

激光测距的空间卷积神经网络信号处理研究

白一波*, 潘康立, 耿林

华北光电技术研究所, 北京 100015

摘要 激光测距在现代激光应用领域已经得到了广泛的应用。针对远距离激光测距中弱信号探测的问题, 研究了一种基于阵列雪崩光电二极管(Avalanche Photon Diode, APD)探测器的光子计数法与卷积神经网络相结合的综合信号处理方法, 从理论与仿真两方面验证了该方法的有效性。该方法可提升信号识别能力。提出了光子计数法和卷积神经网络相结合的空间三维卷积神经网络信号处理模型, 该模型通过三级信号辨识, 能够在“强背景、弱信号”情景下将信号光的辨识度提升近一倍。

关键词 测量; 盖格模式; 脉冲激光测距; 阵列探测; 光子计数; 卷积神经网络; 信号处理

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2304001

1 引言

激光距离测量系统因体积小、精度高以及响应速度快等优点而被广泛应用于远距离测量、大气浓度监测、激光三维成像、星地激光测距^[1]等领域。基于飞行时间法的激光脉冲测距可应用于远程测距中, 回波信号的可辨识度随着距离平方的增加呈现近似指数衰减趋势。在某些特定情况下, 激光回波能量为光子量级^[2], 为了获得回波信号, 就需要光子量级的探测能力和信号处理能力。单光子雪崩二极管(Single Photon Avalanche Diode, SPAD)是一种有效的单光子量级探测器件^[3], 其是近年来得到较多研究和应用的主要器件类型之一。此外, 具备单光子探测能力的器件还有光电倍增管、超导雪崩二极管(SAPD)、多像素光子计数器(MPPC)^[4]等。

在单元盖革模式雪崩光电二极管(Avalanche Photon Diode, APD)应用中, 常常因为背景光相对于信号光过强, 信道饱和或信道阻塞。为了弥补单个探测器在光子数分辨方面的缺陷, 国内外都致力于提升探测器阵列维度的研究^[5]。20 世纪 90 年代, 美国麻省理工学院林肯实验室首先研制出了阵列 APD 探测器件, 并将其应用于盖革模式 APD 阵列的激光三维雷达中, 其中代表作有 Gen 系列激光

雷达系统^[6-7]。美国 APOLLO 站也在地月距离测量中使用 4×4 阵列并取得了较好的结果^[8-9]。中国云南天文台开展了基于阵列探测技术的激光测距试验, 2017 年成功将阵列超导纳米线单光子探测器和多通道事件计时器等阵列探测技术应用于激光测距试验系统中, 分别在 2017 年 3 月和 2018 年 3 月的激光测距试验中, 成功采集了 2×2 和 4×4 阵列激光测距数据^[10-11]。

本文基于盖革模式阵列 APD 激光远程测距的光子数计数方法和应用了卷积神经网络的信号处理方案, 提出了一种基于空间三维卷积神经网络处理激光测距信号的算法。在硬件改动最小的情况下, 提升了阵列单光子激光测距性能, 降低了系统平台的硬件负担, 系统可以应用于高机动平台。

2 信号接收模型

本算法以 $N \times N$ 盖革模式 APD 阵列作为光子探测模块的探测器, 为了方便讨论, 此处取 $N = 4$ 。 4×4 路 APD 阵列信号接收模型如图 1 所示。

光学接收模块通过折返式长腔光学结构, 将入射角度小于 θ_r 的入射光会聚于 4×4 APD 探测器上, 得到的 16 路高速数字信号经过阵列 APD 电路处理后, 传输给主板上的现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)数据处理模块。

收稿日期: 2021-03-30; 修回日期: 2021-04-18; 录用日期: 2021-04-27

通信作者: *596876121@qq.com

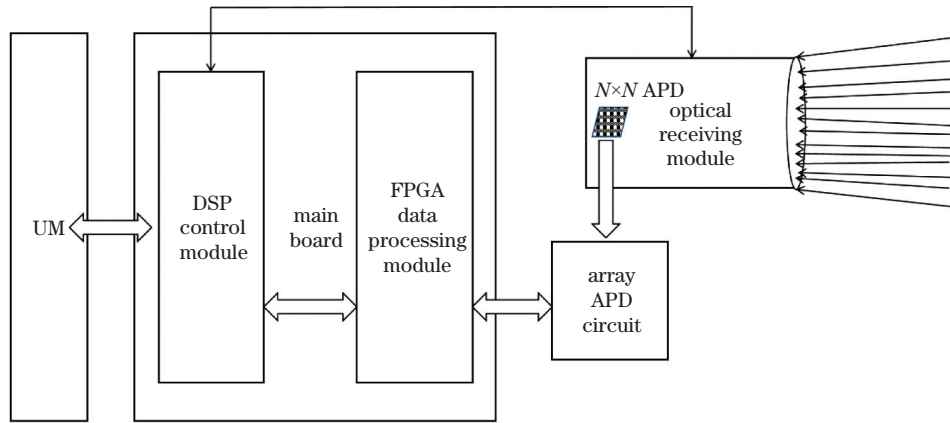


图 1 信号接收模块示意图

Fig. 1 Schematic of signal receiving module

这个回波信号就可以视为信号回波标志 T_{STOP0} 。此外,主板中的数字信号处理器(Digital Signal Processing, DSP)还可根据上位机(Upper Machine, UM) 的设置,对光学模块进行一定的调控。

盖革模式 APD 探测器只能探测到光子的有无,而无法获得光子的数量信息。在远距离情况下,由于回波信号光的光子数太少,背景光淹没信号光,信号光子丢失,而探测到的信号以无规则的背景光子响应信号为主。本文将短时光子数累积和阵列光子数判定相结合,设计了一种通过光子数计数和卷积神经网络来提高远程测距信号辨识能力的信号处理算法。

2.1 单通道光子数统计模型

在单路盖革模式 APD 中,响应光子产生响应

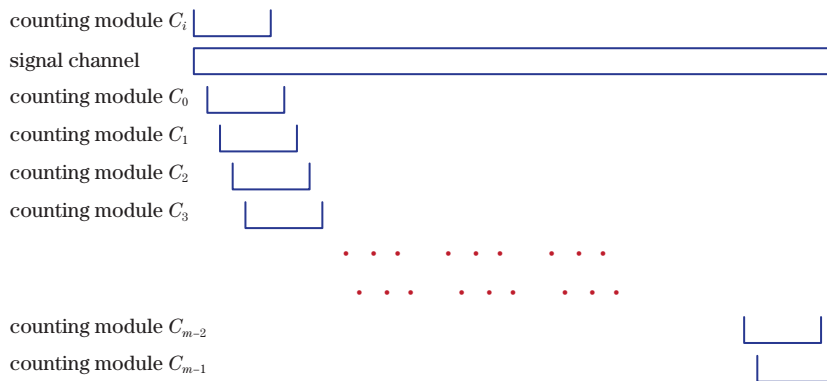


图 2 m 个计数模块的计数方案示意图

Fig. 2 Schematic of counting scheme for m counting modules

计数模块 C 对 t_{unit}/M 时间内 APD 响应的光子进行计数,每隔 t_{step} 就建立一个新的计数模块,依次类推,对信号通道进行连续重复计数,然后将计数模块 C 的数据整合为光子数信号 $S_c(t)$:

信号的事件服从泊松分布。在整个观察窗口时域 $[t_0, t_0 + t_{unit}/M]$ 内,APD 响应到背景光子的事件出现 k 次的概率为

$$P \left[N \left(t_0 + \frac{t_{unit}}{M} \right) - N(t_0) \right] = \frac{(W_t)^k}{k!} e^{-W_t}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

式中: t_{unit}/M 为单位计数区间; W_t 为事件 $N(t)$ 的均值; t_0 为观察窗口初始时刻; t 为时间变量。

盖格模式 APD 可以探测光子的有无,从而获取 0-1 信号,但信号特征较少,难以区分信号光和背景光。为了增强目标信号的可辨识度,采用光子数累积的方法来增强信号光的特征^[12],选用 $m = (t_{unit} - t_{unit}/M)/t_{step} + 1$ 个时间长度为 t_{unit}/M 、步长为 $t_{step} \ll t_{unit}/M$ 的计数模块 C ,如图 2 所示。

$$S_c(t) = \begin{cases} C_0 & , t = 0 \\ C_1 & , t = t_{step} \\ C_2 & , t = 2t_{step} \\ \vdots & \vdots \\ C_{m-2} & , t = (m-2)t_{step} \\ C_{m-1} & , t = (m-1)t_{step} \end{cases} \quad (2)$$

考虑到背景光噪声信号 $S_{no}(t)$ 包含在 $S_c(t)$ 内, 理论信号光可以表示为 $S_{optical} = S_c(t) - S_{no}(t)$, 而暗电流噪声信号 $S_{nc}(t)$ 会在后续电路中加入^[13], 所以单通道接收到的电信号可以表示为

$$S_{elec}(t) = S_c(t) + S_{nc}(t) = \begin{cases} C_0 + C_{nc_0} & , t = 0 \\ C_1 + C_{nc_1} & , t = t_{step} \\ C_2 + C_{nc_2} & , t = 2t_{step} \\ \vdots & \vdots \\ C_{m-2} + C_{nc_{m-2}} & , t = (m-2)t_{step} \\ C_{m-1} + C_{nc_{m-1}} & , t = (m-1)t_{step} \end{cases} \quad (3)$$

卷积是一种常用的增强信号辨识度的数学方法, 可以有效判定激光回波时刻^[14-15]。构造一个一维线卷积核 $S_{Conv}(t) = S_{pulse}(t) * S_{pulse}(t)$, 其中 $S_{pulse}(t)$ 为一段时间长度为 t_{pulse} 且与信号光脉冲包络对应的数字信号。然后以卷积核 $S_{Conv}(t)$ 作为卷积工具, 对接收到的电信号进行卷积处理, 得到

$$S(t) = S_{elec}(t) * S_{Conv}(t) \quad (4)$$

通过对 $S(t)$ 的解算, 就可以获得脉冲回波的时间信息 T_{STOP0} ^[16]。考虑探测器件引入的响应延迟误差 T_{RR} , 检测电路的延迟时间误差 T_{RCD} , 算法引入的模糊误差 T_{error} , 那么用于计算的回波时刻值应该为 $T_{STOP} = T_{STOP0} - T_{RR} - T_{RCD} - T_{error}$ 。关于时间游走误差的研究已经十分充分, 可以通过电路设计进行适当调控^[17-19]。又因为激光发射时间 $T_{START} = T_{START0} - T_{SR} - T_{SCD}$, 其中 T_{START0} 是前置探头检测到激光发射的时间, T_{SR} 是激光发射前置探头的响应延迟误差, T_{SCD} 是发射探头电路的延迟误差, 所以测算距离的基本公式可以表示为

$$R = c \frac{T_{dif}}{2} = c \frac{T_{STOP} - T_{START}}{2} = \frac{c}{2} (T_{STOP0} - T_{START0} - T_{RR} + T_{SR} - T_{RCD} + T_{SCD} - T_{error}), \quad (5)$$

式中: c 为光速。

2.2 阵列光子信号处理模型

延续单路光子数统计模型的思路, 阵列探测器件以 $t_{FrameStep} \geq t_{step}$ 的时间间隔进行逐帧光电信号的同步采集, 获得 $N \times N$ 的阵列数字信号阵列。原则上, 为了工程的可实现性, $t_{FrameStep}$ 应该设定为与电路可处理的最小时间单位相匹配。为了方便讨论, 我们接下来以 4×4 阵列为例。

如图 3 所示, 足够远的激光回波能量很小, 通常为数十个光子的能级, 经接收镜头整形后投射在阵列面上。光子数极少且作用距离远, 这里可以近似看作 4×4 方格中投掷小球的模型, 如图 4 所示。根据激光特性, 远场光斑存在一定的分布特征^[20], 在本算法中, 信号光的光子群在阵列中的投射服从二维类高斯分布, 即



图 3 光子入射示意图

Fig. 3 Schematic of photon incidence

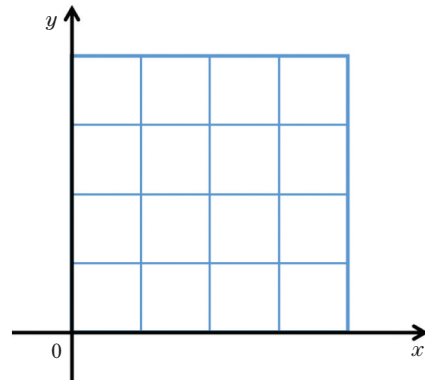


图 4 阵列探测单元模型示意图

Fig. 4 Model diagram of array detection unit

$$f_{sig}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} - 2\rho \frac{(x-\mu_x)(x-\mu_y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(x-\mu_y)^2}{\sigma_y^2} \right]\right\}, \quad (6)$$

式中: μ_x, μ_y 分别为 x, y 方向的极大值点对应的坐标; σ_x^2, σ_y^2 分别为 x, y 方向的方差; ρ 为 x, y 方向的相关系数。在复杂的实际情况中, μ_x, μ_y 表示为

$$\mu_x = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, \mu_y = \sum_{n=0}^{\infty} b_n y^n, \text{ 其中 } a_n \text{ 和 } b_n \text{ 分别为与 } x^n \text{ 和 } y^n \text{ 对应的常数。}$$

单个点阵中背景光的光子群在时域上呈现泊松分布的特性,均值为 $W_{t \text{ FrameStep}}$ 。为了方便讨论,忽略接收镜筒设计对光子分布的影响。由于背景光是自然光,因此在这 16 个阵列探测单元上,背景光子群的光子数统计特性呈二维均匀分布,即

$$f_{\text{noi}} = \begin{cases} W_{t \text{ FrameStep}} & , \text{at background bright area} \\ 0 & , \text{at background dark area} \end{cases} \quad (7)$$

因此,在这一阵列模型上,光子的概率密度为 $f_{\text{PR}} = f_{\text{sig}} + f_{\text{noi}}$ 。其中, f_{sig} 和 f_{noi} 的区分度越大,越有利于单帧信号光的辨识^[21]。为了提高信号辨识度,我们引入人工智能识别图像的方法,采用图 5 所示的多种特征卷积核,对接收到的阵列数字信号进行逐帧多特征提取。

如图 6 所示,利用卷积神经网络进行特征提取

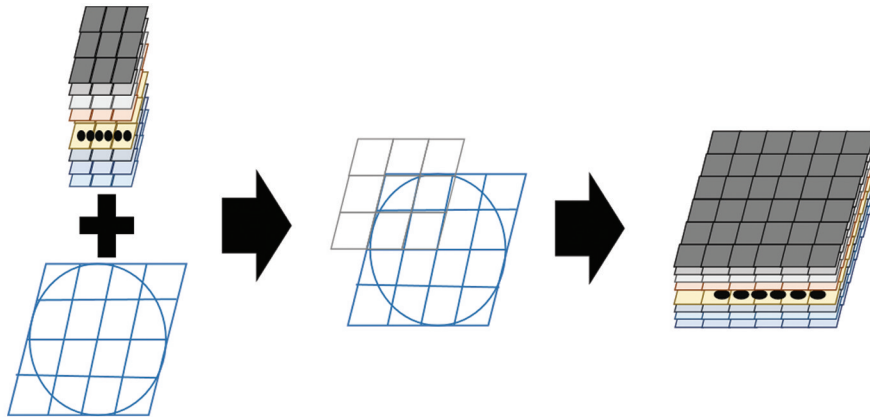


图 6 信号特征提取示意图

Fig. 6 Schematic of signal feature extraction

3 信噪比和信号辨识度

信噪比(SNR)是信号处理技术中通常用来量化评定信号处理能力的标准之一。通常激光测距系统中信噪比(R_{SN})^[24]可以表示为

$$R_{\text{SN}} = \frac{N_s}{\sqrt{N_s + N_b + N_{\text{dk}}^2}} \quad (8)$$

式中: N_s 为平均光子计数值; N_b 为平均背景噪声光子数; N_{dk}^2 为探测器产生的暗计数。但在本算法中,由于卷积对计数值的影响,信噪比 R_{SN} 对算法处理前后的信号评定不够便捷和直观,因此本文使用信号辨识度(Signal recognition, S_R)来作为评定信号处理能力的标准。在本算法中,将信号辨识度定义为拟合光子计数信号中最大值(S_{max})与均值(S_{mean})的差值的对数,即

$$S_R = \lg(S_{\text{max}} - S_{\text{mean}}) \quad (9)$$

后,再对特征提取层进行一定的池化处理,就可以根据激光光学特征,将接收到的阵列信号中的信号光与自然背景光区分开,从而提高信号辨识度。接着,通过单帧识别和多帧对照,利用高速 FPGA 系统实现目标识别和目标变换^[22-23]。

0 0 0	0 0 0	1 0 0	0 1 0
0 1 0	1 1 0	0 1 0	1 1 1
0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 1 0
0 0 0	1 0 0	1 0 1	0 1 0
1 1 1	0 1 0	0 1 0	1 0 1
0 0 0	0 0 1	1 0 1	0 1 0

图 5 特征提取卷积核类型举例

Fig. 5 Examples of convolution kernel types for feature extraction

4 仿真试验

仿真试验采用 MATLAB 进行信号仿真,首先搭建了空间上服从二维类高斯分布的信号光模型和服从均匀分布的背景光模型,模拟光子计数和模拟背景噪声光子计数的平均比值小于 0.289(有 289 个模拟信号光子的时段内同时有 1000 个背景噪声光子),如图 7、8 所示,其中横轴表示模拟时刻长度,纵轴表示信号的有无(0 表示没有检测到光子信号,1 表示检测到光子信号), $S_{11} \sim S_{44}$ 表示对应模拟空间阵列探测器的位置。

在长度为 100 的信号光中拟合入长度为 10000 的背景光,将某一部分作为仿真接收光信号,再通过各个通道卷积运算进行光子数累计,将仿真接收光信号与构造的一维线卷积核进行卷积运算,得到仿真接收电信号,如图 9 所示,其中 $E_{11} \sim E_{44}$ 为对应 $S_{11} \sim S_{44}$ 的仿真接收电信号。

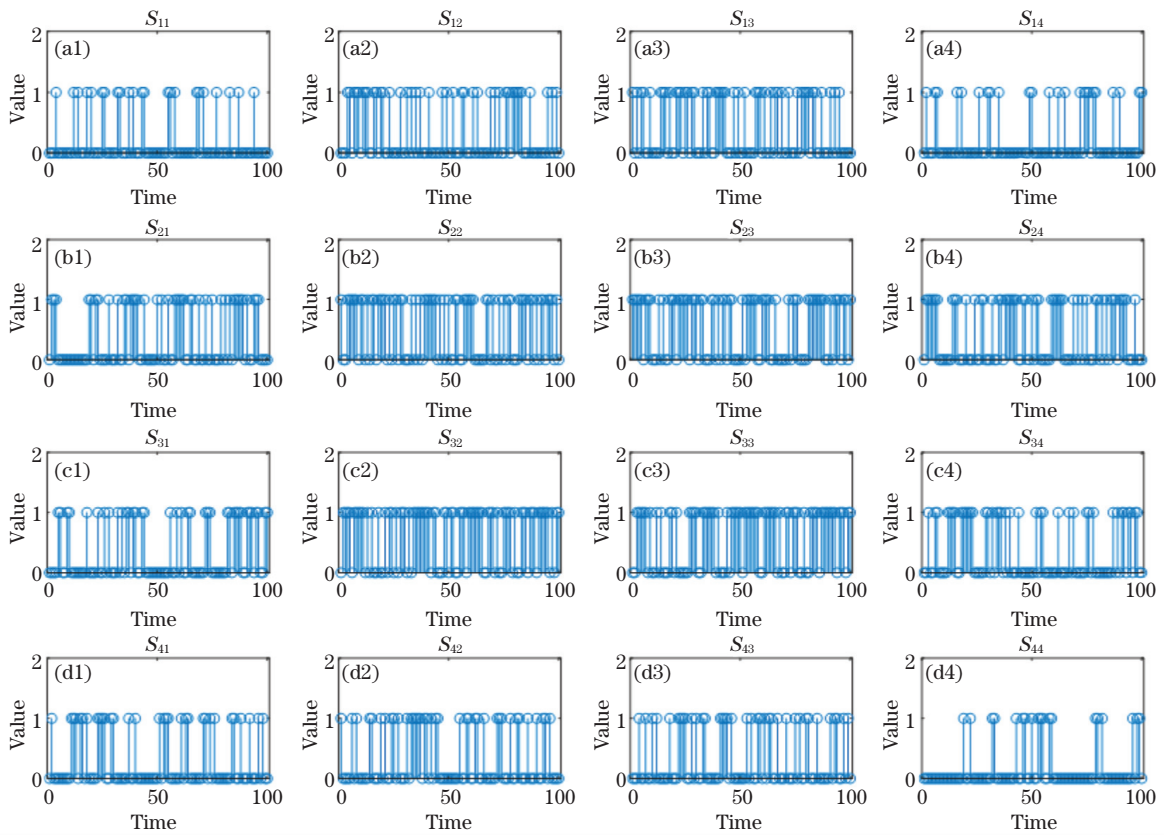


图 7 信号光仿真模型

Fig. 7 Simulation models of signal light

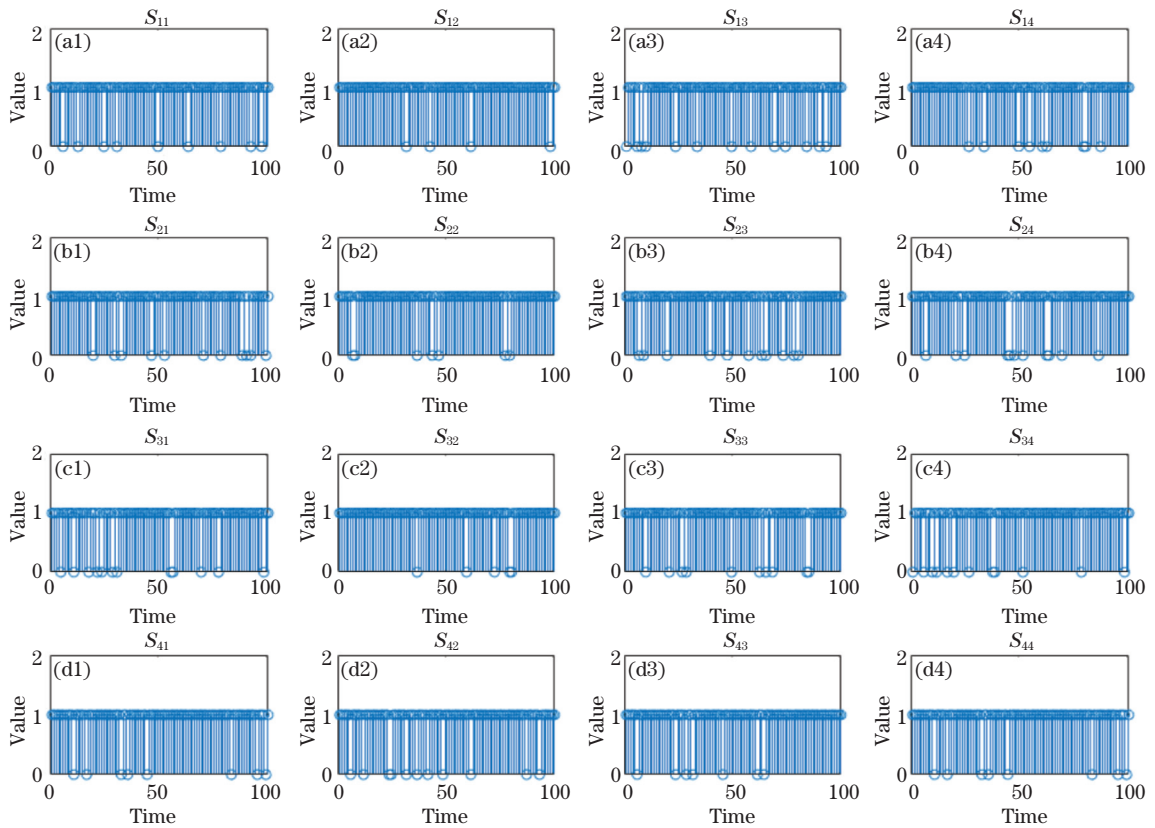


图 8 背景光仿真模型

Fig. 8 Simulation models of background light

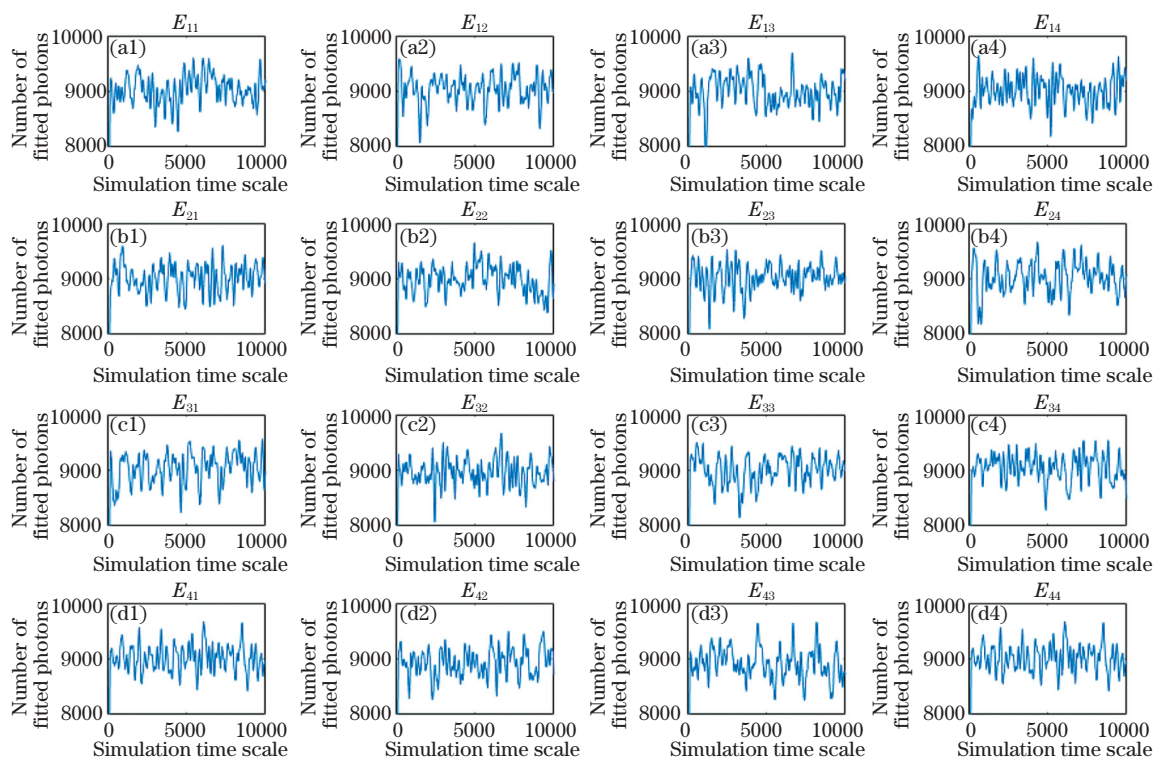


图 9 接收到的电信号仿真图

Fig. 9 Simulation diagrams of received electrical signals

此时, 如果将仿真信号进行简单运算, 会得到图 10 所示的拟合信号, 显然无法辨别出真实信号所在的位置。

但当使用图 11(a) 所示的带有特征的 3×3 卷积核进行二维卷积处理, 然后进行拟合, 就可以得到图 11(b) 所示的拟合信号。

将图 11 和图 10 进行对比, 发现了较为明显的尖峰, 尖峰点对应的横轴坐标就是疑似信号点位置。这样通过更多的特征卷积核对同一信号进行相同操作, 会得到多组类似信号, 如图 12、13 所示。通过对多组信号尖峰进行对比分析, 最终可以得到目标信号的位置, 即 T_{STOP0} , 如图 14 所示。

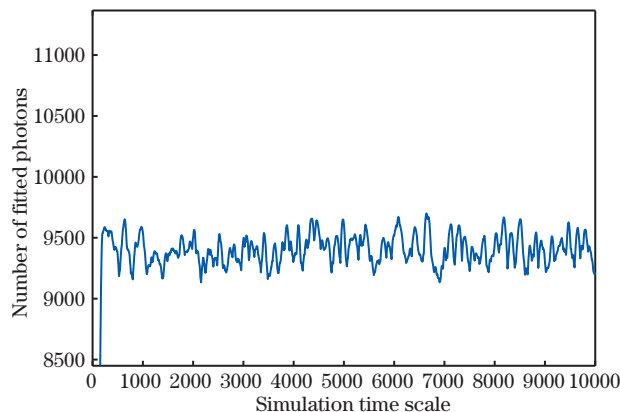


图 10 经简单运算后得到的拟合信号

Fig. 10 Fitted signal obtained by simple operation

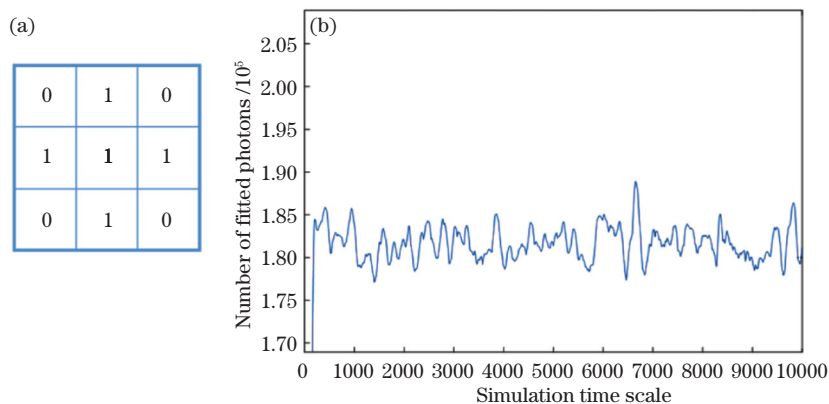


图 11 经二维卷积处理后拟合得到的信号。(a) 3×3 特征卷积核; (b) 拟合信号

Fig. 11 Fitted signal after using 2D convolution treatment. (a) 3×3 feature convolution kernel; (b) fitted signal

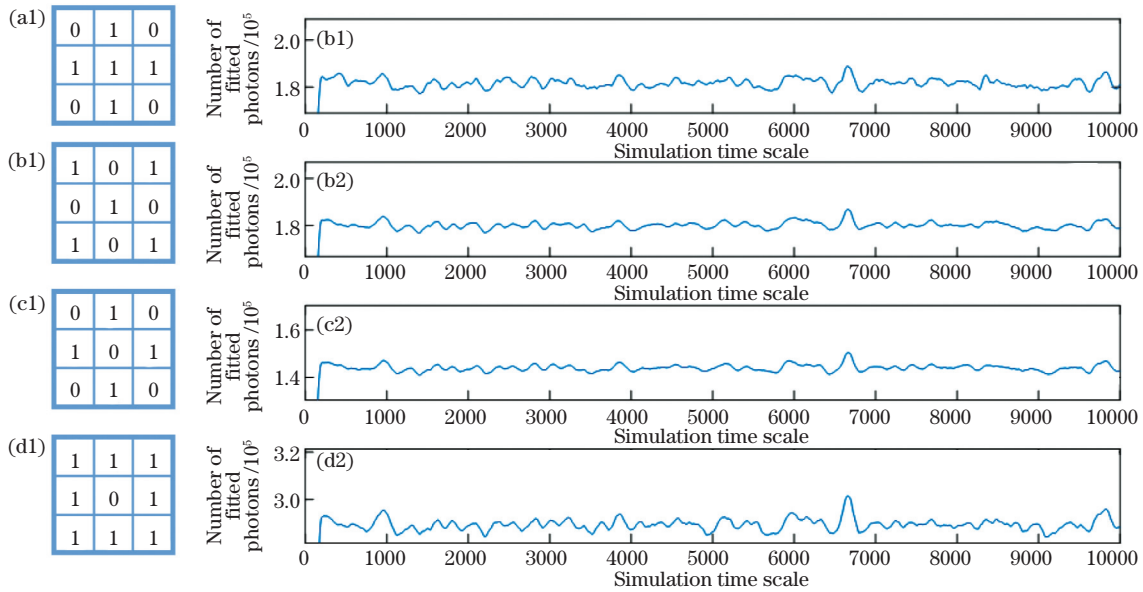


图 12 使用四种 3×3 特征卷积核拟合得到的信号仿真图。(a1)~(a4) 3×3 特征卷积核;(b1)~(b4)拟合信号

Fig. 12 Signal simulation diagrams fitted by using four 3×3 feature convolution kernels.

(a1)-(a4) 3×3 feature convolution kernels; (b1)-(b4) fitting signals

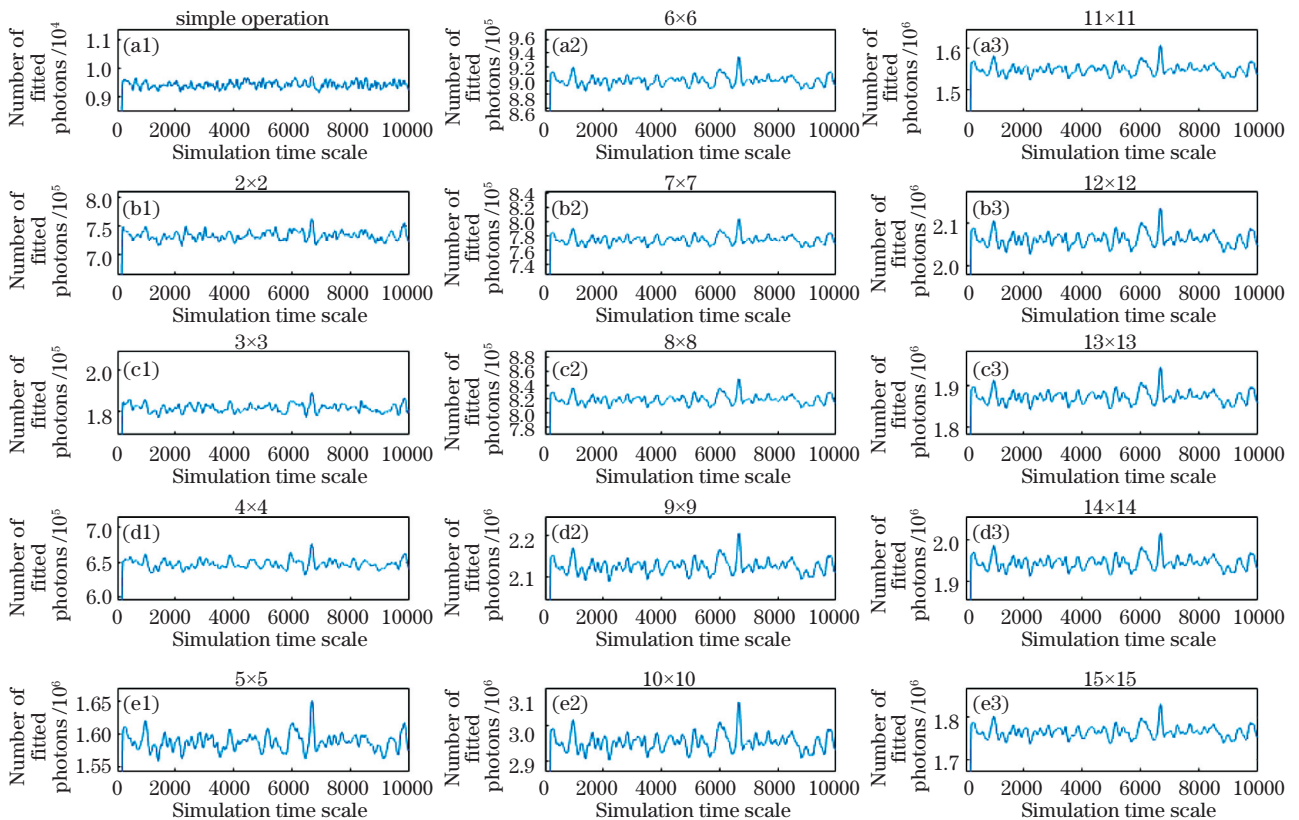


图 13 使用不同 $N \times N$ 特征卷积核后拟合得到的信号仿真图

Fig. 13 Signal diagrams fitted by using different $N \times N$ feature convolution kernels

通过图 10~14 所示的效果对比,可以看到, $N \times N$ 特征卷积核对于分布规律存在差异的信号光和背景光有区分作用。根据多次仿真可知,当 N 相同时,不同特征对信号光和背景光的辨识度的影响有一定差

异,但不同特征核卷积后信号的尖峰点接近; N 越大,特征卷积核描述的特征越详细,但信号光和背景光的辨识度呈现先显著增大后趋于平缓的趋势,可见探测器 N 值和卷积核 N 值达到匹配时信号辨识度最佳。

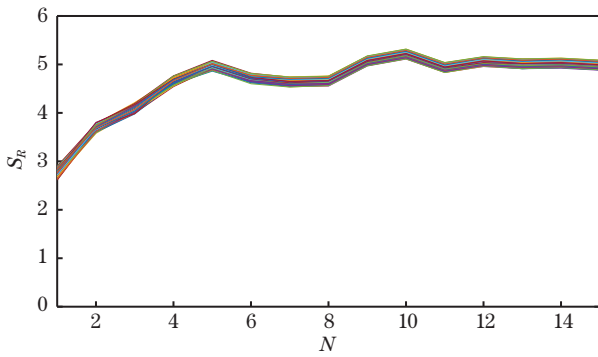


图 14 使用不同 $N \times N$ 特征卷积核后信号辨识度的仿真图
Fig. 14 Simulation diagram of signal recognition degree after using different $N \times N$ feature convolution kernels

5 方案说明与分析

本文提出了基于阵列单光子探测器的空间三维

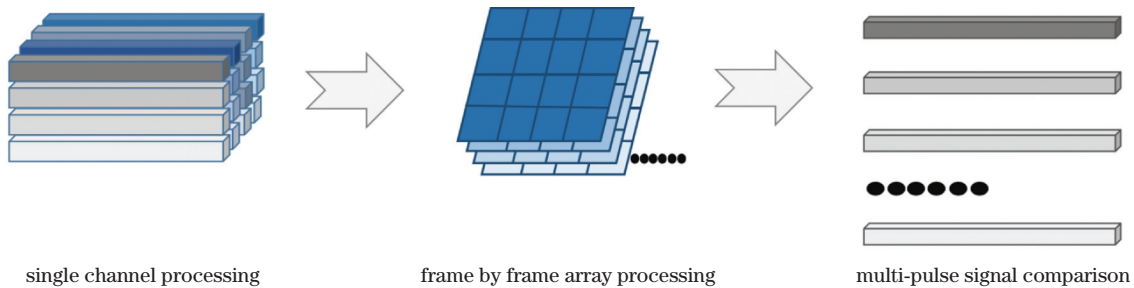


图 15 信号处理算法示意图

Fig. 15 Schematic of signal processing algorithm

图 15 所示信号处理算法是对空间三维信号进行了空间三维卷积神经网络处理。仿真结果显示,本算法可以将信号辨识度提高近一倍,因此具有较好的背景适应能力和微弱信号光辨识能力,能够显著增加盖革模式 APD 可工作时段和可作用距离。自由模式和门控模式均可适用,但随着信道、卷积核复杂度、卷积核维度和关联帧数等增大,出现了附属设计电路繁琐、时序复杂、耗能增大、处理速度降低等问题。

6 结 论

白天的单光子探测计数等存在实现难度大、设计方案复杂等问题。此外,综合考虑功率、系统结构、作用距离等,工程应用中需要性价比最优的设计方案。算法升级是在系统物理结构改动最小的情况下提高系统整体能力的最优方案。

结合现有阵列单光子探测器件及其附属电路应用于激光测距的情景,本着多级提高信号辨识度的思路,设计了一种基于光子数计数和卷积神经网络

卷积神经网络信号处理模型,目的是在正常自然背景光环境下,基于盖革模式 APD 的激光测距系统可以得到较高的信号光与背景光的辨识度,增加信号光的探测成功概率。

本文设计了一种信号处理算法,通过信号自适应增强、光子数累积、统计概率分布等算法来增强信号辨识度,如图 15 所示,可以分为三个信号处理步骤:1)单个通道进行单通道光子信号处理,即通过设定的卷积核对接的数字信号进行一维卷积处理,将二值数字信号转化为离散的有幅值区分的数字信号;2)对各个通道进行同步处理后,将结果逐帧组成阵列数字信号,然后通过二维卷积神经网络,逐帧对信号光进行辨识、对照;3)将步骤 1)和步骤 2)处理后的数据缓存起来,对连续多次解算结果进行逻辑处理(均值、估计等),得到 T_{STOP} 。

的三级信号辨识度优化算法。该算法结合了光子物理散布的统计学分布特征,综合考虑了传统一维信号处理方法和二维卷积神经网络,经过仿真验证,是一套可行的方案。

参 考 文 献

- [1] An N, Guan B W, Zhang Y L, et al. Research progress of satellite laser ranging data processing[J/OL]. Infrared and Laser Engineering: 1-11[2021-03-15]. <https://kns-cnki-net.e1.buaa.edu.cn/kcms/detail/12.1261.TN.20210125.1432.006.html>. 安宁,关博文,张旖伦,等.卫星激光测距数据处理方法研究进展[J/OL]. 红外与激光工程: 1-11[2021-03-15]. <https://kns-cnki-net.e1.buaa.edu.cn/kcms/detail/12.1261.TN.20210125.1432.006.html>.
- [2] Liu Y, An N, Fan C B, et al. Echo characteristics of satellite laser ranging based on Geiger mode SPAD [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(8): 0828002. 刘源,安宁,范存波,等.基于 G-SPAD 的卫星激光测距回波特性 [J]. 光子学报, 2018, 47(8): 0828002.

- [3] Strasburg J D, Murphy T W, Jr, Adelberger E G, et al. The advantages of advantages of avalanche photodiode (APD) arrays in laser ranging applications [C]//In 13th International Laser Ranging Workshop, October 7-11, 2002, Washington, DC, USA. [S.l.: s. n.], 2002.
- [4] Yokoyama M, Nobuhara T, Taguchi M, et al. Development of multi-pixel photon counters [EB/OL]. (2006-05-29)[2021-03-25]. <https://arxiv.org/abs/physics/0605241>.
- [5] Shao Y, Wang D J, Zhang D, et al. Research progress of single photon laser ranging technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011020.
邵禹, 王德江, 张迪, 等. 单光子激光测距技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011020.
- [6] Heinrichs R, Aull B F, Marino R M, et al. Three-dimensional laser radar with APD arrays [J]. Proceedings of the SPIE, 2001, 4377: 106-117.
- [7] Itzler M A, Jiang X D, Entwistle M, et al. Advances in InGaAsP-based avalanche diode single photon detectors[J]. Journal of Modern Optics, 2011, 58(3/4): 174-200.
- [8] Orin A E, Michelsen E L, Murphy T W, et al. Apache point observatory lunar laser-ranging operation (APOLLO) [J]. American Astronomical Society Meeting 205, 2004(36): 1432.
- [9] Leonard M E. Normal point generation and first photon bias correction in APOLLO lunar laser ranging[D]. Los Angeles: University of California, 2010.
- [10] Murphy T W, Jr, Adelberger E G, Strasburg J D, et al. APOLLO: multiplex lunar laser ranging [EB/OL]. [2021-03-25]. <http://physics.ucsd.edu/tmurphy/Apollo/doc/multiplex.pdf>.
- [11] Li Y Q, Fu H L, Li R W, et al. Research and experiment of lunar laser ranging in Yunnan observatories[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0104004.
李语强, 伏红林, 李荣旺, 等. 云南天文台月球激光测距研究与实验 [J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0104004.
- [12] Liu H B, Li M, Shu R, et al. Estimation and verification of high-accuracy laser ranging on several photons[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(1): 0106001.
刘鸿彬, 李铭, 舒嵘, 等. 少光子灵敏度精密激光测距方法及验证 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 0106001.
- [13] Bronzi D, Villa F, Bellisai S, et al. Large-area CMOS SPADs with very low dark counting rate[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8631: 86311B.
- [14] Zhang H T, Tang R F, Li Z L, et al. Preprocessing method of laser ranging data based on array detection technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(8): 20190561.
张海涛, 汤儒峰, 李祝莲, 等. 基于阵列探测技术的激光测距数据预处理方法 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(8): 20190561.
- [15] Hu S J, He Y, Yu J Y, et al. Method for solving echo time of pulse laser ranging based on deep learning [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1010001.
胡善江, 贺岩, 俞家勇, 等. 基于深度学习的脉冲激光测距回波时刻解算方法 [J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1010001.
- [16] Li X, Li M, Li X Y, Wang L L. Multi-Photon time-of-arrival resolution enhancement by deconvolution in laser ranging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0702007.
薛莉, 李明, 李希宇, 等. 激光测距多光子分立时刻的反卷积解算方法 [J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0702007.
- [17] Ye L, Gu G H, He W J, et al. A real-time restraint method for range walk error in 3-D imaging lidar via dual detection [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 1-9.
- [18] Gatt P, Johnson S, Nichols T. Geiger-mode avalanche photodiode lidar receiver performance characteristics and detection statistics [J]. Applied Optics, 2009, 48(17): 3261-3276.
- [19] Xu L, Zhang Y, Zhang Y, et al. Restraint of range walk error in a Geiger-mode avalanche photodiode lidar to acquire high-precision depth and intensity information [J]. Applied Optics, 2016, 55(7): 1683-1687.
- [20] Wang Z Z, Wang L, Tan M, et al. Research on CNN denoising algorithm based on an improved mathematical model for the measurement of far-field focal spot [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(12): 1212001.
王拯洲, 王力, 谭萌, 等. 基于远场焦斑测量数学模型改进的 CNN 去噪方法研究 [J]. 光子学报, 2020, 49(12): 1212001.
- [21] Li X, Zhai D S, Li Z L, et al. Signal-to-noise ratio analysis on APD arrays in laser ranging [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(3): 0306001.
薛莉, 翟东升, 李祝莲, 等. 激光测距中 APD 阵列探测信噪比分析 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(3): 0306001.
- [22] Clancy C, Hecker J, Stuntebeck E, et al.

- Applications of machine learning to cognitive radio networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2007, 14(4): 47-52.
- [23] Xie G C, Ye Y D, Li J M, et al. Echo characteristics and range error for pulse laser ranging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0610001.
谢庚承, 叶一东, 李建民, 等. 脉冲激光测距回波特性及测距误差研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0610001.
- [24] Ma J P, Shang J H, Sun J T, et al. Laser ranging system based on high-speed pulse modulation and echo sampling [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0810004.
马建平, 尚建华, 孙嘉瞳, 等. 基于高速脉冲调制和回波采样的激光测距系统 [J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0810004.

Signal Processing of Spatial Convolutional Neural Network for Laser Ranging

Bai Yibo*, Pan Kangli, Geng Lin

North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China

Abstract

Objective The laser distance measurement system is widely used in various fields such as long-distance measurement, atmospheric concentration monitoring, three-dimensional laser imaging, and star-to-ground laser ranging, due to its small volume, high accuracy, and fast response speed. The echo time of the time-of-flight method is the focus of this technology. The situation of “strong background noise and weak signal light intensity” is that the laser ranging technology needs to face. On one hand, the background noise is too strong relative to the signal light and the signal-to-noise ratio is low, which makes signal processing difficult. On the other hand, the avalanche photon diode (APD) unit with Geiger mode is prone to channel saturation or channel blockage under strong background noise. This paper derives and discusses in detail the spatial three-dimensional convolutional neural network signal processing model, which combines the photon counting method with the convolutional neural network method. The simulation verifies that this algorithm can effectively identify the weak signal light from the strong background light.

Methods A theoretical model is established via theoretical derivation and subsequently it is verified via simulation. Firstly, different from the previous laser ranging signal processing that only considers the probability distribution of the signal response in time domain and presents the Poisson distribution, this article adds a discussion of the probability distribution in spatial domain on this basis. We believe that the signal light and background light received by the receiving lens barrel used for laser ranging have spatial distribution differences. Therefore, in the simulation, the signal light is set as the far-field spot that obeys the two-dimensional Gaussian-like distribution, and the background noise is set to be evenly distributed in spatial domain. Then, this article simulates the insertion of short signal light into long background noise, and obtains the original signal used in this algorithm with the Geiger mode 4×4 APD detection. Second, this algorithm is designed to process the spatial three-dimensional convolutional neural network signal that combines the photon number counting method in the one-dimensional time domain with the convolutional neural network in the two-dimensional spatial domain. Finally, by comparing multiple sets of simulated signals and drawing conclusions through the recognition of simulated signals, it is verified that the proposed algorithm has an improved effect on the recognition of signal light.

Results and Discussions The simulation results show that it is theoretically feasible to process the Geiger pattern array APD signal through the spatial convolution method, and the signal recognition can be nearly doubled. In the article, Figs. 10 and 11 respectively show the fitted signal obtained by simple operation and that after using 2D convolution treatment. The comparison shows that this algorithm can hide the noise in the noise. The array fitting signal is effectively strengthened to highlight the spikes and effectively improve the signal recognition. Figure 12 shows the signal diagrams fitted by using four 3×3 feature convolution kernels. Obviously, after the same 4×4 array signal is processed with different N -dimensional convolution kernels, the signal recognition is somewhat different. But the peak point is close. Figure 13 and 14 respectively show the fitted signal diagrams and signal recognition degree curves after using different $N \times N$ feature convolution kernels. The results show that as the dimensionality of the convolution kernel increases, the signal recognition first increases significantly. The big follow-

up tends to be flat. Obviously, when the dimensionality of the detection signal and that of the signal processing convolution kernel matches, the signal recognition can reach the best. After using the Geiger pattern array detection device, the introduction of spatial domain signal processing method is beneficial to signal processing.

Conclusions In this paper, a three-level signal recognition optimization algorithm based on photon counting and convolutional neural network is designed by combining the existing single-photon detector array with its auxiliary circuit used in laser ranging and based on the idea of multi-level improvement of signal recognition. This algorithm not only inherits some of the calculation methods of the traditional time-of-flight algorithm, but also combines the spatial statistical distribution characteristics of the photons scattered on the plane of the two-dimensional detection array, and comprehensively considers the traditional one-dimensional signal processing method and the two-dimensional convolutional neural network. The new idea constitutes a spatial three-dimensional convolutional neural network program for processing laser ranging signals. After simulation verification, the program is feasible in theory as well as engineering.

Key words measurement; Geiger model; pulsed laser ranging; array detection; photon counting; convolutional neural network; signal processing

OCIS codes 120.1880; 280.1355; 280.3400; 250.1345