1(x) = \int \exp\left[-\frac{(t - \tau)^2}{\sigma^2}\right] \cdot \exp(-ixt) dt = \sqrt{\pi} \sigma \exp\left(-\frac{\sigma^2 x^2}{4}\right) \cdot \exp(-ix\tau). \quad (7)$$

通过输入端和输出端信号的傅里叶表达式(6)、(7)式,得到传递函数的傅里叶形式:

$$H(x) = \frac{G_1(x)}{F_1(x)} = \sqrt{\pi} \sigma \exp\left(-\frac{\sigma^2 x^2}{4}\right) \cdot \exp(-ix\tau). \quad (8)$$

将计算得到的传递函数表达式(8)式进行逆傅里叶变换,得到时域内的传递函数表达式,该传递函数表征的便是整个MPPC对光子的响应,表达式中 $\tau$ 为MPPC传递过程的时间抖动变量:

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int H(x) \exp(ixt) dx = \exp\left[-\frac{(t - \tau)^2}{\sigma^2}\right]. \quad (9)$$

在考虑响应脉冲抖动的情况下,将(5)式中测量得到的输出脉冲做傅里叶变换:

$$G_2(x) = \int \left\{ \exp\left[-\frac{(t - t_1 - \tau_1)^2}{\sigma^2}\right] + \exp\left[-\frac{(t - t_2 - \tau_2)^2}{\sigma^2}\right] + \exp\left[-\frac{(t - t_3 - \tau_3)^2}{\sigma^2}\right] \right\} \exp(-ixt) dt = \sqrt{\pi} \sigma \exp\left(-\frac{\sigma^2 x^2}{4}\right) \{ \exp[-ix(t_1 + \tau_1)] + \exp[-ix(t_2 + \tau_2)] + \exp[-ix(t_3 + \tau_3)] \}, \quad (10)$$

经过与测量计算得到的传递函数式(8)式反卷积运算得到输入光子分立时刻的傅里叶形式和逆傅里叶变换后的分立时刻时域表达式 $f_2(t)$ :

$$F_2(x) = \frac{G_2(x)}{H(x)} = \exp[-ix(t_1 + \tau_1 - \tau)] + \exp[-ix(t_2 + \tau_2 - \tau)] + \exp[-ix(t_3 + \tau_3 - \tau)], \quad (11)$$

$$f_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int F_2(x) \exp(ixt) dx = \delta(t + \tau - t_1 - \tau_1) + \delta(t + \tau - t_2 - \tau_2) + \delta(t + \tau - t_3 - \tau_3). \quad (12)$$

上述MPPC测量解算过程如图3所示。通过输入单光子(1),可获得经过MPPC作用后的单光子响应脉冲(2),由此单光子输入和输出进行解算(3),得到MPPC作为“光子传递系统”的传递函数,作为测量前系统的先验信息。在激光测距观测过程中,可以测量得到多光子经MPPC作用后的多光子响应脉冲(4),利用传递函数在频域对其进行反卷积运算(5)、(6),最终解算出入射多光子的光子分立时刻,由后端事件计时器予以记录。

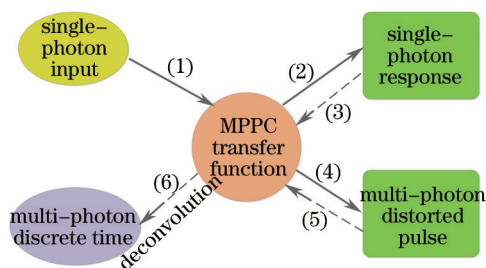


图3 反卷积解算过程示意

Fig.3 Flowchart of deconvolution algorithm

## 4 光子分立时刻的仿真计算

### 4.1 MPPC 输入信号分析

考虑大气和碎片本身对脉冲的展宽效应<sup>[20-21]</sup>,假定回波光子的到达时刻为 $t=0$ 时刻,并认为回波光子到达时刻满足均值为0的高斯分布。考虑典型的激光测距系统,回波光子数方程<sup>[22-24]</sup>如下所示:

$$n_0 = \frac{\lambda}{hc} \cdot E_i \cdot T^2 \cdot K_i \cdot K_r \cdot \frac{A_r \rho \sigma \cos \theta}{4\pi^2 \theta_i^2 R^4}, \quad (13)$$

式中  $n_0$  表示平均回波光光子数,  $\lambda$  为激光波长,  $h$  为 Planck 常数,  $c$  为光速,  $E_i$  为发射激光单脉冲能量,  $T$  为大气透射率,  $K_i$  为发射光学系统效率,  $K_r$  为接收光学系统效率,  $A_r$  为接收望远镜有效接收面积,  $\rho$  为目标表面反射率,  $\sigma$  为目标等效横截面积,  $\cos \theta$  为目标方向投影余弦,  $\theta_i$  为激光发散角,  $R$  为目标距离。

对于不同距离、不同大小和不同表面特性的  $m$  级空间碎片, 经过不同口径接收望远镜, 可计算得到典型平均回波光光子数为 0.001~1000 范围内变化, 在统计上表示 1 s 时间内发射的 1000 个激光脉冲中, 有 1~10<sup>6</sup> 个回波脉冲中存在回波光光子。

对空间碎片激光测距而言, 天空背景辐射带来的噪声往往不可忽略。对 532 nm 波长激光, 其天空背景噪声大小主要由下式估算:

$$N_{\text{back}} = \frac{\partial^2 N_{\text{back}}}{\partial S \partial \lambda} \cdot S \cdot \Delta \lambda, \quad (14)$$

式中  $\frac{\partial^2 N_{\text{back}}}{\partial S \partial \lambda}$  表示背景辐射强度,  $S$  表示望远镜接收口径,  $\Delta \lambda$  表示通光系统滤波片带宽。不同的观测条件下, 天空背景辐射强度为 3×10<sup>-10</sup>~3×10<sup>-4</sup> W/(cm<sup>2</sup>·μm) 范围内, 望远镜接收口径 2 m<sup>2</sup>, 滤光片带宽 10 nm, 可以估计天光背景噪声为 10<sup>7</sup>~10<sup>15</sup> kcounts/s。同时, MPPC 自身的暗噪声也对观测有一定影响, 暗噪声与具体的探测器型号有关, 且随着 MPPC 单个像素大小、读出电路复杂度以及工作温度等因素有关。以工作在 20 ℃ 的 Hamamatsu S12572-100C 为例, 其典型探测器暗噪声为 10<sup>3</sup> kcounts/s。暗噪声大小, 往往具有温度每上升 8 ℃ 就会引起暗噪声水平成倍的增加。在无外加控温电路时, MPPC 暗噪声随工作温度的变化, 而在 10<sup>3</sup>~10<sup>4</sup> kcounts/s 范围内波动。

天光背景噪声和 MPPC 暗电流噪声探测时间内, 服从均匀分布<sup>[25]</sup>。

典型千赫兹激光测距系统, 单脉冲脉宽约为 1 ns, 激光接收系统的工作距离门大小约为 10 μs, MPPC 工作之间所需的恢复时间约为 100 ns。所以, 可保证激光发射重复频率为千赫兹的情况下, 对每一个包含回波脉冲距离门内的光子进行探测, 并且 MPPC 有足够的时间进行恢复待响应状态。计算中, 假定 MPPC 一次工作时间为 1 μs 左右。故其处于工作状态中, 可能有 0.001~1000 个平均回波光光子、10<sup>4</sup>~10<sup>10</sup> 个天空背景噪声光子、1~10 个 MPPC 暗电流噪声光子被接收。各光子到达时刻分布如图 4 所示。

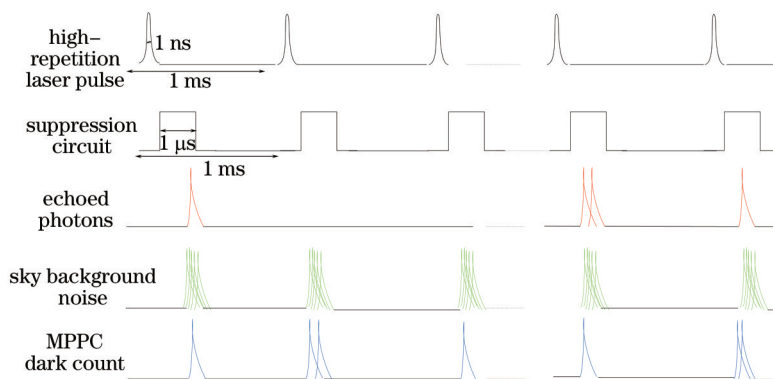


图 4 多光子到达时间关系

Fig.4 Sequence of multi-photon arrival time

MPPC 接收端的入射光子存在如下关系: 1) 只有在抑制电路允许的情况下, MPPC 才处于可接收入射光子的状态; 2) 因为千赫兹激光单脉冲能量为毫焦量级, 经过远距离传播和空间碎片等目标漫反射之后被接收, 并非每个脉冲都有回波光光子返回, 回波光光子数在统计层面具有意义; 3) 在 MPPC 工作期间内, 会因为 MPPC 自身产生的暗计数光子和天光背景噪声光子而产生雪崩电流, 干扰回波光光子的分辨, 其中天光背景光子产生的影响最大。

从统计意义上, 考虑回波光光子到达时刻服从高斯分布, 因为目标为  $m$  级的空间碎片, 故其光子时间分布在 -5~5 ns 时间内满足高斯分布, 均值为 0, 均方差为 3 ns, 即满足  $N(0, 3^2)$ , 单位: ns; 噪声在 1 μs 时间内, 噪声光子服从均匀分布, 即满足  $U(-0.5, 0.5)$ , 单位: μs。为反映 MPPC 响应时间抖动的影响, 考虑三个光子到达时

刻分别为-1~-0.1, 0, 0.5~2 ns之间取值,取值间隔为0.1 ns,采用 Monte Carlo 模拟,对 MPPC 接收到的光子时刻进行多次仿真,假定 MPPC 响应时延 $\tau$ 为 2 ns,并考虑单脉冲响应的抖动的影响,如(3)式所示, $\tau$ 服从  $N(0, 0.1^2)$ ,单位:ns,对输出总脉冲进行反卷积解算,获得分立时刻,并可以给出反卷积得到的分辨力大小。

### 4.2 MPPC 时间抖动对反卷积的影响

改变 MPPC 的工作模式,使其不再工作在获得单个光子后即停止响应后续光子的状态,而将抑制电路<sup>[26]</sup>中的阈值电压获得适量提高,保证 MPPC 工作时间内可探测到若干光子。以阈值电压设置为 2.5 p.e. 为例(假定在该观测情况下,到达接收面的平均光子数为 5),允许 MPPC 获得三个光子的输入。假定 MPPC 光敏面晶体结构理想,具有完整性,后脉冲几乎可以忽略。当晶体结构不明显时,可利用后脉冲与变形脉冲之间存在的时间差,在工程实践中进行反解算之前,增加预判别模块,将后脉冲剔除不予解算,以此降低后脉冲对解算带来的影响。此时根据光子数的泊松分布特性<sup>[8]</sup>,如图 5 所示,将阈值电压设置为 2.5 p.e.,单个和两个光子到达时无法引发 MPPC 的工作,但可以保证 3 个及以上的光子到达时可以被探测并解算,光子能够被 MPPC 响应的概率大于 85%。而未经过反卷积解算的探测方法中使用被动抑制电路,只能探测单个光子,光子的探测概率低于 20%。从计数正确性的角度,虽然反卷积解算相应的探测方法也会引起漏计数,但性能明显优于传统方式。

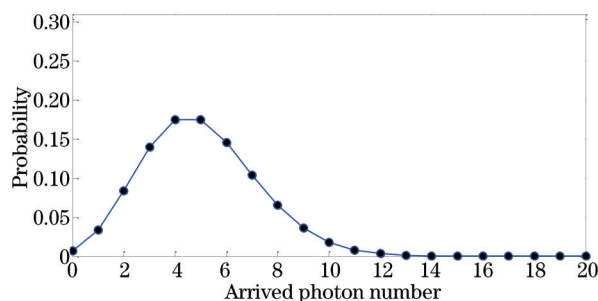


图 5 平均光子数为 5 的泊松分布曲线

Fig.5 Poisson distribution when average photon number is 5

假设三个光子到达的时间间隔从 200 ns 逐渐减小到 1 ns 以内,探测到输出脉冲,如图 6 所示,当时间间隔在 200 ns 时,可以清晰分辨出各个光子到达时刻。随着光子时间间隔的减小,输出脉冲的波形变形程度逐渐加剧,当相邻光子间隔小于 80 ns 时,已经无法直接从 MPPC 输出的变形波形中分辨出光子分立时刻。

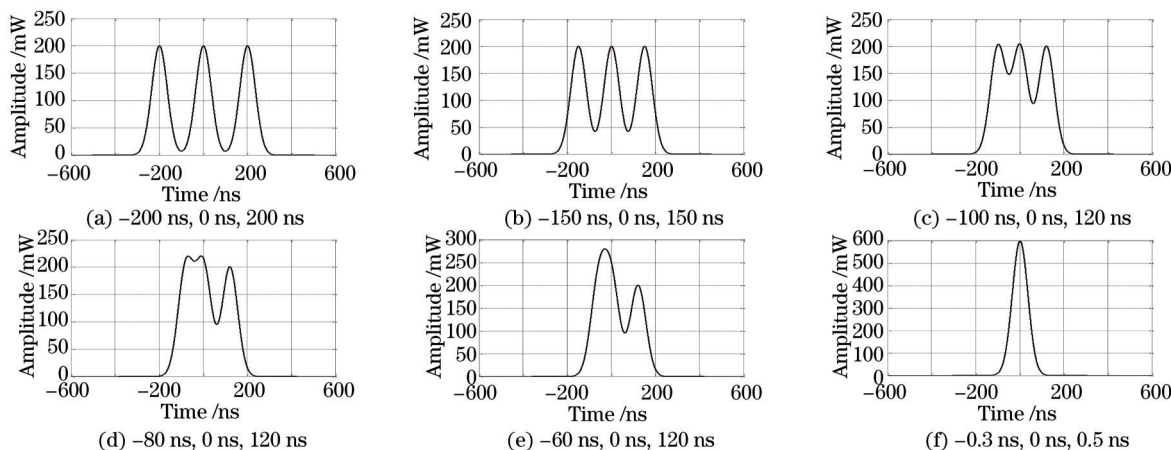


图 6 不同光子间隔引起的脉冲变形

Fig.6 Pulse distortion with different time intervals

反卷积中可以认为 MPPC 传递函数相同,然而因为 MPPC 响应时间存在抖动,需考虑时间抖动对解算光子分立时刻带来的影响。假设 MPPC 的响应时间抖动服从均值为 0,标准差为 100 ps(MPPC 时间抖动典型值)的高斯分布,进行 1000 次 Monte Carlo 模拟时间抖动对反卷积解算分立时刻的影响,可以得到不同光子分立时刻的统计分布图,如图 7 所示。进一步,可以根据反卷积解算后的峰值位置分辨光子时刻。

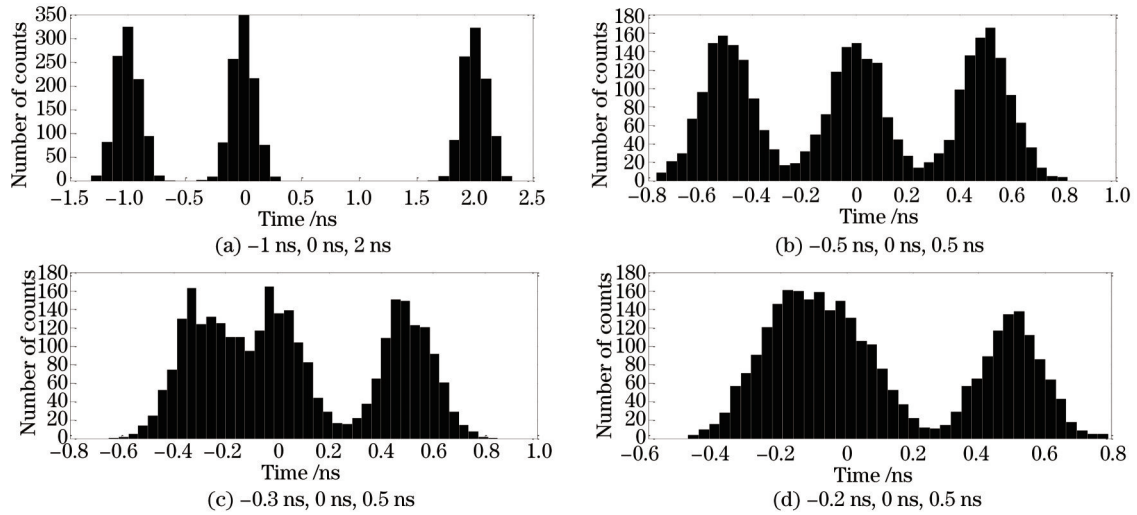


图7 时间抖动引起的分立时刻交叠

Fig.7 Time-of-arrival overlapping caused by time jitter

由统计分布图可见:1) 对时间间隔大于0.3 ns的光子,能够通过反卷积方式解算出光子到达分立时刻,各峰值位置对应分立时刻的值,可清晰分辨间隔为0.3 ns以上的光子;2) 当不同光子到达时刻相近时,时间抖动会引发分立时刻交叠,无法分辨两个光子。定义统计分布图中峰谷分辨率(SSP)为 $S_{SSP}=20 \lg(P_{peak}/P_{val})$ ,并认为SSP大于10时(相当于峰谷比大于1.5),光子到达时刻可分辨,其峰值对应时间即为该光子到达时刻,图8展示了MPPC时间抖动分别为50, 100, 150, 200, 250 ps下SSP随光子时间间隔的变化关系。图8中下方水平虚线代表峰谷分辨率为10(相当于峰谷比为1.5),表示光子能否分辨的峰谷分辨率阈值。

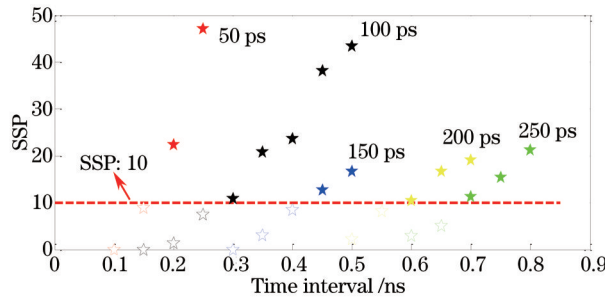


图8 SSP随光子间隔的变化关系

Fig.8 SSP variation with time interval

1) 虚线以上实心点对应的光子间隔足以分辨出相邻光子到达时刻,对于MPPC不同的时间抖动大小,达到分辨阈值的光子间隔大小不同,时间抖动越小,可分辨的相邻光子时间间隔越小;

2) 虚线以下的空心点表示随着时间间隔减小,MPPC时间响应抖动引起了反卷积解算过程中分立时刻的较大重叠,不再能够分辨多个光子到达时刻;

3) 对于典型的MPPC,其时间抖动约为100 ps,对应SSP阈值的相邻光子到达时间间隔为0.3 ns,同时,随着MPPC时间抖动变大,可分辨时间间隔基本呈线性减小,但保持在0.2~0.7 ns范围内。对于固定环境下工作的MPPC,其时间抖动基本不变,SSP随光子间隔的变大而基本呈现线性增加,更易于分辨。

相比未解算之前变形脉冲中80 ns的时间分辨力,考虑典型时间抖动范围为50~250 ps,利用数学反卷积方法能够将相邻光子到达时刻的分辨力提高到0.2~0.7 ns,极大提高了MPPC时间分辨能力,且能够实现观测数据量成倍的增加。

### 4.3 反卷积对于增加数据量的应用效果

通过反卷积运算,突破了原来MPPC应用在激光测距中只能获取单个光子到达时刻的局限,提升了观测数据量。图9分别展示了千赫兹激光测距系统在1 s内发射1000个脉冲,MPPC作为回波探测器在反卷积解算前后的仿真观测数据。考虑激光测距系统的望远镜口径、光学系统效率、天空透过率、天光背景噪声等参

数,估计MPPC可接收到的光子数均值为5。在设置阈值电压为2.5 p.e.时,按照光子数目的泊松分布,分别考虑1000个回波脉冲中,分别有3个光子的个数为140个,4个光子的个数为175个,5个光子的个数为175个,6个光子的个数为146个,在考虑反卷积解算后,根据对4.2节对反卷积解算分辨力的考察,认为光子分辨力大于0.7 ns的光子分立时刻能够被解算而显示,如图9(b)所示,有高于85%的光子可被探测到,而传统的被动抑制单光子探测方式,只有低于20%的光子可被探测到,如图9(a)所示。经过反卷积解算后,数据量从1000左右增加到3000以上,数据量是未经反卷积解算数据量的3倍以上。探测器接收到的光子包含大量噪声光子,未经反卷积解算的观测光子数据较为稀疏,有效光子的密集分布程度不明显,且因为MPPC运用被动抑制电路,工作在得到单光子即停止响应后续光子的状态,导致目标斜距整体呈现“半边截止效应”;而经过反卷积数据解算之后的探测数据,因为提高了抑制电路的阈值电压,使得MPPC具备探测多光子的能力,获得数据量大大提高,方便从分布较为密集的部分提取出有效光子。仿真结果展示了反卷积解算办法在提高观测数据量上的巨大优势,在实际工程应用中,光子数目及到达时间在实际观测中只要根据实际观测波形予以解算即可。可见,反卷积极大提高了数据量,能够更清晰直观反映数据分布疏密情况,从而有助于根据有效光子的相关性和噪声光子的随机性提取出有效回波光子信号。

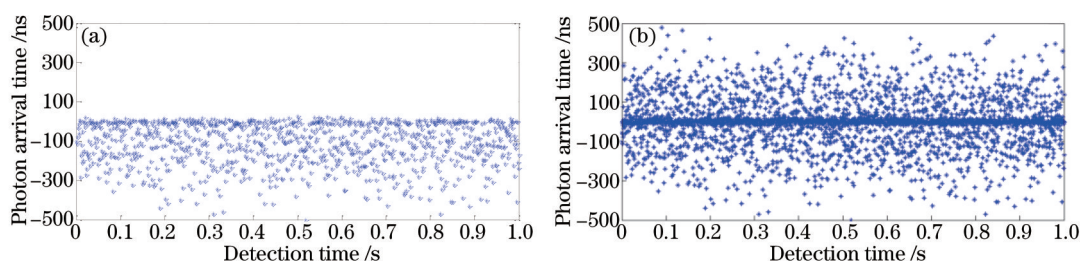


图9 反卷积前(a)和反卷积后(b)观测数据量对比

Fig.9 Photon arrival time calculation before (a) and after (b) deconvolution

## 5 结 论

采用MPPC作为漫反射激光测距回波光子探测器具有重要应用前景,通过数学反卷积方法,并考虑光子到达时间的不确定性,从变形脉冲中解算多光子分立时刻,在时间抖动为50~250 ps情况下,能够对光子时刻间隔0.2~0.7 ns以上的光子予以分辨。该方法解决了原MPPC仅能获得一个光子到达时刻的问题,通过解算出光子到达分立时刻,实现观测数据量成倍增加,有助于后续从噪声中提取有效回波光子。该方法改进了MPPC的工作方式,提升了其工作效率,可作为测距系统子模块集成到MPPC和事件计时器之间。其实质相当于在保证单脉冲能量基础上提高重复频率,但相比提高激光功率和激光重复频率的方式,具有操作简单,无需更换硬件设施,稳定性好、可靠性高和工程应用前景广等优点。

## 参 考 文 献

- 1 Grigoriev E, Akindinov A, Breitenmoser M, *et al.*. Silicon photomultipliers and their bio-medical applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, 571(1): 130-133.
- 2 Schaart D R, van Dam H T, Seifert S, *et al.*. A novel, SiPM-array-based, monolithic scintillator detector for PET[J]. Physics in Medicine and Biology, 2009, 54(11): 3501.
- 3 Nassalski A, Moszynski M, Syntfeld-Kazuch A, *et al.*. Multi pixel photon counters (MPPC) as an alternative to APD in PET applications[J]. Nuclear Science, IEEE Transactions on, 2010, 57(3): 1008-1014.
- 4 Song M, Won E, Yoon T H. Large dynamic range photon detector with a temperature-stabilized Si-based multi-pixel photon counter[J]. Opt Express, 2007, 15(25): 17099-17105.
- 5 Lightfoot P K, Barker G J, Mavrokoridis K, *et al.*. Characterisation of a silicon photomultiplier device for applications in liquid argon based neutrino physics and dark matter searches[J]. Journal of Instrumentation, 2008, 3(10): P10001.
- 6 Afek I, Natan A, Ambar O, *et al.*. Quantum state measurements using multipixel photon detectors[J]. Phys Rev A, 2009, 79(4): 043830.
- 7 Zhang Heyong, Wang Tingfeng, Jiang Runqiang. Photon counting coherent detection based on all solid state single frequency laser[J].



- Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0608002.  
 张合勇, 王挺峰, 姜润强. 基于全固态单频激光器的光子计数相干探测[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0608002.
- 8 Kirchner G, Koidl F, Kucharski D, *et al.*. Using pulse position modulation in SLR stations to transmit data to satellites[C]. Proceedings of the 2011 11th International Conference on, IEEE, 2011: 447-450.
- 9 Zhao Shuai, Guo Jin, Liu Hongbo, *et al.*. Application of multi-pixel photon counters to single photon detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 972-976.  
 赵 帅, 郭 劲, 刘洪波, 等. 多像素光子计数器在单光子探测中的应用[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(5): 972-976.
- 10 Zhang Guoqing, Zhu Changjun, Liu Lina. Photon number resolution model and experimental verification of multi-pixel photon counter[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(7): 1273-1278.  
 张国青, 朱长军, 刘丽娜. 多像素光子计数器的光子数分辨模型与实验验证[J]. 光电子·激光, 2013, 24(7): 1273-1278.
- 11 Li Yuqiang, Li Zhulian, Fu Honglin, *et al.*. Experimentation of diffuse reflection laser ranging of space debris[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0908001.  
 李语强, 李祝莲, 伏红林, 等. 空间碎片漫反射激光测距试验[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0908001.
- 12 Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Wu Zhibo, *et al.*. Experiment of laser ranging to space debris based on high power solid-state laser system at 200 Hz repetition rate[J]. Chinese J Lasers, 41(s1): s108005.  
 张忠萍, 张海峰, 吴志波, 等. 基于 200 Hz 重复率高功率全固态激光器空间碎片激光测距试验[J]. 中国激光, 41(s1): s108005.
- 13 Wu Zhibo, Zhang Zhongping, Yang Fumin, *et al.*. Statistical analysis of successful detection probability of the returns in satellite laser ranging[J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(3): 28-29.  
 吴志波, 张忠萍, 杨福民, 等. 卫星激光测距回波探测成功概率统计分析[J]. 测绘科学, 2006, 31(3): 28-29.
- 14 Xue L, Li M, Wang L L, *et al.*. Effects of sample size on ranging precision for space debris[C]. 2014 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, 2014.
- 15 Li Xi, Tang Rufeng, Li Zhulian, *et al.*. Laser ranging data processing based on the analysis of the binary image[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1208005.  
 李 熙, 汤儒峰, 李祝莲, 等. 基于二值图像的卫星激光测距数据处理[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208005.
- 16 Pellizzari C, Holmes R, Knox K. Intensity interferometry experiments and simulations[C]. SPIE, 2012, 8520: 85200J.
- 17 Li Zhulian, Zheng Xiangming, Fu Honglin, *et al.*. Processing method research for multi-pulse measured data of high repetition frequency laser ranging[J]. Chinese J Lasers, 41(s1): s108007.  
 李祝莲, 郑向明, 伏红林, 等. 高重频测距中多脉冲测量数据的处理方法研究[J]. 中国激光, 41(s1): s108007.
- 18 Guo Sai, Ding Quanxin, Yang Yi. Noise suppression technologies used for avalanche photodiode[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(3): 69-73.  
 郭 赛, 丁全心, 羊 毅. 雪崩光电探测器的噪声抑制技术研究[J]. 电光与控制, 2012, 19(3): 69-73.
- 19 Sun Zhibin, Ma Haiqiang, Lei Ming, *et al.*. A single-photon detector in the near-infrared range[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(10): 5790-5795.  
 孙志斌, 马海强, 雷 鸣, 等. 近红外单光子探测器[J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5790-5795.
- 20 Zhai Dongsheng, Fu Honglin, Xiong Yaoheng. Study of atmosphere effects on a 532 nm laser and its application in the laser ranging based on diffuse reflection[J]. Astronomical Research & Technology, 2010, (1): 33-39.  
 翟东升, 伏红林, 熊耀恒. 大气对 532 nm 激光影响在漫反射激光测距中的应用[J]. 天文研究与技术: 国家天文台台刊, 2010, (1): 33-39.
- 21 Fan Jianxing, Yang Fumin, Chen Qixiu. Center-of-mass model of satellites used for laser rangig[J]. Acta Photonica Sinica, 2000, 29(11): 1012-1016.  
 范建兴, 杨福民, 陈启秀. 激光测距卫星的质心改正模型[J]. 光子学报, 2000, 29(11): 1012-1016.
- 22 Tian Yuzhen, Zhao Shuai, Guo Jin. Analysis of non-cooperative target photon counting laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0514002.  
 田玉珍, 赵 帅, 郭 劲. 非合作目标光子计数激光测距技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0514002.
- 23 Zheng Xiangming, Li Zhulian, Fu Honglin, *et al.*. 1.2 m telescope satellite co-optical path kHz laser ranging system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0512002.  
 郑向明, 李祝莲, 伏红林, 等. 云台 1.2 m 望远镜共光路千赫兹卫星激光测距系统[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0512002.
- 24 Zhang Haifeng, Meng Wendong, Wu Zhibo, *et al.*. One way laser ranging and its measuring experiment[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40

(3): 0308005.

张海峰, 孟文东, 吴志波, 等. 单向激光测距及其测量试验[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308005.

25 Feng Guoxu, Chang Baocheng. Study of high precision laser ranging technology[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(11): 1137-1140.

冯国旭, 常保成. 高精度激光测距技术研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(11): 1137-1140.

26 Liang Chuang, Liao Jing, Liang Bing, *et al.*. Performance of a silicon avalanche diode as a single photon detector[J]. Acta Photonica Sinica, 2000, 29(12): 1142-1147.

梁 创, 廖 静, 梁 冰, 等. 硅雪崩光电二极管单光子探测器[J]. 光子学报, 2000, 29(12): 1142-1147.

栏目编辑: 何卓铭