

“西光所建所六十周年暨《光子学报》创刊五十周年”专辑

引用格式: ZHAO Hui, YIN Haomeng, LIU Yongan, et al. Position-sensitive Micro-channel-plate Having Cross-delay-line Detector Based Photon-counting Three-dimensional Super-resolution Laser Imaging (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(7):0751407

赵惠,殷浩蒙,刘永安,等. 基于交叉延迟线位敏阳极微通道板探测器的光子计数激光三维超分辨成像(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(7):0751407

# 基于交叉延迟线位敏阳极微通道板探测器的 光子计数激光三维超分辨成像(特邀)

赵惠<sup>1</sup>,殷浩蒙<sup>1,2</sup>,刘永安<sup>1</sup>,盛立志<sup>1</sup>,杨向辉<sup>1</sup>,邹刚毅<sup>1</sup>,夏思宇<sup>1</sup>,杨明洋<sup>1,2</sup>,  
樊学武<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**以未来天基态势感知对远距离空间目标高灵敏度探测与精细三维成像的潜在需求为出发点,开展以光子灵敏探测器为核心的光子计数激光三维成像系统及关键技术研究。提出了一种基于自主研制的交叉延迟线位敏阳极微通道板探测器的光子计数激光三维成像技术。首先介绍了该技术的基本原理,并从全链路建模与成像仿真特性分析的角度对其空间应用的潜力进行了研究;之后探讨了多域联合三维超分辨重建提升系统时空分辨能力的可行性;最后研制了基于交叉延迟线位敏阳极微通道板探测器的光子计数激光三维成像原理样机,在 6.8 m 距离处实现了距离分辨率优于 5 mm 的三维成像效果,证明了该技术方法的有效性。

**关键词:**天基态势感知;主动探测;激光三维成像;光子计数探测器;超分辨重建

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225107.0751407

## 0 引言

当前,天基态势感知<sup>[1-4]</sup>以获取目标亮度、几何形状及空间位置等信息为主要目标,未来则以包括距离、位姿及三维形貌等在内的多要素信息获取为重点技术发展方向,而光子计数激光三维成像是典型代表。当前,国内外研究大多集中于基于盖革模式雪崩光电二极管阵列探测器(Geiger Mode Avalanche Photodiode Detector, GM-APD)的光子计数激光三维成像<sup>[5-13]</sup>。美国麻省理工学院林肯实验室在 GM-APD 光子计数激光三维成像领域处于领先地位,自 1998 年起先后研制 Gen 系列三代样机<sup>[14-17]</sup>,证明了 GM-APD 探测器的潜力。此外,英国、日本、德国、瑞士等也积极推进研究工作,尤其是赫瑞瓦特大学实现的千赫兹超高速、亚厘米距离分辨三维成像令人瞩目<sup>[18-26]</sup>。

国外之所以在光子计数激光三维成像领域处于领先地位,根本原因在于掌握了 GM-APD 探测器的核心技术。除美国林肯实验室之外,包括美国弗吉尼亚大学奥斯汀分校<sup>[27]</sup>、英国爱丁堡大学<sup>[28]</sup>、瑞士洛桑联邦理工学院<sup>[29]</sup>、意大利米兰理工学院<sup>[30]</sup>等都已成功研发了较大面阵 GM-APD 探测器,但高等级器件对国内禁售。反观国内,包括中电 44 所<sup>[31]</sup>、中科院半导体研究所<sup>[32]</sup>以及北方夜视集团等均在开展 GM-APD 探测器研发,但尚未实现原位替代。因此,针对其他类型光子计数探测器的激光三维成像有研究价值,位置敏感微通道板(Micro Channel Plate, MCP)阳极探测器就是其中之一。

国外很早就将位敏阳极 MCP 探测器应用于空间探测。如 1989 年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射探空火箭使用 MAMA 型阳极探测器收集银河系

基金项目:GFCXTQ 项目

第一作者:赵惠(1981—),男,研究员,博士,主要研究方向为空间新体制成像与先进光学成像。Email: zhaohui@opt.ac.cn

收稿日期:2022-05-17;录用日期:2022-06-27

<http://www.photon.ac.cn>

NGC6240星的紫外数据<sup>[33]</sup>。1995年,美欧合作的SOHO任务使用延迟线阳极探测器研究日冕加热过程<sup>[34]</sup>。2001年,J-PEX高分辨率光谱仪使用Vernier型阳极探测器研究白矮星G191-B2B的光谱<sup>[35]</sup>。2012年,日本EXCEED卫星则使用电阻型阳极探测器进行空间观测<sup>[36]</sup>。西安光机所自2007年开始,针对空间科学应用,先后研制出楔条形探测器原理样机、Vernier阳极探测器以及大尺寸交叉延迟线阳极探测器;之后以此为基础又开展了MCP阳极探测器在紫外、可见、近红外波段的光子计数三维成像研究<sup>[37-42]</sup>。

近年来,国外在积极探索位敏阳极MCP探测器用于空间目标成像的可行性<sup>[43]</sup>,提出了利用MCP位敏阳极探测器实现空间目标三维成像的构想,仿真研究了其在千公里距离上针对低轨卫星实施三维成像的潜力<sup>[44]</sup>。因此,本文立足于自研大尺寸交叉延迟线位敏阳极MCP/CDL(Micro-Channel-Plate with Cross-Delay-Line, MCP/CDL)探测器,通过开展理论机理研究、仿真特性分析、重建算法研发、探测器样片试制以及三维成像试验等全方位研究,打通了基于MCP/CDL探测器的光子计数激光三维成像技术体制,在持续改进提升探测器硬件性能的同时,还将多通道探测、多域联合及软性距离选通可控延迟等引入三维重建,探索能够突破时空分辨能力的三维超分辨重建的可行性。

## 1 MCP/CDL探测器光子计数机理与激光三维成像方案构想

位敏阳极MCP探测器主要由输入窗、光电阴极、MCP组、Ge感应层以及位敏阳极收集器等部件构成,如图1(a)所示。其中,常见的位敏阳极主要有电阻阳极、楔条形阳极、Vernier阳极、交叉条阳极以及延迟线阳极等。与其他类型的阳极收集器相比,延迟线阳极收集器具有结构紧凑、计数率高且时间分辨能力强的特点。具体而言,延迟线阳极的时间分辨能力可以达到皮秒量级,而计数率最大可达兆赫兹以上,同时还可以做到比如直径50 mm的较大尺寸。因此,基于延迟线阳极收集器的大尺寸位置敏感MCP/CDL探测器在高时间分辨和高空间分辨的场合应用较多,特别适合作为光子计数激光三维成像系统的核心关键器件。

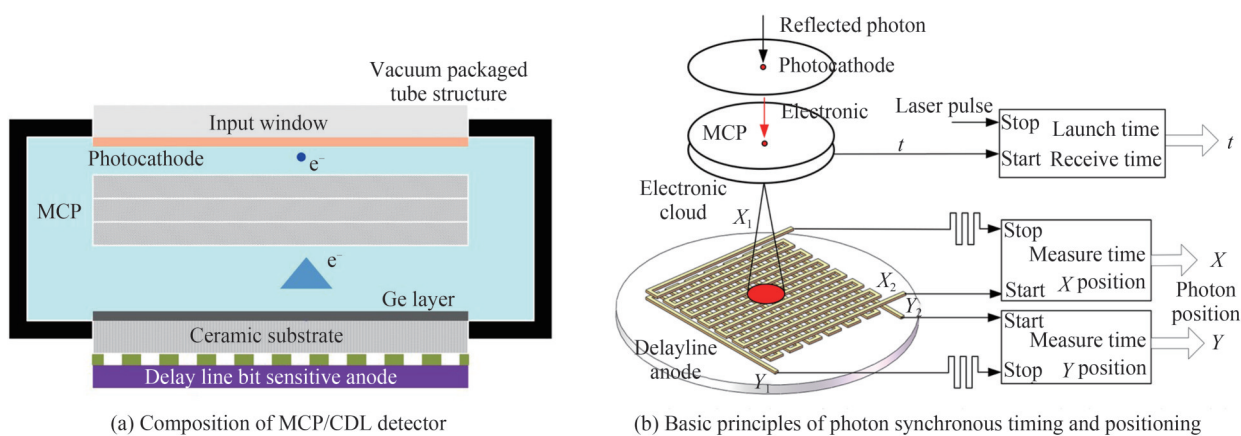


图1 交叉延迟线位敏阳极MCP探测器组成及光子同步计时与定位基本原理

Fig. 1 The composition of the crossed delay line position-sensitive anode MCP detector and the basic principle of photon synchronization timing and positioning

位敏阳极MCP/CDL探测器工作过程如图1(b)所示,光子到达光电阴极后首先在阴极以一定的量子效率激发出初始光电子,之后光电子进入MCP通道产生电子倍增。经过级联的MCP倍增后输出电子云团,然后经过电场加速后撞击在位敏阳极上,再由位敏阳极上相互交叉绝缘的延迟线收集后输出电荷脉冲信号。通过对到达探测器的光子的到达时间和位置数据的同步获取就可以得到目标回波三维点云信息。其中,光子到达时间 $t$ 基于飞行时间法测量,由针对探测器输出脉冲的高精度计时获得,如图2(a)所示,通过统计信号脉冲与参考脉冲之间的脉冲周期个数与延迟进行测算;而利用延迟线收集技术实现光子到达位置二维坐标位置的原理如图2(b)所示。可以看到,每个电子云团所携带的电荷首先由两条相互垂直的延迟线收集,随后沿着延迟线两端传播,最后根据电荷脉冲达到延迟线两端的延时差就可以计算出电荷脉冲到达延迟线的位置,从而实现空间二维位置 $(x, y)$ 分辨。

通过如图2所示的光子同步计时与定位技术能够获得每一个目标回波光子的 $(x, y, t)$ 三维点云信息,为

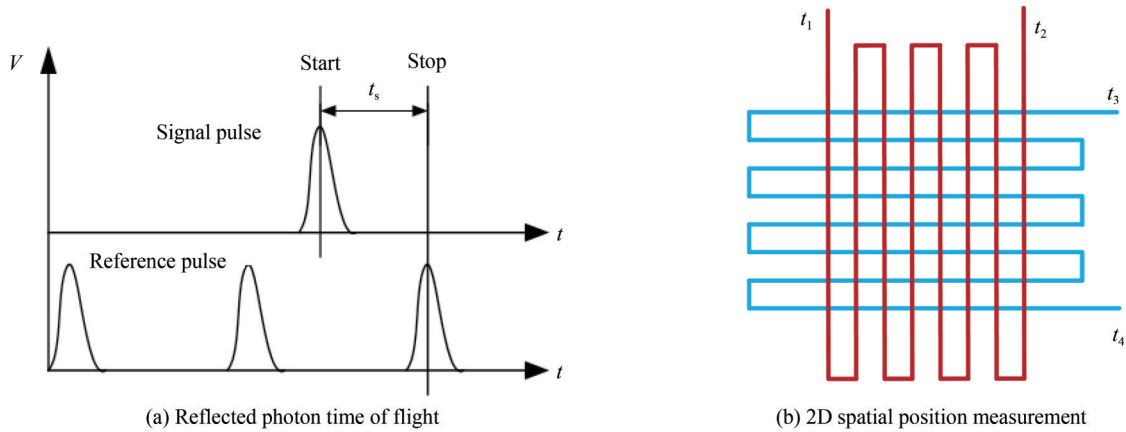


图2 回波光子飞行时间及二维空间位置的测量机理

Fig. 2 Measurement mechanism of reflected photons on flight time and two-dimensional space position

实现光子计数激光三维成像奠定了基础。因此,根据延迟线位敏阳极(MCP/CDL)探测器的光子计数机理,对应的光子计数激光三维成像系统方案如图3所示。该系统在空间应用时,既可以采用单基模式,即激光发射端和光子计数三维成像系统接收端位于同一卫星平台上,也可以采用双基模式,即发射端和接收端分别位于两个独立的卫星平台上。首先,使用高重频、窄脉宽、低功耗的脉冲激光器经发射望远镜准直扩束后对目标进行照明;之后,使用中等口径的望远镜系统收集目标回波光光子,并依靠交叉延迟线位敏阳极MCP/CDL探测器对到达光子进行同步计时与定位来获得目标回波点云数;最后,针对回波点云实施重建来完成三维成像。

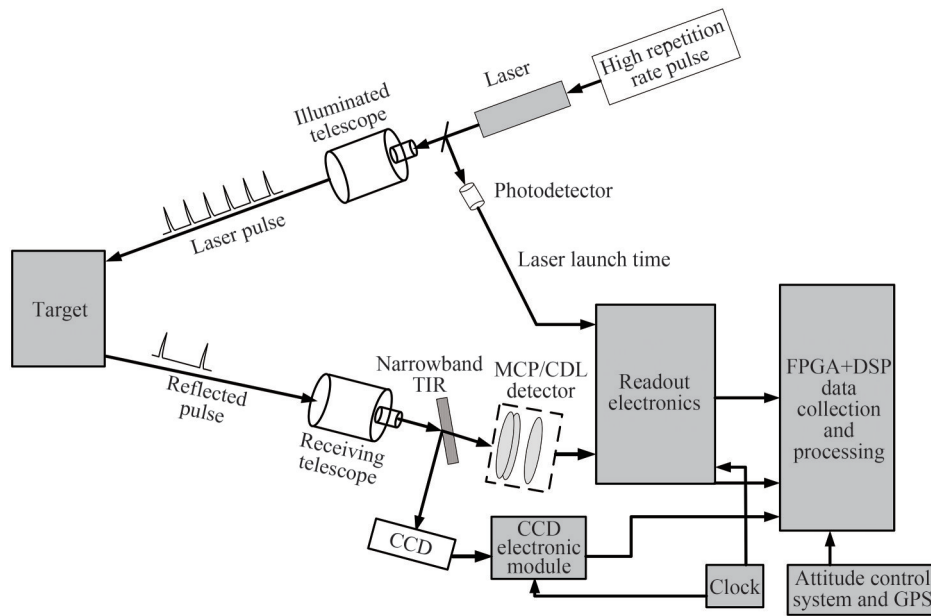


图3 基于MCP/CDL的光子计数激光三维成像方案构想

Fig.3 Conception of photon counting laser 3D imaging scheme based on MCP/CDL

## 2 MCP/CDL光子计数激光三维成像的端到端成像仿真分析

### 2.1 基于激光雷达方程的光子计数成像建模

激光雷达方程是针对光子计数激光三维成像实施量化评价的重要手段。通常,要求激光远场照明光斑远大于目标尺寸,针对空间目标,不考虑大气传输衰减,给出了这种典型工况下的激光雷达方程<sup>[45]</sup>,激光回波功率 $P_r$ 为

$$P_r = P \cdot \rho_t \cdot \eta_R \cdot \eta_T \cdot \frac{S_t}{S_L} \cdot \frac{S_R}{\pi R^2} \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

式中,  $P$  为激光发射功率, 量纲为 W;  $\rho_t$  为目标反射系数;  $\eta_R$  为接收端光学系统透过率;  $\eta_T$  为发射端光学系统透过率;  $S_t$  为被照射的目标面积, 量纲为  $m^2$ ;  $S_L$  为目标位置处的激光光束截面积, 量纲为  $m^2$ ;  $S_R$  为接收端光学系统入瞳面积, 量纲为  $m^2$ ;  $R$  为目标距离, 量纲为 m;  $\alpha$  为目标被照表面与目标位置处光束截面的夹角, 量纲为 rad。  $S_L$  可表示为  $S_L = \pi \left( \frac{\theta \cdot R}{2} \right)^2$ , 目标处激光半径  $\omega$  可表示为  $\omega = \frac{\theta \cdot R}{2}$ ,  $\theta$  为激光发散角, 量纲为 rad;  $S_R$  可表示为  $S_R = \frac{\pi D^2}{4}$ ,  $D$  为接收光学系统口径, 量纲为 m。

此外, 考虑到激光脉冲能量在时间和传输截面上的分布是不均匀的, 以高斯激光脉冲为例, 激光能量在传输过程中的时间和空间分布可表示为

$$E(x, y, t) = E_0 \frac{2}{\pi \omega^2} \exp \left( -\frac{2 \left( (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 \right)}{\omega^2} \right) \frac{t-t_d}{\tau^2} \exp \left( -\frac{t-t_d}{\tau} \right) \quad (2)$$

式中,  $E_0$  表示激光脉冲能量, 量纲为 J;  $(x_0, y_0)$  表示目标位置处激光传输截面中心位置, 量纲为 m;  $t_d$  代表回波到达时间, 量纲为 s;  $\tau$  表示激光的形状, 其与脉宽  $p_w$  的关系可以近似表示为  $p_w = 3.5\tau$ ; 脉宽  $p_w$  的量纲为 ns。脉冲激光雷达焦平面接收到的单脉冲回波能量  $E_{rp}$  可表示为

$$E_{rp} = \int_{t_d}^{t_d+2p_w} \iint_{S_t} E_0 \frac{2}{0.25\pi\theta^2 R^2} \exp \left( -\frac{2 \left( (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 \right)}{\omega^2} \right) \frac{t-t_d}{\tau^2} \exp \left( -\frac{t-t_d}{\tau} \right) \cdot \rho_t \cdot \eta_R \cdot \eta_T \cdot \frac{D^2}{4R^2} \cdot \cos \alpha \cdot dx dy dt \quad (3)$$

由式(3)可以看到, 探测器接收到的回波能量  $E_{rp}$  分别与激光发射能量  $E_0$  成正比, 与距离  $R$  的 4 次方成反比, 与光学系统口径  $D$  的平方成正比, 与激光发散角  $\theta$  的平方成反比, 与目标面积  $S_t$  成正比, 此外还与发射端光学系统透过率  $\eta_T$ 、接收端光学系统透过率  $\eta_R$ 、目标被照表面与目标位置处光束截面的夹角  $\alpha$  等因素有关。

光子计数激光三维成像是通过统计并累计目标回波光子流实施概率探测成像的, 所以回波光子数的数量及分布是其主要特征。利用式(3)所给出的激光雷达方程根据光子能量量化就能够计算出探测器的回波光电子数  $r_{ph}$ , 即

$$r_{ph} = \eta_q \frac{E_{rp}}{h\nu} \quad (4)$$

式中,  $\eta_q$  为探测器量子效率;  $h$  为普朗克常数,  $h = 6.62 \times 10^{-34}$  J·s;  $\nu$  为光频率, 量纲为 Hz;  $h\nu$  表示单个光子能量。

MCP/CDL 探测器平均响应数可以表示为

$$N_{ph} = r_{ph} + r_b + n_d \quad (5)$$

式中,  $r_b$  为背景噪声光电子数,  $n_d$  为探测器暗计数; 探测器输出光电子数  $N_{out}$  可以表示为  $N_{out} = MN_{ph}$ ;  $M$  代表 MCP/CDL 探测器的增益, 由于具有高达  $10^6$  以上的增益, 所以 MCP/CDL 探测器可以响应极其微弱的回波。

探测概率是决定目标光子是否被界定为信号光子的依据。首先, MCP 探测器在进行光子计数成像时, 每个虚拟像素由多个倍增通道组成, 而每个倍增通道的光电倍增过程都可以认为是相对独立的泊松过程, 同时多个独立泊松过程的和仍然符合泊松分布; 其次, 探测器接收的光子除了包含目标回波对应的有效信号光子之外, 还包括背景噪声及暗电流噪声等激发的等效噪声光子, 而这些噪声光子也近似服从泊松分布。另外, MCP/CDL 探测器采用位敏阳极结合定时模块探测并记录回波光子三维数据信息, 由于延迟线阳极一次仅能解码一个时空位置, 当同时有多个位置探测到光子时就会出现误码情况。因此, 当多个像元均对应相同的目标距离时, 每个像元时隙内探测到光子的概率可表达为

$$P_D = C_{N_m}^1 (1 - \exp(-N_s)) (\exp(-N_s))^{N_m-1} \quad (6)$$

式中,  $N_m$  为相同目标距离像元个数,  $N_s$  为探测器每个等效像元接收到的平均回波光电子数, 式(6)通过对单

脉冲回波进行分析,实现对系统激光发射能量和可适用背景光强范围的初步估计;对于非相同时刻但到达时间很接近的两个或多个光子,由于探测器死时间影响,探测器只能探测到第一个光子,因此,实际应用中,第 $i$ 个时隙探测到光子的概率等于前 $(i-1)$ 个时隙未探测到光子概率与第 $i$ 个时隙探测到光子概率的乘积,在弱光环境下,单个脉冲发生两个或多个光子事件的概率特别小时,每个时隙发生光子事件的概率可近似认为服从独立的泊松分布。

由图4(a)可知,每个像素回波光电子数过多或过少都会导致探测概率下降,且探测概率峰值随着相同目标距离像元数的增大,相应的向单像素回波光电子数小方向偏移,从图4(b)中可以看出在焦面总回波光电子数为定值时,探测概率会随着相同目标距离像元数的增大逐渐减小且趋于定值。这是由于随着像元数增大,单个像元分到的光电子数越少,相同目标距离对应像元之间的探测串扰会减小,相对来说像元总回波光电子数越少,光子到达时间和位置更随机,像元之间的串扰就会越小。

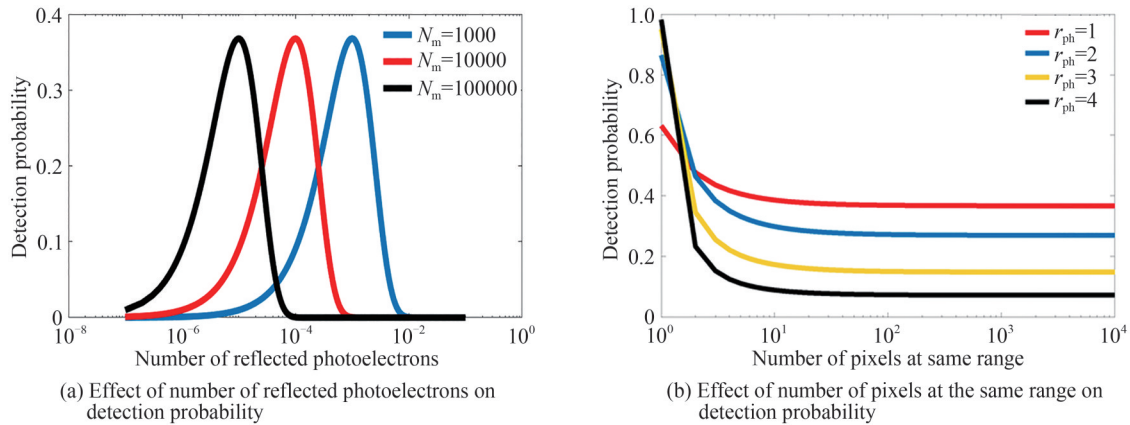


图4 回波光电子数及相同目标距离像元数对探测概率的影响

Fig. 4 Effect of the number of reflected photoelectrons and pixels at the same height on the probability of detection

成像信噪比是光子计数成像系统的重要指标,与回波光电子数密切相关。对于MCP/CDL探测器而言,其自身的暗计数率极低可以忽略不计,在回波光电子水平一定的条件下,成像信噪比主要受背景辐射光子数的影响。式(7)与式(8)分别给出了背景辐射光子数及信噪比计算公式。其他参数保持不变,典型背景辐照条件(比如 $E_b$ 为 $3.6 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ )下,令窄带滤光片带宽 $\Delta\lambda$ 为1 nm,接收光学系统孔径 $D$ 为0.6 m,那么当天顶角 $\theta$ 及照射方向与目标被照射面法线夹角 $\theta$ 均为 $0^\circ$ 时,可以得到不同累积探测次数下信噪比变化情况,如图5所示。显然,增加回波信号光电子数或者增加发射脉冲数(积分时间),均可以有效提升成像的信噪比。

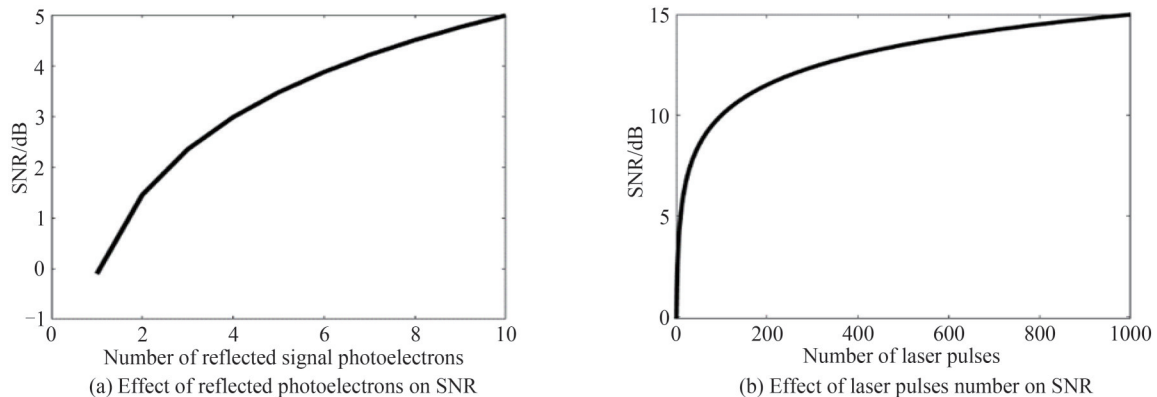


图5 信噪比随信号光电子数和发射脉冲数的变化情况

Fig. 5 The variation of signal-to-noise ratio with the number of signal photoelectrons and number of laser pulse

$$r_b = \frac{\eta_q \eta_R \rho_i(\Delta\lambda) S_t E_b \cos\theta \cos\theta_i (D^2) t}{\pi R^2 h\nu} \quad (7)$$

式中,  $r_b$  为背景光电子数;  $\Delta\lambda$  为窄带滤光片带宽, 量纲为 nm;  $E_b$  为背景辐照度, 量纲为  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ ;  $\theta$  为天顶角, 量纲为 rad;  $\theta_i$  为照射方向与目标被照射面法线夹角, 量纲为 rad;  $t$  为积分时间, 量纲为 s。

$$\text{SNR} = \frac{r_{\text{ph}}\sqrt{t}}{\sqrt{r_{\text{ph}} + 2(r_b + n_d)}} \quad (8)$$

测距精度与回波信号强度、激光脉冲宽度、背景噪声等都有关系, 采用参数估计方法对最大似然估计模型下的测距精度进行分析。首先假设目标距离分布一致, 相邻像素及其不同时隙探测到光子事件的概率均服从独立的泊松分布; 然后将目标距离作为估计量, 回波光电子飞行距离作为随机量; 最后通过克拉美-罗下界 (Cramer-Rao Lower Bound, CRLB) 计算无偏估计量所能达到的最小方差, 方差越小, 估计越准确, 精度越高。综上, 光子计数激光三维成像目标距离的 CRLB<sup>[46]</sup> 可表示为

$$\text{var}(\hat{R}) \geq \frac{p_w t_s c^2}{32 r_{\text{ph}} \eta_q \left[ \sqrt{\frac{r_{\text{ph}} + r_b}{r_{\text{ph}}}} \arctan h \left( \sqrt{\frac{r_{\text{ph}}}{r_{\text{ph}} + r_b}} - 1 \right) \right]} \quad (9)$$

式中,  $\hat{R}$  为距离估计值,  $c$  为光速,  $t_s$  为采样间隔 (探测时隙宽度)。分别对回波信号光电子数、噪声光电子数、采样间隔以及激光脉宽与距离估计方差的关系进行仿真, 如图 6 所示, 可以发现除回波光电子数和噪声外, 采样间隔、激光脉宽也同样影响距离估计方差, 且采样间隔越小, 激光脉宽越窄, 距离估计方差越小。

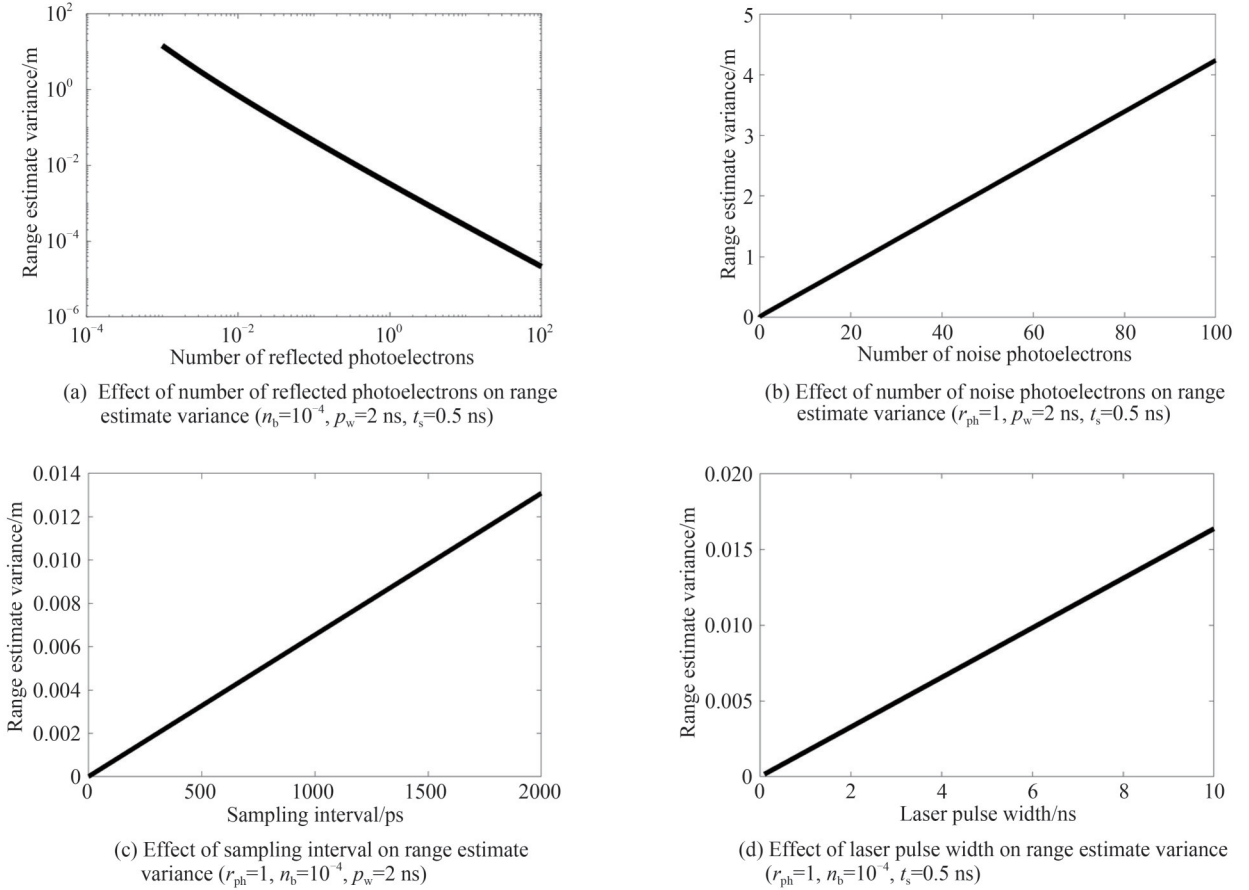


图 6 距离估计方差与其影响因素变化曲线

Fig. 6 Variance curve of distance estimation variance and its influencing factors

## 2.2 基于蒙特卡罗的端到端成像仿真分析

在2.1节进行解析建模的基础上,采用蒙特卡罗开展端到端的全链路成像仿真分析,如图7所示。

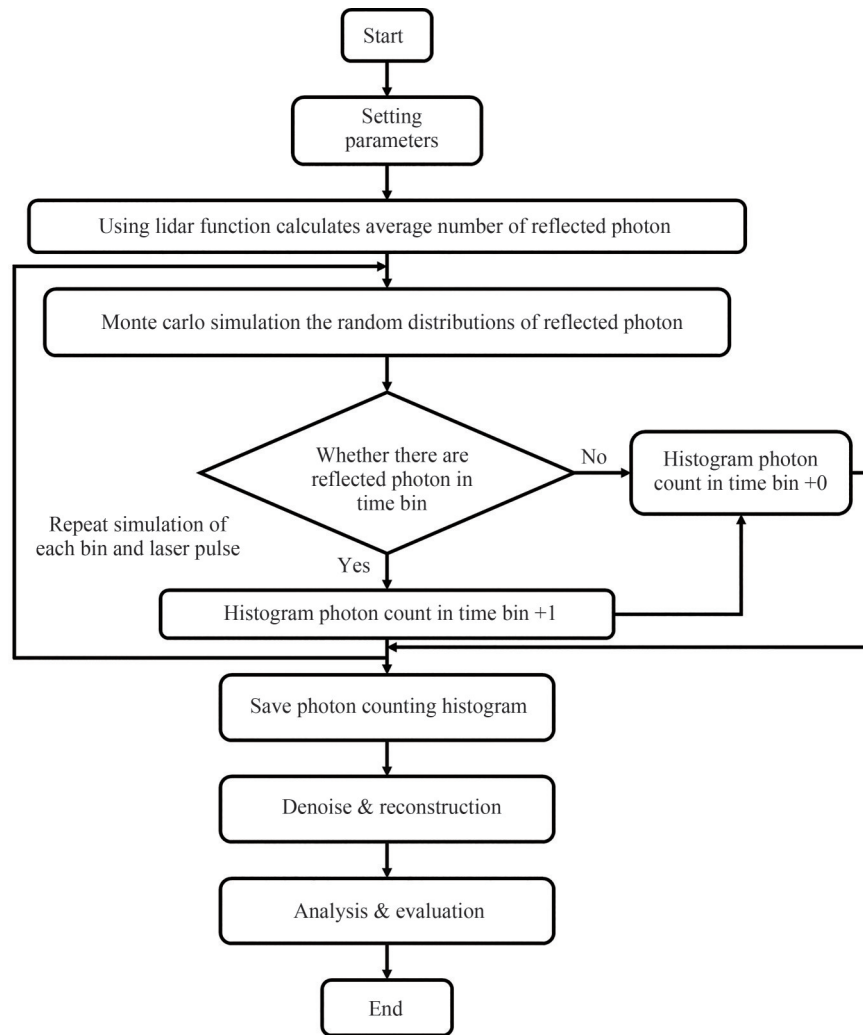


图7 端到端蒙特卡罗仿真流程  
Fig. 7 End-to-end Monte Carlo simulation process

以图8(a)所示空间目标(目标姿态以前视场为例,目标表面法线与接收光学系统光轴平行,将与前表面平行且过目标最远点的面作为零距离平面,此时目标相对距离分布如图8(b)所示)考察不同工况下的光子计数激光三维成像性能。其中,光学系统口径依然为0.6 m,焦距为6 m, $F\#$ 为10,探测器像元大小为 $60\ \mu\text{m}$ ,靶面大小为 $256\times 256$ 个像元,532 nm激光单脉冲能量为1 mJ,重频为10 kHz,激光发散角为2.6 mrad,探测时隙数为100个,探测时隙宽度为0.5 ns,背景辐照为 $3.6\times 10^{-6}\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ ,窄带滤光片带宽为1 nm,不同积分时间与不同作用距离对应的光子计数三维成像效果图8(c)与图8(d)所示。

可以看到,全链路仿真成像能够实现对目标形貌的三维刻画。同时,在作用距离一定的情况下,增加积分时间能够有效提升成像信噪比。因此,基于蒙特卡罗法的端到端仿真成像是有效的。在开展成像仿真的同时,对背景辐照对测距精度的影响同步进行了分析,如图9所示。背景辐射对应的噪声较大时,测距精度的主要影响因素是噪声,其主要原因是当门限内的信号回波光电子数量一定时,噪声光子的增加会将回波信号脉冲淹没在噪声中,且当噪声光子数过大时同时探测门开启后,探测器探测到噪声光子后进入死时间,探测到信号光子概率会大大减小,从而导致回波光子分布直方图峰值前移或者峰值消失,但随着噪声的逐渐减弱,测距精度将趋于一个常数。

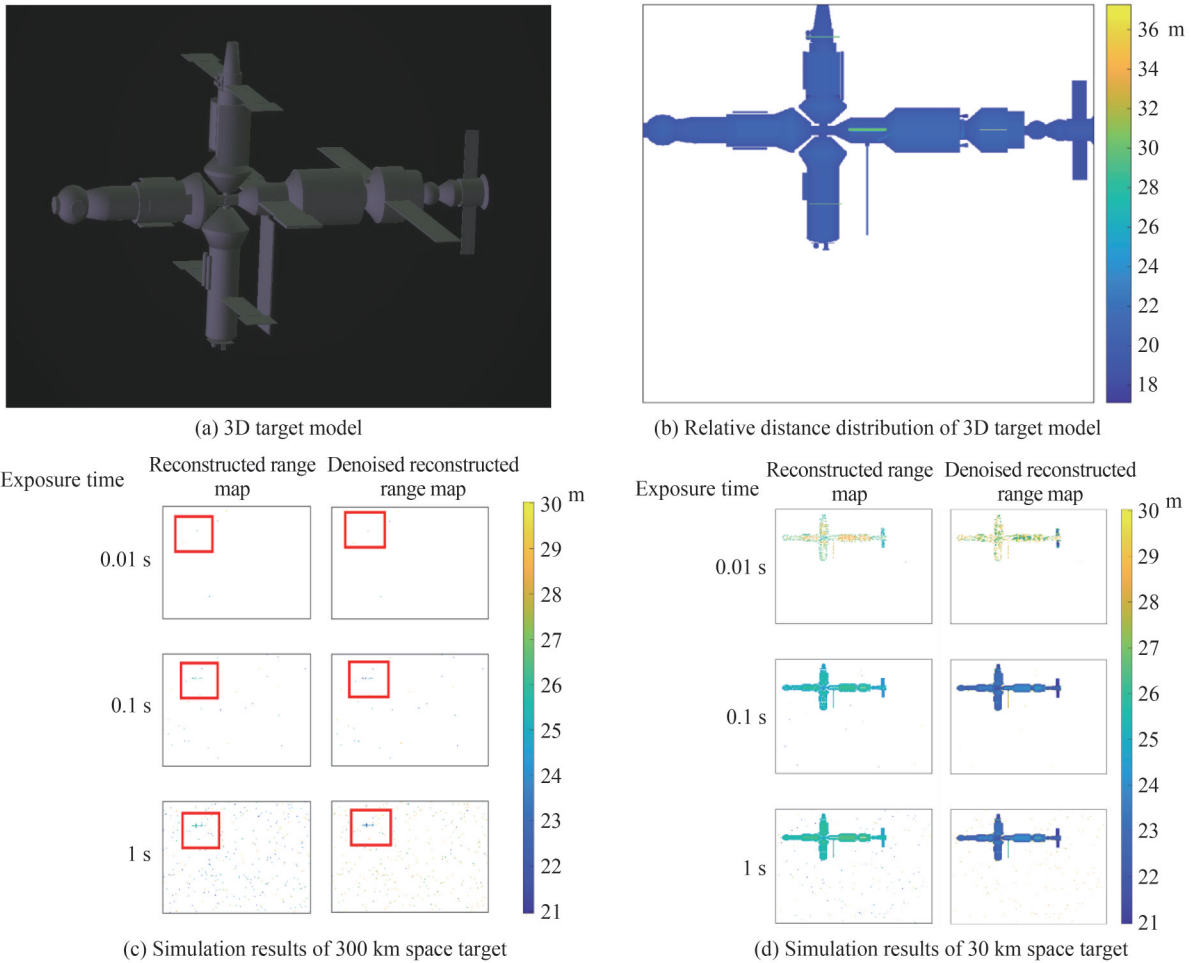


图 8 3D 空间目标端到端仿真示例  
Fig. 8 3D space target end-to-end simulation example

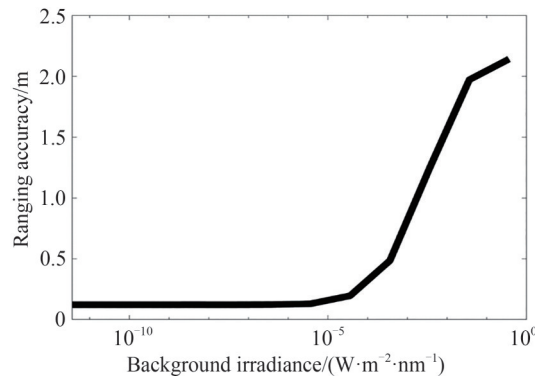


图 9 背景辐照与测距精度之间的关系  
Fig. 9 The relationship between background irradiance and ranging accuracy

### 3 强度-时间-空间多域联合超分辨三维重建

尽管光子计数探测器具有极高的光子灵敏度,但是普遍存在像素间隔大、集成度不够高等问题,比如 MCP/CDL 探测器目前的空间分辨仅为 60  $\mu\text{m}$  左右,与传统 CCD 或 CMOS 探测器相比差距较大,导致光子计数三维成像的空间分辨率不高,距离图像表现为严重的马赛克效应。另外,光子计数探测器的时间分辨能力主要受时间分辨电子学计时时隙的限制,目前研制的 MCP/CDL 探测器的时间分辨能力可优于 78 ps。因此,通过改进探测器的硬件水平提升光子计数激光三维成像系统的时间与空间分辨率是重要研究方向,但是本文将重点探讨协同工作模式下通过先进回波处理算法实现时空超分辨的可行性。



### 3.1 基于强度图引导距离图上采样的空间超分辨

在前期的研究中,为了消除光子计数成像因回波脉冲与发射脉冲难以一一对应带来的距离二义性问题,提出了一种利用强度图像边缘高频信息作为约束,通过迭代优化改善距离二义性的算法,可以将距离方差减小二分之一以上<sup>[41]</sup>。实际上,这种方式同样可以用来提升光子计数激光三维成像距离数据的空间分辨率。2020年,爱丁堡大学GYONGY I和赫瑞瓦特大学HALIMI A等采用总广义变分(Total Generalized Variation, TGV)强度图像引导距离图像上采样的方案将距离图的空间分辨率提升了4倍<sup>[23]</sup>。2020年,中国科学技术大学黎正平等采用亚像素扫描方式将8.2 km处采集的8幅亚像素扫描图像融合,将分辨率提升到系统瑞利分辨的两倍<sup>[12]</sup>。2020年,哈尔滨工业大学龚道然等采用双光路方式,一路由高分辨ICCD采集获得高空间分辨的强度图,另一路由低分辨率GM-APD采集获得低分辨率距离图,分别采用双三次插值、引导滤波和TGV等几种强度引导下采样算法获得超分辨距离图像,证明了强度引导下采样方案在光子计数三维超分辨距离图像的潜力,并对TGV强度引导下采样方案进行了优化<sup>[47]</sup>。2021年,中科院西安光机所薛瑞凯等采用GM-APD对3 m处目标进行成像,通过采用衍射光学元件与亚像素扫描成像方式将单光子三维系统空间分辨率由3 mm提升到0.33 mm<sup>[48]</sup>。

如图10(a)所示,本文针对MCP/CDL探测器光子计数激光三维成像的特点,在前期研究的基础上提出了基于强度上采样的空间分辨率提升算法。首先,将选定积分时间之内的回波点云数据通过统计方式获得原始距离图像;其次,将原始距离图像通过上采样方式转化成与高分辨率强度图大小相同的稀疏高分辨距离图,其中高分辨率强度图像由共孔径协同观测模式同步获得;再次,以全零图像作为待求解高分辨率距离图像的初始估计,以稀疏上采样高分辨距离图与待求解高分辨率距离图之间的差值作为保真项,而以广义全变分作为正则项来构建目标函数;最后,计算高分辨强度图像各向异性张量,并将该张量作为一阶正则项系数引导原始分辨距离图图像上采样过程,通过迭代优化获得空间分辨率提升的距离图像。图10(b)给出了强度引导距离图上采样提升距离图空间分辨率的示例,超分倍率为4倍。可以看到,距离图的空间分辨率得到了明显的改善。因此,只要采用共孔径设计方式同步获取高分辨率强度图像与光子计数距离图像,就可以突破光子计数探测器本身分辨率不够对空间分辨的影响。

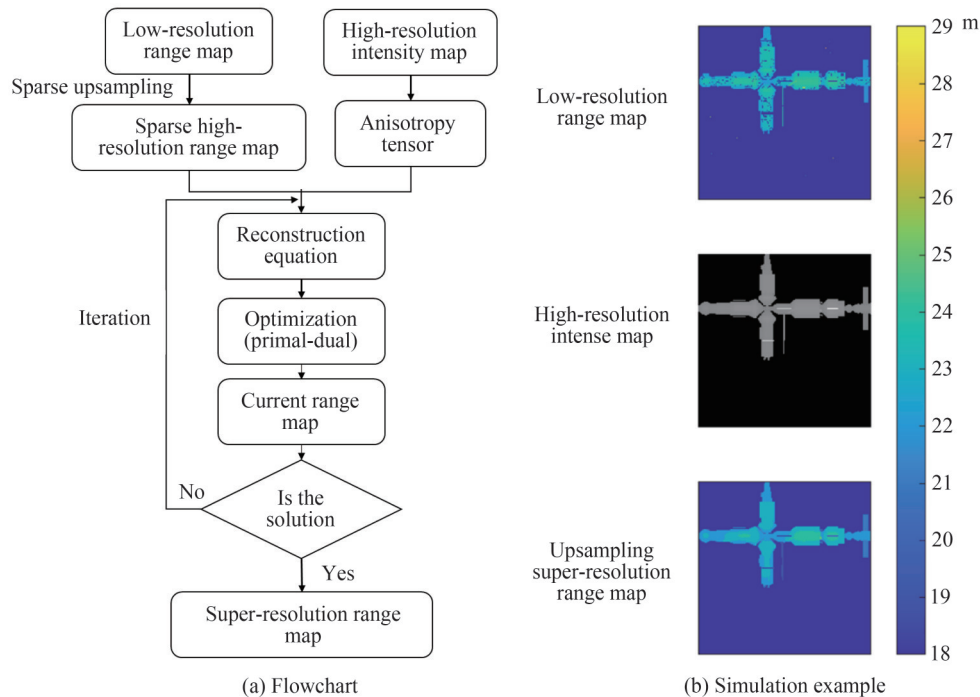


图10 基于强度引导距离图上采样的空间超分辨流程及仿真示例

Fig. 10 Flowchart and simulation example of spatial super-resolution based on intensity-guided depth upsampling

### 3.2 基于软性距离选通主动延迟亚时间精度距离超分辨

从理论上讲,3.1节所示的距离图像空间超分辨成像方案同样可以用于光子计数激光三维成像系统空间分辨率的提升,但是如何使用超分辨方法提升光子计数激光三维成像系统的测距精度却鲜有研究,而

测距精度恰恰是三维成像系统成像质量最重要的参数,尤其是在远距离成像场景下,因此本文将亚像素高分辨成像方案应用于时间维,提出了亚时间分辨扫描方案。

如图 11 所示,通过将开始门限延迟固定相位采集多幅连续低时间分辨距离数据,对采集的数据在时间维度通过亚像素融合方式获得具有更多细节的时间信息光子时间分布直方图,配合已有的重构算法,可以通过亚像素超分辨成像方式实现超越探测器硬件限制的高空间分辨率和高测距精度三维重建结果。分别采用 Middlebury 数据集和 3D 空间目标模型进行仿真验证,将数据集的场景等比例放缩到 0~1 m 范围内,采样模块时间分辨设置为 1 ns,仿真结果如图 12(a)所示。从 Middlebury 数据集仿真结果来看,随着延迟间隔  $\Delta t$  越来越小,采集获得信号的时间信息就越多,三维重建后图像的精度越来越高,均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)越来越小。当延迟间隔为时间分辨的 1/100 时,距离图像的均方根误差减小了 79.2%;

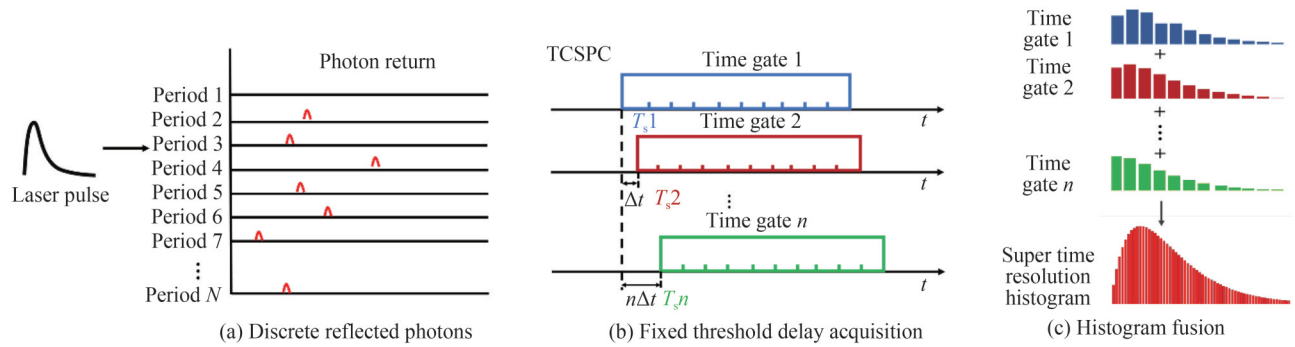


图 11 亚时间分辨延迟扫描超分辨重建原理示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the super-resolution reconstruction principle of sub-time-resolved delayed scan

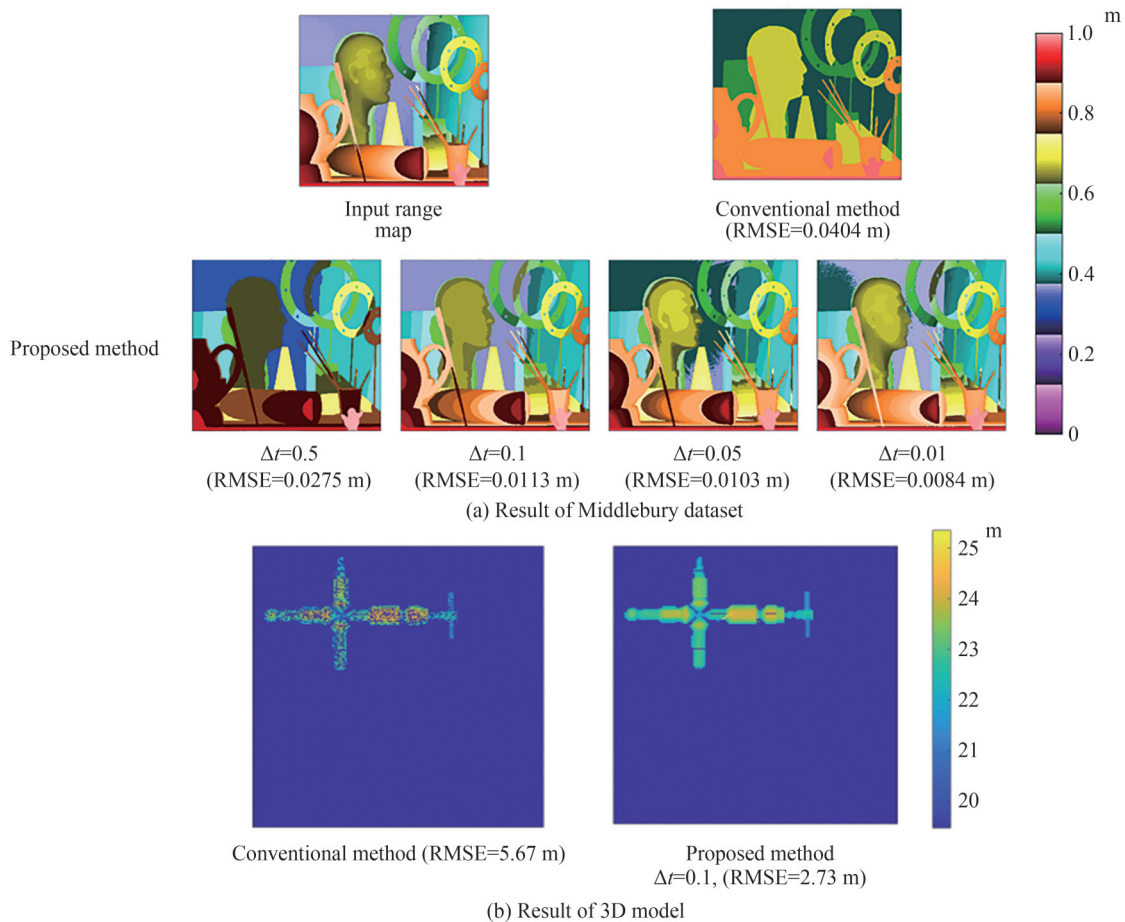


图 12 亚时间分辨扫描超分辨重建仿真示例

Fig. 12 Sub-time-resolved scanning super-resolution reconstruction simulation example

在对3D模型仿真时,将采样模块时间分辨设置为2 ns,将延迟间隔设置为时间分辨的1/20倍,重建结果如图12(b)所示,此时获得的超分辨距离图像均方根误差减小了51.9%。除采集模块时间分辨能力外,重建误差还会受到激光脉宽、回波在时隙中的位置等其他因素影响,因此亚时间分辨延迟扫描重建延迟间隔大小与误差减小倍率的精确关系,以及该方案能否减小其他因素对误差的影响还有待深入研究。

## 4 基于MCP/CDL的光子计数激光三维成像试验研究

### 4.1 MCP/CDL探测器样片研制及性能测试

MCP/CDL探测器主要由输入窗、光电阴极、MCP组、Ge感应层以及延迟线位敏阳极收集器等部件构成。探测器中,输入窗采用可见至近红外透过率均较高的石英玻璃;光电阴极采用红外延伸型S25多碱阴极;同时为了保证较高的增益,采用三块级联的MCP进行二次电子倍增。图13为真空封装光子计数成像探测器管体,以及管体与延迟线阳极装配完成后的实物照片。经过测试,研制的MCP/CDL探测器样片的指标如表1所示,后续还具备进一步提升和改进的空间。

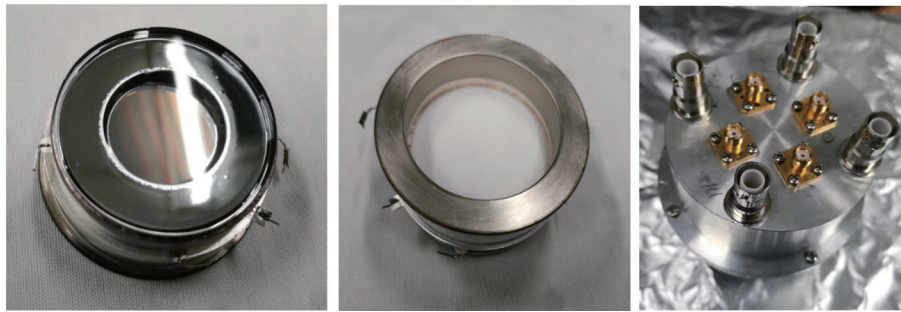


图13 MCP/CDL探测器实物  
Fig. 13 MCP/CDL detector

表1 探测器主要技术指标实测结果

Table 1 Measured results of main technical indicators of the detector

Parameter	Index
Spatial resolution	$\geq 60 \mu\text{m}$
Time resolution	$\geq 78 \text{ps}$
Dark count	$< 50 \text{ counts/s}\cdot\text{cm}^2$
Gain	$1.63 \times 10^6$
Operating wavelength	400~900 nm
Spectral sensitivity	57.69 mA/W

### 4.2 光子计数激光三维成像试验

利用研制的MCP/CDL探测器样片搭建了演示验证原理样机并进行了初步的光子计数激光三维成像试验。图14所示为研制的基于MCP/CDL探测器的光子计数激光三维成像系统的原理样机及试验场景。其中,激光发射组件采用由长春新产业光电技术有限公司研制的全固态二极管泵浦Nd:YAG激光器(MPL-N-532 nm-100  $\mu\text{J}$ -19071229),而镜头则采用商用Nikon 70~300 mm变焦镜头。

光子计数激光三维成像试验基本原理如图15所示。通过半透半反镜抽取一小部分发射激光照射在单元APD探测器上作为计数模块的计数起始信号,获取起始时间 $t_1$ ,由此实现激光发射与时间相关单光子计数(Time-Correlated Single Photon Counting, TCSPC)模块的同步,可以消除外激发同步信号抖动引起的同步性降低问题。为了调试后端电子学和相关处理软件并优化TCSPC测试精度,首先完成时间测量精度。之后将距离信息与二维图像信息融合,由此形成三维数据。

利用图15所述系统,在8 m的距离处对具有不同高度差的目标进行了光子计数三维成像。图16给出了第一组成像结果。可以看到,系统能够轻松地将距离成像系统不同距离的目标区分出来。此时,两个目标表面之间的距离为40 cm,远远大于MCP/CDL探测器的计时精度,因此对系统三维成像能力的验证是不充

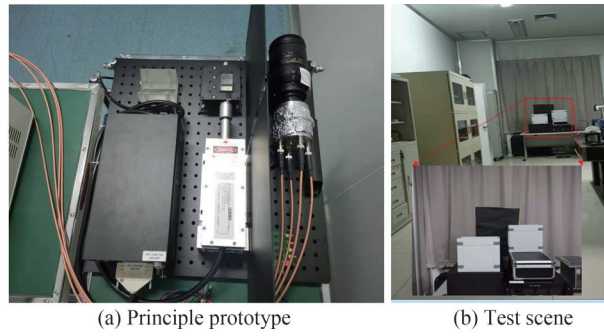


图 14 MCP/CDL 光子计数激光三维成像系统原理样机及试验场景  
Fig. 14 Principle prototype and test scene of MCP/CDL photon counting laser 3D imaging system

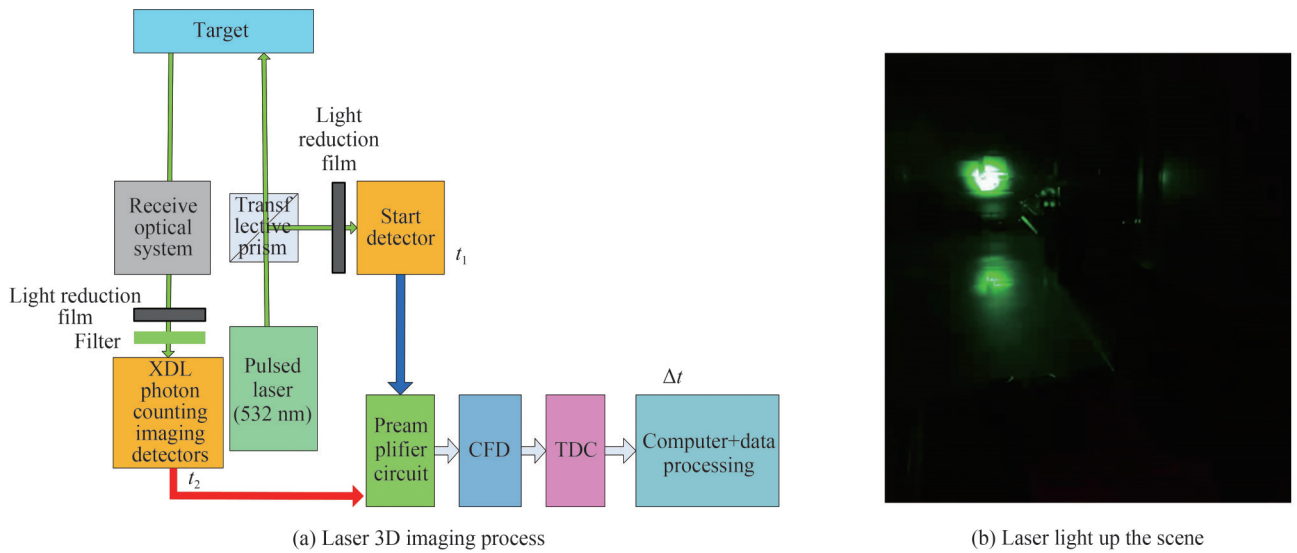


图 15 激光三维成像工作流程及激光发射后的场景  
Fig. 15 Laser 3D imaging workflow and scene after laser launch

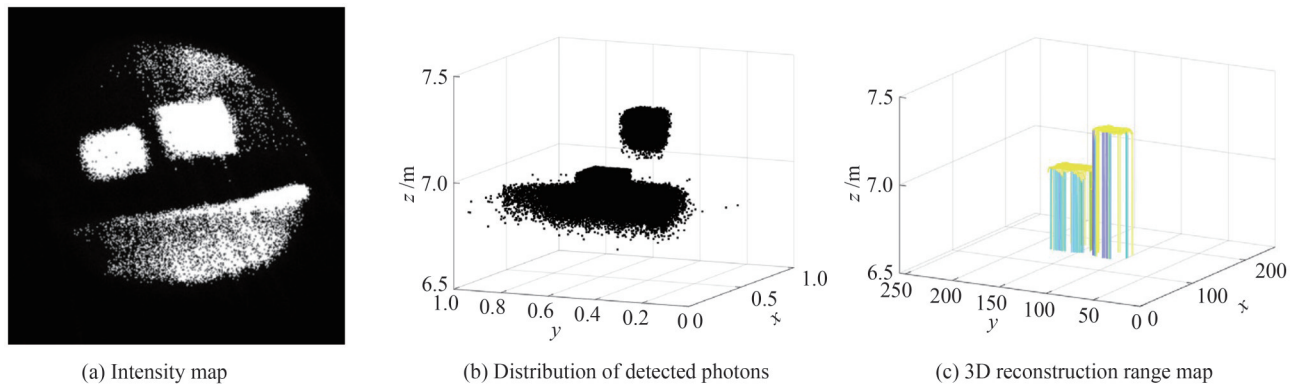


图 16 第一组光子计数激光三维成像试验  
Fig. 16 The first group of photon counting laser 3D imaging experiments

分的。因此,为了进一步验证系统的三维成像能力,开展了第二组成像试验。

第二组实验基于已有的扫描方式 TCSPC 三维成像雷达系统进行<sup>[26]</sup>,利用研制的 CDL 光子计数成像探测器及搭配的光学接收镜头探测目标的回波光子信息。实验系统组成框图如图 17 所示,主要由脉冲激光器、发射光学系统、扫描振镜及控制系统、接收光学系统、研制的光子计数成像探测器、TCSPC 电路模块以及计算机控制与数据处理等构成。

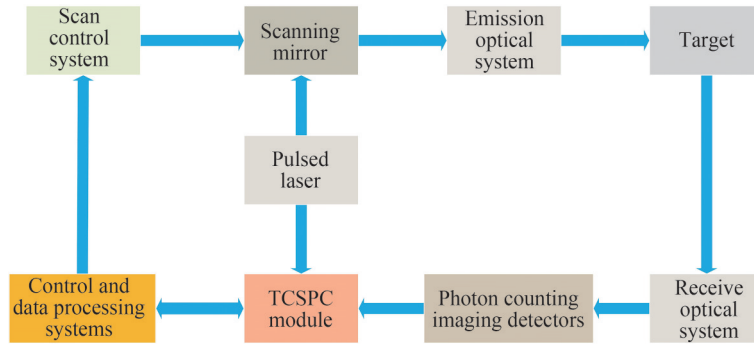


图 17 扫描方式激光三维雷达系统框图

Fig. 17 Scanning mode laser 3D radar system block diagram

测试实验在暗室环境中进行,系统中激光器输出脉冲重复频率设置为 10 kHz,扫描像素数目为  $100 \times 100$ ,通过扫描 TCSPC 三维成像雷达系统获得的目标三维成像结果如图 18 所示。可见,采用研制的 MCP/CDL 光子计数成像探测器成功获取了目标的三维信息。根据所搭建实验系统的性能,在目标距离 6.8 m 时,实现了优于 5 mm 的距离分辨。

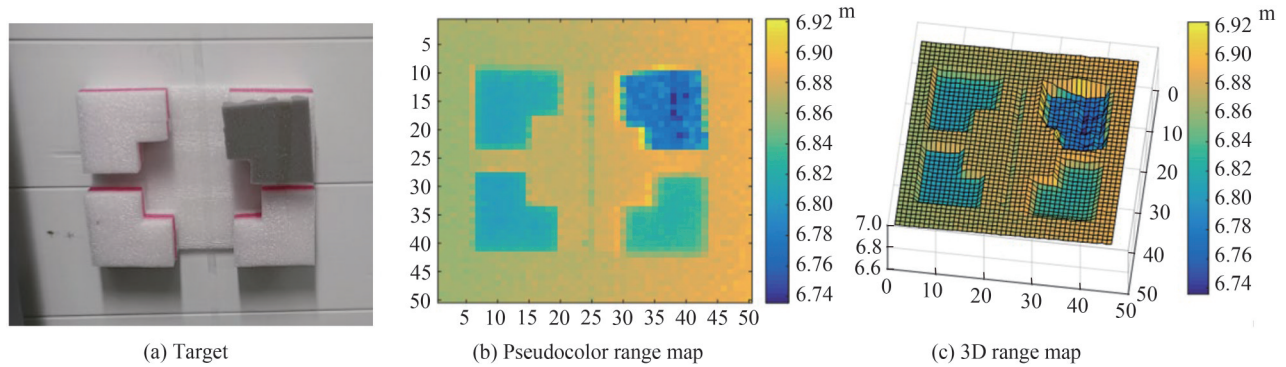


图 18 实验采用的测试目标及三维成像结果

Fig. 18 The target used in the experiment and the 3D imaging results

## 5 结论

本文依托自主研发的交叉延迟线位敏阳极 MCP/CDL 探测器,提出了一种光子计数激光三维超分辨成像技术,详细介绍了该技术成像机理、全链路建模与仿真特性分析、可突破时空分辨硬件限制的三维超分辨重建算法,并对探测器样片原理样机进行了试验验证。研究表明:基于 MCP/CDL 探测器的光子计数激光三维超分辨成像技术具备在远距离获得高时空分辨三维图像潜力,是值得进一步探索的可服务于天基态势感知目标精细成像的技术途径。但是,由于需要光子累积,目前系统的成像时间较长,一般在十几分钟量级。接下来将从持续提升包括时空分辨率、成像速率等在内的探测器性能,及改进超分辨重建算法两方面进行研究,为远距离小目标的精细三维成像奠定基础。

**致谢** 感谢中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子学国家重点实验室张同意老师和康岩老师提供的大力协助。

### 参考文献

- [1] DALY M G, BARNOUIN O S, DICKINSON C, et al. The OSIRIS-REx laser altimeter (OLA) investigation and instrument[J]. Space Science Reviews, 2017, 212(1): 899-924.
- [2] ANTHONY W Y, KRAINAK M A, HARDING D J, et al. Development effort of the airborne lidar simulator for the lidar surface topography (LIST) mission[C]. International Society for Optics and Photonics, 2011, 8182: 38-43.
- [3] HARUYAMA J, OHTAKE M, MATSUNAGA T, et al. Global high-resolution stereo mapping of the moon with the SELENE Terrain Camera[J]. Advances in Geosciences, 2006, 3:101-108.
- [4] WU B, GUO J, ZHANG Y, et al. Integration of Chang'E-1 imagery and laser altimeter data for precision lunar

- topographic modeling[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 2011, 49(12): 4889-4903.
- [5] SUN Jianfeng, JIANG Peng, ZHANG Xiuchuan, et al. Experimental research of  $32 \times 32$  InGaAs Gm-APD arrays laser active imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(12): 89-93.  
孙剑峰, 姜鹏, 张秀川, 等.  $32 \times 32$  面阵 InGaAs Gm-APD 激光主动成像实验[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 89-93.
- [6] LIANG Y, WU E, CHEN X, et al. Low-timing-jitter single-photon detection using 1-GHz sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiode[J]. IEEE Photon Technology Letters, 2011, 23(13): 887-889.
- [7] GE Peng, GUO Jingjing, CHEN Cong, et al. Photon-counting 3D imaging based on Geiger-mode APD array[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 316-323.  
葛鹏, 郭静菁, 陈丛, 等. 基于盖革 APD 阵列的光子计数三维成像[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 316-323.
- [8] LI Zhengping. Long range single-photon three-dimensional imaging[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.  
黎正平. 远距离单光子三维成像的技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [9] LI Z P, HUANG X, CAO Y, et al. Single-photon computational 3D imaging at 45 km[J]. Photonics Research, 2020, 8(9): 1532-1540.
- [10] LI Zhaohui. Multi-beam photon-counting laser Imaging[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.  
李召辉. 多光束光子计数激光成像技术研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [11] LI Z P, YE J, HUANG X, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. Optica, 2021, 8(3): 344-349.
- [12] LI Z P, HUANG X, JIANG P Y, et al. Super-resolution single-photon imaging at 8.2 kilometers[J]. Optics Express, 2020, 28(3): 4076-4087.
- [13] KANG Yan. Research on single photon counting lidar 3D imaging technology with a few echo photons[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.  
康岩. 基于少量回波光子的单光子计数雷达三维成像技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [14] HEINRICHS R, AULL B F, MARINO R M, et al. Three-dimensional laser radar with APD arrays[C]. International Society for Optics and Photonics, 2001, 4377: 106-117.
- [15] MARINO R M, STEPHENS T, HATCH R E, et al. A compact 3D imaging laser radar system using Geiger-mode APD arrays: system and measurements[C]. Laser Radar Technology and Applications, 2003, 5086: 1-15.
- [16] RICHARD M, MARINO W R, DAVIS G C, et al. High-resolution 3D imaging laser radar flight test experiments[C]. Laser Radar Technology and Applications X, 2005, 5791: 138-151.
- [17] AULL B F, SCHUETTE D R, YOUNG D J, et al. A study of crosstalk in a photon counting imager based on silicon geiger-mode avalanche photodiodes[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(4): 2123-2132.
- [18] AKIYAMA A, WATANABE T, DOSHIDA M, et al. Optical fiber imaging laser radar [J]. Optical Engineering, 2005, 44(1): 016201.
- [19] JIN C F, WANG Y, CAO L, et al. Design of fiber-array imaging laser radar system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(11): 115-123.
- [20] ITO K, NICLASS C, AOYAGI I, et al. System design and performance characterization of a MEMS based laser scanning time-of-flight sensor based on a  $256 \times 64$  pixel single photon imager[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(2): 6800114.
- [21] KRICHEL N, MCCARTHY A, BULLER G S. Resolving range ambiguity in a photon counting depth imager operating at kilometer distances[J]. Optics Express, 2010(18): 9192-9206.
- [22] CHAN S, HALIMI A, ZHU F, et al. Long-range depth imaging using a single-photon detector array and non-local data fusion[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-10.
- [23] GYONGY I, HUTCHINGS S W, HALIMI A, et al. High-speed 3D sensing via hybrid-mode imaging and guided upsampling[J]. Optica, 2020, 7(10): 1253-1260.
- [24] HENDERSON R K, JOHNSTON N, HUTCHINGS S W, et al. 5.7 a  $256 \times 256$  CMOS40 nm/90 nm 3D-Stacked 120 dB dynamic-range reconfigurable time-resolved SPAD imager[C]. 2019 IEEE International Solid-State Circuits Conference, San Francisco, CA, USA, 2019: 106-108.
- [25] RUGRT A, MCLAUGHLIN S, HENDERSON R K, et al. Robust super-resolution depth imaging via a multi-feature fusion deep network[J]. Optics Express, 2021, 29(8): 11917-11937.
- [26] KOO J, HALIMI A, MCLAUGHLIN S, et al. A bayesian based deep unrolling algorithm for single-photon lidar systems [J]. arXiv preprint arXiv: 2201.10910, 2022.
- [27] JONES, A H, MARCH, S D, BANK S R, et al. Low-noise high-temperature AlInAsSb/GaSb avalanche photodiodes for  $2\text{-}\mu\text{m}$  applications[J]. Nature Photonics, 2020, 14(9): 559-563.
- [28] HENDERSON R K, JOHNSTON N, CHEN H, et al. A  $192 \times 128$  time correlated single photon counting imager in 40nm CMOS technology[C]. IEEE European Solid-State Circuits, 2018: 54-57.

- [29] MORIMOTO K, ARDELEAN A, WU M L, et al. Megapixel time-gated SPAD image sensor for 2D and 3D imaging applications[J]. *Optica*, 2020, 7(4): 346-354.
- [30] SCARCELLA C, BOSO G, RUGGERI A, et al. InGaAs/InP single-photon detector gated at 1.3 GHz with 1.5% afterpulsing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(3): 17-22.
- [31] ZHANG Xiuchuan, JIANG Liqun, GAO Xinjiang, et al. Fabrication of InGaAs/InP geiger-mode avalanche focal arrays [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, 36(3): 356-360.  
张秀川, 蒋利群, 高新江, 等. InGaAs/InP 盖革模式雪崩焦平面阵列的研制[J]. *半导体光电*, 2015, 36(3): 356-360.
- [32] LIU Kaibao, YANG Xiaohong, HE Tingting, et al. Indium phosphide-based near-infrared single photon avalanche photodiode detector arrays[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(22): 9-20.  
刘凯宝, 杨晓红, 何婷婷, 等. InP基近红外单光子雪崩光电探测器阵列[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(22): 9-20.
- [33] SMITH A M, HILL R S, VRBA F J, et al. Far-ultraviolet MAMA detector imagery and emission-line CCD imagery of NGC 6240[J]. *The Astrophysical Journal*, 1992, 391: 81-84.
- [34] SIEGMUND O H W, STOCK J M, MARSH D R, et al. Delay-line detectors for the UVCS and SUMER instruments on the SOHO Satellite[C]. *SPIE*, 1994, 2280:89-100.
- [35] BAESTOW M A, BANNISR N P, CRUDDACEB R G, et al. The joint astrophysical plasmadynamic experiment (J-PEX): a high-resolution rocket spectrometer[J]. *SPIE*, 2000, 4140: 199-210.
- [36] YOSHIOKA K, MURAKAMI G, YOSHIKAWA I, et al. EUV observation from the earth-orbiting satellite, EXCEED [J]. *Advance in Space Research*, 2010, 45(2): 314-321.
- [37] YAN Qiurong. Research on time-correlated single photon counting techniques based on MCP position anode detector[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics), 2012.  
鄢秋荣. 基于MCP位敏阳极探测器的时间相关单光子计数技术研究[D]. 西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2012.
- [38] LIU Yongan, YAN Qiurong, SHENG Lizhi, et al. Influence of charge cloud size on performance of UV photon-counting imaging detector[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(4): 048501.  
刘永安, 鄢秋荣, 盛立志, 等. 电荷云尺寸对紫外光子计数成像探测器性能的影响[J]. *物理学报*, 2011, 60(4): 048501.
- [39] LIU Yongan, LI Linsen, LIU Zhe, et al. Study on position-sensitive anode in photon counting imaging detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0404001.  
刘永安, 李林森, 刘哲, 等. 光子计数成像探测器位敏阳极的研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0404001.
- [40] LIAO Zhenghua. A Single photon imaging system based on wedge strip anodes detector[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics), 2008.  
缪震华. 基于楔条形阳极探测器的单光子成像系统[D]. 西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2008.
- [41] MI Xiaoshi, ZHAO Hui, FAN Xuewu, et al. Photon-counting laser altimetry based on microchannel plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 32(12): 1228001.  
米小什, 赵惠, 樊学武, 等. 基于微通道板的单光子激光测高技术研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1228001.
- [42] YIN H M, ZHAO H, XIA S Y, et al. Position sensitive micro-channel plate based photon counting three-dimensional imaging for long space objects: simulation and characteristics analysis [C]. *The International Society for Optical Engineering*, 2020, 11567: 669-704.
- [43] ROGGEMANN, M C, HAMADA K, LUU K, et al. Three-dimensional imaging and satellite attitude estimation using pulse laser illumination and a remote ultra-low light imaging (RULLI) sensor for space situational awareness (SSA)[R]. Air Force Research Lab Kihei Maui Hi Detachment 15, 2008.
- [44] PRIEDHORSKY W C, SMITH R C, HO C. Laser ranging and mapping with a photon-counting detector[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(3): 441-452.
- [45] LUO Hanjun. Research on key technique of the single photon imaging and detection [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013.  
罗韩君. 单光子成像探测关键技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2013.
- [46] ZHAO Wen. Research on performance and range estimation technology of 3D flash lidar[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.  
赵文. 3D非扫描激光雷达成像性能及距离估计技术研究[D]. 北京:北京理工大学, 2014.
- [47] GONG Daoran, LI Sining, JIANG Peng, et al. Research on super resolution reconstruction of laser radar range profile[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 60-66.  
龚道然, 李思宁, 姜鹏, 等. 激光雷达三维距离像超分辨重构方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(8): 60-66.
- [48] XUE R K, KANG Y, ZHANG T, et al. Sub-pixel scanning high-resolution panoramic 3D imaging based on a SPAD array[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(4): 1-6.

# Position-sensitive Micro-channel-plate Having Cross-delay-line Detector Based Photon-counting Three-dimensional Super-resolution Laser Imaging (Invited)

ZHAO Hui<sup>1</sup>, YIN Haomeng<sup>1,2</sup>, LIU Yongan<sup>1</sup>, SHEN Lizhi<sup>1</sup>, YANG Xianghui<sup>1</sup>, ZOU Gangyi<sup>1</sup>,  
XIA Siyu<sup>1</sup>, YANG Mingyang<sup>1,2</sup>, FAN Xuewu<sup>1</sup>

(1 *Xian Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Laser-based active detection and imaging is where the space situational awareness heading in the future. The photon-sensitive detector is the core of the photon-counting-based three-dimensional laser imaging system whose working range is much longer and which is capable of realizing both high-precision distance measurement and three-dimensional surface reconstruction at the same time. Therefore, the photon-counting-based three-dimensional laser imaging is especially suitable for realizing ranging and three-dimensional imaging of distant space targets in a deep space background. In this manuscript, the position-sensitive Micro-channel-plate with Cross-delay-line (MCP/CDL) detector-based photon-counting three-dimensional imaging technique is proposed. First of all, the research background of this manuscript is systematically introduced and the contribution of the work reported to the field of photon-counting-based three-dimensional laser imaging is summarized. After that, starting from the characteristics of the MCP/CDL detector itself, the photon-counting three-dimensional laser imaging system by using the position-sensitive MCP/CDL detector is designed and the corresponding operating mode is discussed simply, which gives a reference for real application in future. After that, the principle of the proposed position-sensitive MCP/CDL detector-based photon-counting three-dimensional laser imaging technique is introduced from two aspects. In the one hand, how to use MCP/CDL detector to realize the synchronous timing and positioning of arriving photon is qualitatively explained. On the other hand, with the help of the classical LIDAR equation, the echo power model and the echo photon model generated from the echo power model are given respectively. Based on the two basic models, three important models including the signal to noise ratio model, detection probability model, and ranging accuracy model are derived one by one, based on which the performance of the proposed technique is investigated numerically. After establishing the all-chain imaging model, the potentials of this technique in space-borne space targets monitoring are investigated through end-to-end simulated imaging and performance analysis. By using the Monte Carlo simulation method, the simulated photon-counting three-dimensional laser imaging is carried out with different conditions and in this way, the potential performance of this system in space situational awareness is demonstrated vividly. However, nowadays, most photon-counting detectors including the MCP/CDL detector have a low spatial resolution. In this case, the ranging imaging has a strong mosaic effect which is hard to resolve finer details. Besides that, the ranging accuracy is mainly determined by timing electronics. Considering these two situations, how to improve the spatial and temporal resolution is also discussed. Taking the finer details provided by the higher resolution intensity image as reference, the spatial resolution of ranging images could be improved prominently. At the mean time, a controllable time delay is introduced to realize super-sample in ranging direction and the higher ranging accuracy could be obtained by fusing multiple range images. According to numerical simulations, the potential of this system in realizing super-resolution both in the spatial domain and in the temporal domain is demonstrated. Finally, the prototype camera using MCP/CDL detector is designed, tested and fabricated. By using the prototype camera, two groups of three-dimensional laser imaging experiments are carried out. The results demonstrate that this technique has the capability in resolving small distance variation of being less than 5 mm when the imaging distance is about 6.8 m. Therefore, the position-sensitive micro-channel-plate having cross-delay-line based photon-counting three-dimensional laser imaging is proven to be effective.

**Key words:** Space situational awareness; Active detection; Three-dimensional laser imaging; Photon-counting detector; Super-resolution reconstruction

**OCIS Codes:** 030.5260; 100.6640; 110.6880; 040.3780