

## 基于首光子时间的被动单光子点目标检测

李昌恒<sup>1,2</sup>, 刘璠<sup>1,2\*</sup>, 王小庆<sup>1,2</sup>, 朱露洁<sup>1,2</sup>, 刘雪峰<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对暗弱点目标检测需求,提出一种基于首光子时间的点目标检测方法。在压缩感知单光子成像系统中,通过测量调制信号的首光子到达时间并采用阈值法获得估计目标是否存在的检测结果,利用压缩感知算法实现对点目标的快速高灵敏度检测。针对运动点目标的连续检测提出一种相邻帧差分算法,在有效去除成像结果中噪声点的同时,完美保留了待检测的点目标信息。相较于传统的压缩感知单光子成像需要进行大量光子才能实现目标重建,所提出的方法在每次调制时间内仅需要测量一个光子,并且在2.2%的采样率下就可以完成对暗弱点目标图像的获取,显著提高了点目标检测的灵敏度,加快了检测速度。仿真和实验结果表明,所提方法能够以极高的准确度实现对多个点目标的同时检测。

**关键词** 成像系统; 单光子成像; 压缩感知; 点目标检测; 首光子时间

**中图分类号** O439

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS240490

## 1 引言

动态点目标检测在机器视觉、遥感等领域具有重要的应用价值。近年来,低可视运动点目标的高灵敏度检测需求日益增长,如对空间碎片、空中高机动目标、低小慢目标的探测,以及对生物样品的无荧光标记活体检测等。然而,传统的目标检测方法往往受限于光照条件和目标尺度等因素,在处理暗弱点目标时性能下降,在目标亮度不足、尺寸较小的情况下点目标检测仍然存在困难。因此,研究一种能够实现暗弱环境下点目标精确检测的方法具有重要的理论和实际意义。对于暗弱目标信息的获取,高灵敏度的探测方式是必不可少的手段。其中,单光子探测技术作为一种量子测量方式,能够在极低光强下实现对单个光子的精确探测<sup>[1]</sup>。与传统的光强探测相比,单光子探测在暗弱目标的信息获取能力上具有显著优势,因此在暗弱点目标检测领域具有巨大的发展潜力和应用价值。

目前,已经有一些较为成熟的单光子探测器,如单光子雪崩二极管、光电倍增管等<sup>[2-3]</sup>,可以实现对单个光子的探测,但是这些类型的探测器普遍存在阵列探测器难以获取或阵列规模不足的问题,往往需要依靠没有空间分辨能力的点探测器进行单光子探测。因此,传统单光子成像一般需要对目标进行空间扫描来

获取图像。为了降低扫描采样次数从而提高成像速度,基于压缩感知的单光子成像技术逐渐成为研究热点<sup>[4-5]</sup>。压缩感知成像利用空间光调制器对目标图像进行特定调制,使用点探测器收集调制后的信号,再通过压缩感知算法重建目标图像。压缩感知算法能够利用图像自身的稀疏性,在亚采样条件下实现信号的完美重建<sup>[6-7]</sup>。因此,压缩感知单光子成像不仅能够解决单光子阵列探测器分辨率不足的问题,而且能够减少采样次数,提高单光子成像速度。

单光子探测器一般将累计光子数作为近似光强信号<sup>[8]</sup>,但对于暗弱点目标来说,它本身能够反射或自发的光很弱,因而通过测量累计光子数的方式在一定时间内只能探测到很少的光子,能获取的信息量严重不足。光子的散粒噪声是单光子探测中的主要噪声来源,这是因为光子水平光场具有量子统计特性,在任意时刻光子的存在具有随机性,一定时间内的光子数服从泊松分布<sup>[9]</sup>,因此光子数较少时探测信噪比降低。如果要积累足够多的光子,则需要明显延长采样时间,这对目标实时成像产生很大的阻碍<sup>[10]</sup>。因此,检测暗弱小目标仍然是压缩感知单光子成像领域的研究难点。

为解决依靠累计光子数获取有效信息的时效性问题,光子的多维信息利用是一个有效途径。其中,光子时间测量作为获取光学信息的一种方式,在近些年受

收稿日期: 2024-01-12; 修回日期: 2024-02-05; 录用日期: 2024-02-19; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF0719800)

通信作者: \*liufan@nssc.ac.cn; \*\*liuxuefeng@nssc.ac.cn

到广泛关注和研究,它能够在光子探测的基础上,利用光子的飞行时间来获得目标的更多信息<sup>[11-12]</sup>。2014年,麻省理工学院的 Shapiro 团队提出了首光子成像技术<sup>[13-14]</sup>,利用首光子时间测量、目标稀疏性等信息改进单光子成像方法,能够大幅提高单光子激光雷达的灵敏度,达到每像素仅测量 1 个光子的水平。随后,中国科学技术大学的黎正平等<sup>[15-16]</sup>对首光子激光雷达进行深入研究,先后实现了 45 km、200 km 的激光雷达。上海交通大学的 Liu 等<sup>[17-18]</sup>提出了快速首光子成像方法,并对图像重建算法进行改进以提升首光子成像性能。上述研究都是在激光雷达等主动光学系统中实现的,不适用于被动单光子成像。因此,在被动探测方式下利用光子时间信息实现暗弱点目标检测是十分有意义的。

本文提出一种基于首光子时间的被动单光子点目标检测方法,通过在暗弱环境光线下获取和处理点目标首光子到达时间信息,结合压缩感知算法实现对点目标的精确检测。使用空间光调制器对目标进行调制并利用单光子探测器进行测量,每次调制最多仅探测 1 个光子,通过提取和处理首光子时间并结合压缩感知算法,能够利用极少的采样数和光子数实现点目标的快速高精度成像与定位。本文还提出一种针对运动点目标检测的相邻帧差分算法来去除噪声、提高探测准确度,并能够实现运动点目标的连续检测。通过仿真分析和实验验证,证明了在被动探测条件下利用首光子时间完成暗弱点目标检测的可行性。除此之外,验证了所提方法同样适用于多个运动点目标,具有同时检测多个运动点目标的能力。

## 2 基于光子时间的点目标检测基本原理

### 2.1 首光子时间特征分析

在弱光条件下,光子探测主要受散粒噪声的影响<sup>[19]</sup>,光子数探测结果服从泊松分布<sup>[20]</sup>。假设单位时间内的平均光子数为  $W$ ,则该时间内单光子探测器能测量到  $k$  个光子的概率为

$$P\{k\} = \frac{(\eta W)^k e^{-\eta W}}{k!}, \quad (1)$$

式中: $\eta$ 表示探测器的量子效率。考虑到极短单位时间的情况,此时 $\eta W \ll 1$ ,则该段时间内探测不到光子和探测到光子的概率分别为

$$P_0\{k=0\} = e^{-\eta W}, \quad (2)$$

$$P_1\{k \geq 1\} = 1 - e^{-\eta W}. \quad (3)$$

因为每个光子的测量过程都是独立同分布的,所以根据上述公式,可以计算出从开始探测到第  $t$  个单位时间段内接收到首光子信号的概率:

$$P_1\{T=t\} = (e^{-\eta W})^{t-1} (1 - e^{-\eta W}). \quad (4)$$

式(4)中,取单位时间长度为 1 ns,将  $\eta W$  代入 4 个不同的数值进行建模分析,得到的结果如图 1 所示。可以看到, $\eta W$  越大,首光子到达时间较小的概率越大,而到达时间较大的概率则相应降低。当首光子时间  $t$  较小(如  $t < 100$  ns)时,4 个取值中  $\eta W = 8 \times 10^{-3}$  的可能性最大;当首光子时间  $t$  较大(如  $t > 400$  ns)时, $\eta W = 2 \times 10^{-3}$  的可能性最大。因此,从统计学意义来看,当  $\eta$  为定值时,首光子时间  $t$  越大,光强  $W$  越小的可能性就越高。

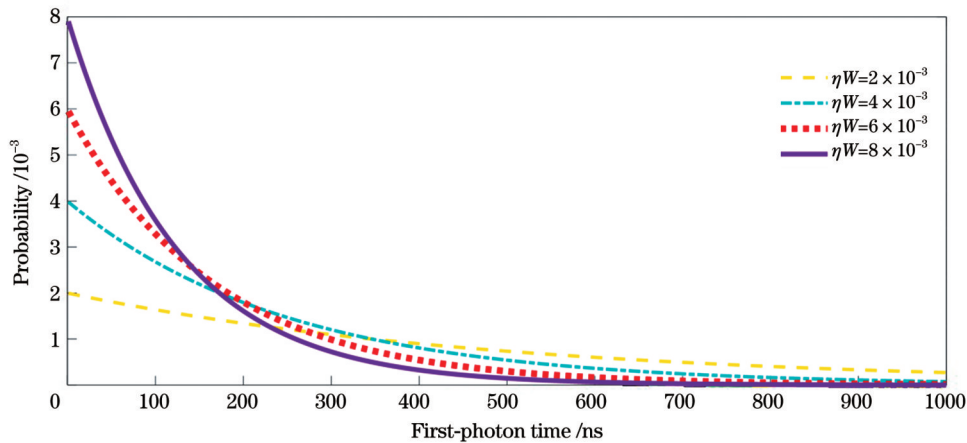


图 1 不同光强下首光子时间的概率

Fig. 1 Probability of the first-photon time at different light intensities

### 2.2 基于首光子时间的压缩感知点目标检测方法

基于压缩感知单光子成像方法进行点目标检测,其成像原理如图 2 所示,透镜 1 将单光子水平的点目标成像在数字微镜器件(DMD)上<sup>[21]</sup>,DMD 通过显示 0、1 二值随机矩阵对图像进行空间调制,调制后的光信

号通过透镜 2 收集,并利用单光子探测器对光子信号进行测量。由于目标为暗弱的点目标,为了在少光子的条件下提高信息获取效率,在每次 DMD 调制状态下仅测量 1 个光子,并将调制开始时间作为起始时间,利用时间相关单光子计数设备(TCSPC)测量探测器

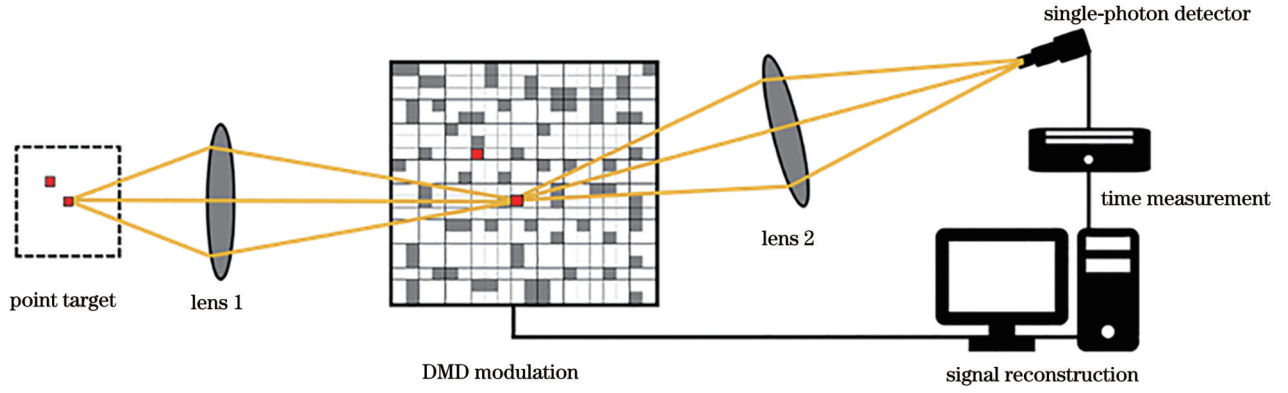


图 2 基于首光子时间的点目标检测方法

Fig. 2 Point target detection method based on the first-photon time

接收到第一个光子的时间,作为本次调制测量得到的首光子时间。对目标进行  $n$  次二值随机矩阵调制,并分别测量首光子时间,就可以得到  $n$  组调制矩阵序列  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  以及对应的首光子时间序列  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ 。

对于传统基于光子计数的压缩感知单光子成像系统,每次调制后测量到的单个光子是完全等价的,因此无法为光信号强度的获取提供有效信息。而根据 2.1 节的分析,首光子时间与光子数水平间存在统计相关性,因此通过光子时间信息的获取能够获得额外信息,实现目标图像重建。具体来说,为了对光强进行有效估计,使用阈值法对首光子时间信号进行筛选。从概率角度看,光强越大则首光子时间越短,对于点目标,每次调制的调制矩阵只有两种可能,即调制矩阵调制后的图像包含点目标或者调制后的图像不包含点目标,对应的单光子探测结果为:前者的光信号较强,后者的光信号较弱。基于此,设置时间阈值为  $t_{\text{test}}$ ,将首光子时间小于  $t_{\text{test}}$  的信号视为有用信号,即该次调制收集的光强较大,调制后的图像包含点目标;将大于  $t_{\text{test}}$  的信号视为噪声信号,即调制后的图像不包含点目标。这样一方面可以削弱散粒噪声带来的影响,另一方面也可以把首光子时间信号转换为可用于重建目标的信号。利用阈值筛选的方法最终将首光子时间序列  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  转化成是否检测到点目标的估计值  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ :

$$y_i = \begin{cases} 1, & t_i \leq t_{\text{test}}, \\ 0, & t_i > t_{\text{test}} \end{cases}, 1 \leq i \leq n. \quad (5)$$

得到  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$  之后,由于检测的是点目标,可以直接将其视为强度值的估计,再结合调制矩阵序列  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ ,就可以通过重建算法获得目标图像。

由阈值法估计结果组成的列向量  $\mathbf{y}$ 、随机调制矩阵  $\mathbf{A}$  与目标图像  $\mathbf{x}$  之间存在近似的线性关系,可表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{e}, \quad (6)$$

式中  $\mathbf{e}$  为测量噪声。对于点目标,其本身就有强稀疏性,因此有望利用极低的采样率实现目标探测。对于式(6)的欠定方程,压缩感知通过求解凸优化问题重建原始信号,即

$$\min_x \frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x}\|_2^2 + \tau \|\mathbf{x}\|_1, \quad (7)$$

式中  $\tau$  为可调参数。式(7)可用全变分(TVAL3)<sup>[22]</sup>、基追踪去噪(BPDN)<sup>[23]</sup>、正交匹配追踪(OMP)<sup>[24]</sup>等算法进行优化求解。通过压缩感知算法重建,就可以得到包含点目标的图像,并通过检测重建图像中的亮点得到点目标的位置信息。

### 2.3 相邻帧差分去噪算法

由于光子时间信息具有统计随机性,因此利用上述阈值方法获得的测量值有一定概率出现错误,并且在较低采样率下压缩感知算法本身也存在误差,其最终重建结果可能会出现噪声,导致点目标位置判断错误。在实际应用中,往往需要对多帧视频中的运动点目标进行检测,对此,设计了一种针对运动点目标的相邻帧差分算法,以此来去除重建目标时的噪声,也用来检测多帧视频中的点目标。在目标检测过程中,相邻帧的点目标图像具有连续性,而噪声点出现的位置具有随机性,也就是说,每一帧图像的噪声所在像素点的相邻帧图像在强度值上相差较大,而点目标所在像素点的强度值相差不大。这一规律仅局限于相邻帧位置不变的静态目标,对于动态目标,目标运动在图像相邻帧中一般表现为在相邻像素点的位置移动,所以运动点目标在前一帧和后一帧图像的相邻像素点间强度变化不大。基于上述动态点目标相邻帧表现的分析,设计了一种基于相邻像素检测的相邻帧差分算法来对点目标检测结果进行进一步优化。

首先,将所有的检测结果分别进行归一化,使图像的最大值为1,以便于进行后续计算。假设第  $k$  帧图像  $(x_i, y_j)$  像素位置的强度值为  $O_k(x_i, y_j)$ ,将该相邻点的强度值相加得到  $O_k^{\text{sum}}(x_i, y_j)$ :



$$O_k^{\text{sum}}(x_i, y_j) = \sum_{p=i-1}^{i+1} \sum_{q=j-1}^{j+1} O_k(x_p, y_q). \quad (8)$$

然后,用相同的方式计算相邻帧对应的值  $O_{k-1}^{\text{sum}}(x_i, y_j)$  和  $O_{k+1}^{\text{sum}}(x_i, y_j)$ ,并计算它们与  $O_k^{\text{sum}}(x_i, y_j)$  差值的绝对值,得到判断该点为目标点或噪声点的输出结果  $O_k^{\text{out}}$ ,即

$$O_k^{\text{out}} = \begin{cases} 0, & \Delta O_{k-1} \geq O_{\text{thres}} \text{ and } \Delta O_{k+1} \geq O_{\text{thres}}, \\ O_k(x_i, y_j), & \Delta O_{k-1} < O_{\text{thres}} \text{ or } \Delta O_{k+1} < O_{\text{thres}}, \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\Delta O_{k-1} = \text{abs}(O_k^{\text{sum}} - O_{k-1}^{\text{sum}})$ ;  $\Delta O_{k+1} = \text{abs}(O_k^{\text{sum}} - O_{k+1}^{\text{sum}})$ ;  $\text{abs}(\cdot)$  为对括号内的元素取绝对值;  $O_{\text{thres}}$  为衡量相邻帧图像强度差异大小的阈值。最后,遍历所有帧图像的像素点,就可以滤除动态点目标结果中的噪声,同时检测并保留动态点目标。其差分算法原理如图 3 所示,通过这种差分算法的处理,可以巧妙地去掉没有连续性的噪声,同时又考虑了运动点目标在相邻帧图像的差异,完美地保留了点目标信息。

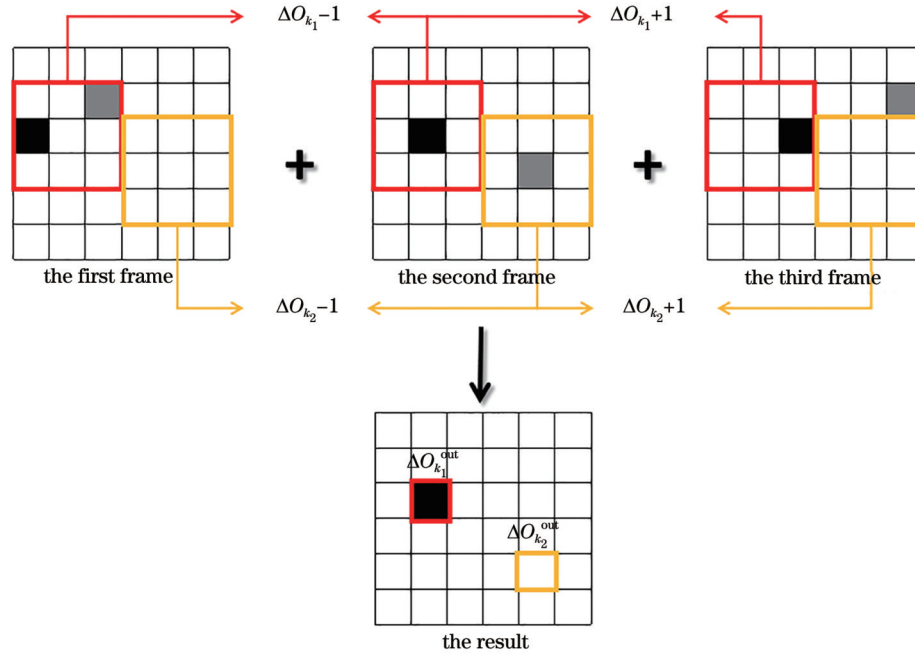


图 3 相邻帧差分算法原理图

Fig. 3 Schematic of difference algorithm between the front and back frames

### 3 仿真与实验验证

#### 3.1 点目标检测仿真验证

为了证明上述点目标检测方法的可行性,通过仿真对点目标检测过程进行验证,并分析了不同参数对检测效果的影响。首先,对静态单帧点目标检测进行仿真。在上述方法中,检测结果的影响因素主要有首光子时间筛选阈值、调制矩阵稀疏度和调制次数,首光子时间筛选阈值即上文所述的  $t_{\text{test}}$  取值,调制矩阵稀疏度是随机调制矩阵中非零值元素的占比。为了分析上述参数的影响,将  $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$  图像中的单像素目标作为待测对象,并添加光子散粒噪声与 1% 的背景噪声来模拟真实探测条件。利用 TVAL3 算法进行图像重建后,将重建结果中强度值最大点的坐标作为点目标检测结果。由于散粒噪声与背景噪声具有随机性,对每种参数条件进行多次仿真,并计算检测结果的准确率  $A_{\text{cc}}$  来表征点目标检测性能。

$$A_{\text{cc}} = \frac{N_{\text{true}}}{N_{\text{true}} + N_{\text{false}}}, \quad (10)$$

式中:  $N_{\text{true}}$  为检测结果中正确检测到点目标位置的次数;  $N_{\text{false}}$  为错误检测的次数。

针对不同参数分别进行 1000 次重复仿真并分析参数对检测准确率的影响。首先,在调制矩阵稀疏度为 50% 和调制次数为 50 次的条件下,对不同时间阈值设置进行讨论。由于每次仿真的首光子时间范围具有一定的随机性,将每组测量的首光子时间序列进行从小到大排序,将序列中一定百分比位置的时间值设置为阈值  $t_{\text{test}}$ ,从而控制首光子时间序列  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  转化为 0、1 值的占比。仿真中使用时间阈值百分比的设置来代替时间阈值绝对数值,其与检测准确率的关系如图 4(a) 和表 1 所示。可以看到,随着时间阈值百分比的升高,检测准确率逐渐增加。当时间阈值百分比大于 40% 时,准确率可达到 90% 以上;当时间阈值百分比过大时,检测准确率随着时间阈值百分比的增加而降低。然后,将时间阈值百分比设置为 50%,并分析调制矩阵稀疏度对检测准确率的影响,结果如图 4(b) 和表 2 所示。可以看到,当调制矩阵的稀疏度过大或者过小时,检测准确率均会降低。

实际上,调制矩阵稀疏度与时间阈值百分比相关,这是因为调制矩阵稀疏度决定了多次调制中目标出现的概率,而时间阈值百分比的设置正是将首光子时间转换为 0、1 测量值的比例,因而二者比例相匹配时才能达到最优的图像重建与目标检测性能。最后,在时间

阈值百分比为 50% 和调制矩阵稀疏度为 50% 的条件下,对调制次数的影响进行分析,结果如图 4(c) 和表 3 所示。随着调制次数增加,检测结果的准确率逐渐增大。值得注意的是,本文方法仅需要 50 次调制,即采样率为 1.22% 时,检测准确率就能达到 99% 以上。

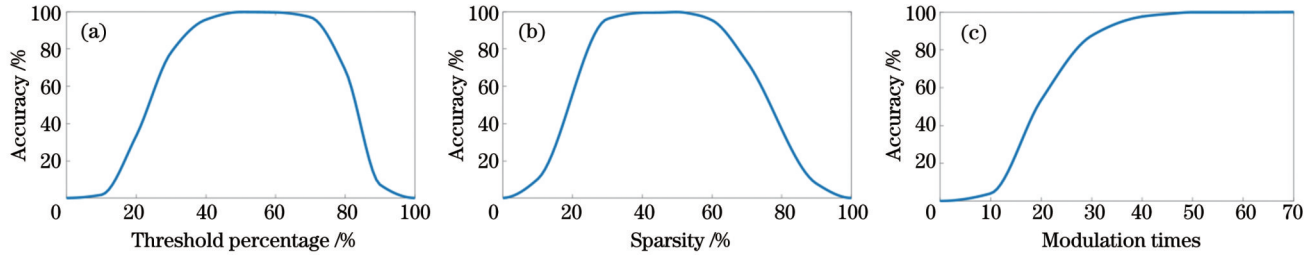


图 4 不同参数对点目标检测准确率的影响。(a)时间阈值百分比;(b)调制矩阵稀疏度;(c)调制次数

Fig. 4 Effects of different parameters on detection accuracy. (a) Time threshold percentage; (b) sparsity of modulation matrix; (c) modulation times

表 1 阈值百分比对检测准确率的影响

Table 1 Effect of threshold percentage on detection accuracy

Threshold percentage / %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Accuracy / %	0	1.7	33.4	78.2	95.8	99.9	99.7	97.1	68.7	7.1	0

表 2 稀疏度对检测准确率的影响

Table 2 Effect of sparsity on detection accuracy

Sparsity / %	0	10	30	40	45	50	55	60	70	90	100
Accuracy / %	0	10.2	96.2	95.8	99.5	99.9	98.6	95.5	73.3	7.7	0

表 3 调制次数对检测准确率的影响

Table 3 Effect of modulation times on detection accuracy

Modulation times	0	10	20	30	40	45	50	55	60	70
Accuracy / %	0	4.0	53.4	87.5	97.6	99.0	99.9	99.9	99.9	100.0

在完成上述静态点目标检测的基础上,利用多帧探测结果对多个运动点目标的检测结果进行仿真验证。在时间阈值百分比为 50%、调制矩阵稀疏度为 50% 的情况下对两个运动点目标进行仿真,并抽取其中连续的 3 帧图像进行分析。这 3 帧图像中点目标从 (12, 11) 和 (31, 31) 位置先运动到 (12, 12) 和 (32, 32) 位置,再运动到 (12, 13) 和 (33, 33) 位置。图 5(a) 为 100 次调制时的检测结果,图 5(b) 为对应的三维强度图。可以看到,在点目标数量变多的情况下检测结果变差,出现了一些噪点。在多目标检测中调制矩阵与目标位置的对应关系更加复杂,仅通过设置时间阈值便对探测结果进行二值化会丢失部分信息,导致目标重建质量降低,但是在每一帧重建图像中仍然可以准确识别出多个点目标的位置信息。为了进一步降低重建结果中的噪声,利用第 2 节提出的相邻帧差分算法对第 2 帧图像进行处理,阈值设置为  $O_{\text{thres}} = 0.2$ , 结果如图 5(a)、(b) 最后一行所示。可以看到,本文方法在准确保留点目标的前提下有效去除了噪点,提高了检测

质量。将调制次数增大至 200 次进行仿真,检测结果如图 5(c)、(d) 所示。可以看到,增加调制次数后每一帧检测图像的噪点数量明显减少,点目标能够被准确地检测到,而利用相邻帧差分算法同样可以进一步降低重建噪声。这说明所提出的结合相邻帧去噪算法的检测方法不仅适用于静态点目标的检测,还能实现对多个运动点目标的高质量检测。

### 3.2 点目标检测实验系统搭建与验证

搭建了基于压缩感知单光子成像的点目标检测光学系统来验证本文方法在真实实验情况下的性能。实验选择卤素灯和衰减片组合来实现低光子水平照明,使用空间光调制器 (DMD; Texas Instruments, DLP7000) 进行调制,空间分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ ,最高翻转频率为 20 kHz。调制后的光子信号由单光子探测器 (SPAD; Excelitas Technologies, SPCM-AQRH-13-FC) 收集,光谱响应范围为  $400 \sim 1064 \text{ nm}$ ,峰值量子效率为 70%,暗计数率为  $250 \text{ s}^{-1}$ 。对于首光子时间的测量,实验使用时间相关单光子计

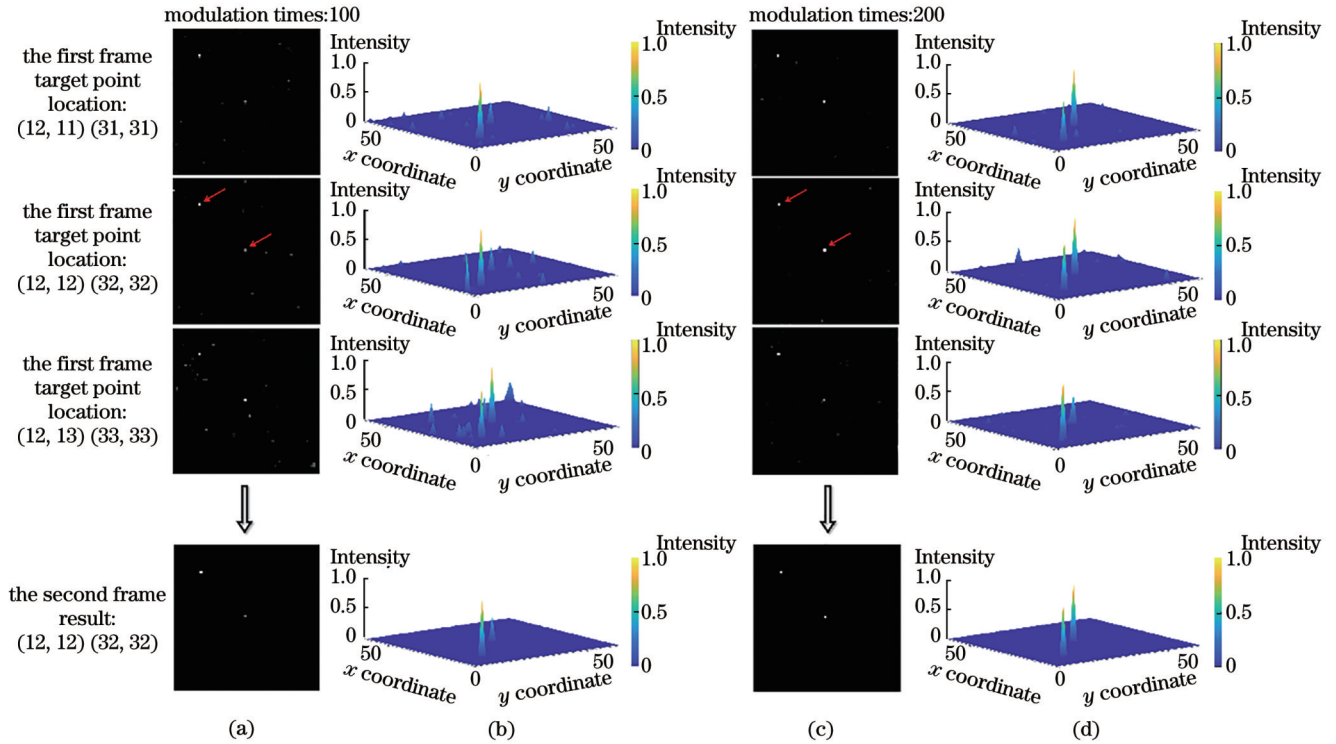


图5 动态多点目标仿真结果。100次调制时(a)动态多点目标重建与相邻帧图像的去噪结果及(b)对应的动态多点目标三维强度图;200次调制时(c)动态多点目标重建与相邻帧去噪结果及(d)对应的动态多点目标三维强度图

Fig. 5 Simulation results of dynamic multi-point target detection. (a) Reconstructed and denoising results and (b) corresponding 3D intensity map of dynamic multi-point target detection under 100 modulations; (c) reconstructed and denoising results and (d) corresponding 3D intensity map of dynamic multi-point target detection under 200 modulations

数系统 (TCSPC; SIMINICS, FT1040) 测量每次 DMD 翻转后到达 SPAD 的首光子时间,它具有最高 16 ps 的时间分辨率,能够实现对首光子时间的高精度测量,搭建的实验系统如图 6 所示。

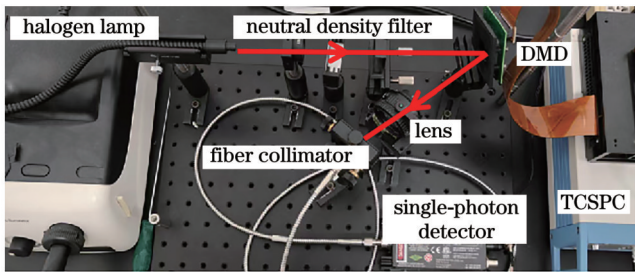


图6 点目标检测实验系统

Fig. 6 Experimental system for point target detection

实验中采用数字物体的方式,将点目标和调制矩阵的点乘结果显示在 DMD 的  $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$  区域,这样有利于获得准确的原始点目标位置,并和检测结果进行对比,以验证实验检测性能。在参数上,设置时间阈值百分比为 50%、调制矩阵稀疏度为 50%。

首先,对单个静态点目标进行单帧检测,点目标的像素位置为 (32, 32),分别对目标进行 50~110 次调制,检测结果如图 7(a)所示。从图 7(a1)~(a4)可以看出,当调制次数在 80 次及以下时,虽然能够准确重建

点目标,但是重建图像存在强度值过大的噪点,导致检测结果错误,这主要是由实验中的背景噪声较大,探测信噪比低于仿真水平导致的。在图 7(a5)~(a7)所示的增大调制次数的检测结果中,噪点几乎完全消失。当采样次数增加至 90 次时,在 2.2% 的采样率下就可以较完美地检测到点目标。然后,对运动的单点目标进行检测实验,点目标从 (32, 32) 位置垂直移动到 (32, 36) 位置,再斜向下运动至 (35, 39) 位置,最后水平移动至 (37, 39) 位置。本次实验共检测 10 帧图像,对每帧图像调制 100 次,设置时间阈值百分比为 50%、调制矩阵稀疏度为 50%,并利用相邻帧差分算法进行去噪,结果如图 7(b)所示。其中,图 7(b)上半部分为点目标检测原始结果,下半部分为相邻帧差分算法处理后的结果。从检测结果可以得到,所提出的检测方法在 100 次采样中清晰地检测到点目标,并且检测结果中的噪点也可以通过相邻帧差分算法完美地去除。利用以上检测结果得到点目标的运动轨迹,如图 7(b)最右图所示。可以看到,检测得到的点目标运动轨迹和预设的目标真实运动轨迹完全一致。

继续对多个运动点目标进行实验,两个点目标的运动轨迹如图 8(c)所示。参考仿真中多个点目标的检测参数,将调制次数设置为 200 次,设置时间阈值百分比为 50%、调制矩阵稀疏度为 50%,实验获得的检



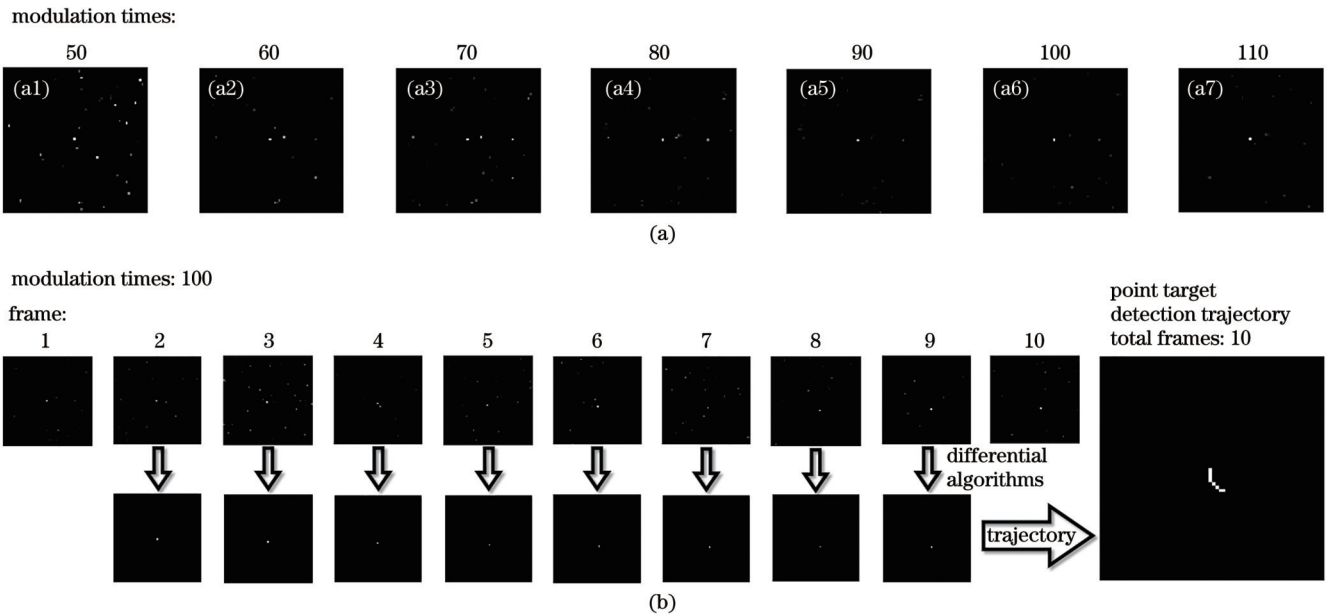


图 7 单点目标检测实验结果。(a)静态点目标检测结果;(b)动态点目标检测结果

Fig. 7 Experimental results for point target detection. (a) Static point target detection results; (b) dynamic point target detection results

测结果如图 8 所示,其中展示了 10 帧图像的重建和去噪结果,并显示了由 25 帧图像检测获得的多目标运动轨迹。其中图 8(a1)~(a10)为点目标检测的原始重建结果,图 8(b2)~(b10)为相邻帧差分算法处理后的结

果。可以看出,大部分重建结果都实现了对多个点目标的准确检测,少数重建结果中存在的噪点比较多,但是通过相邻帧差分算法处理,都可以在保留所有点目标信息的前提下去除所有噪声。图 8(d)为实验检测

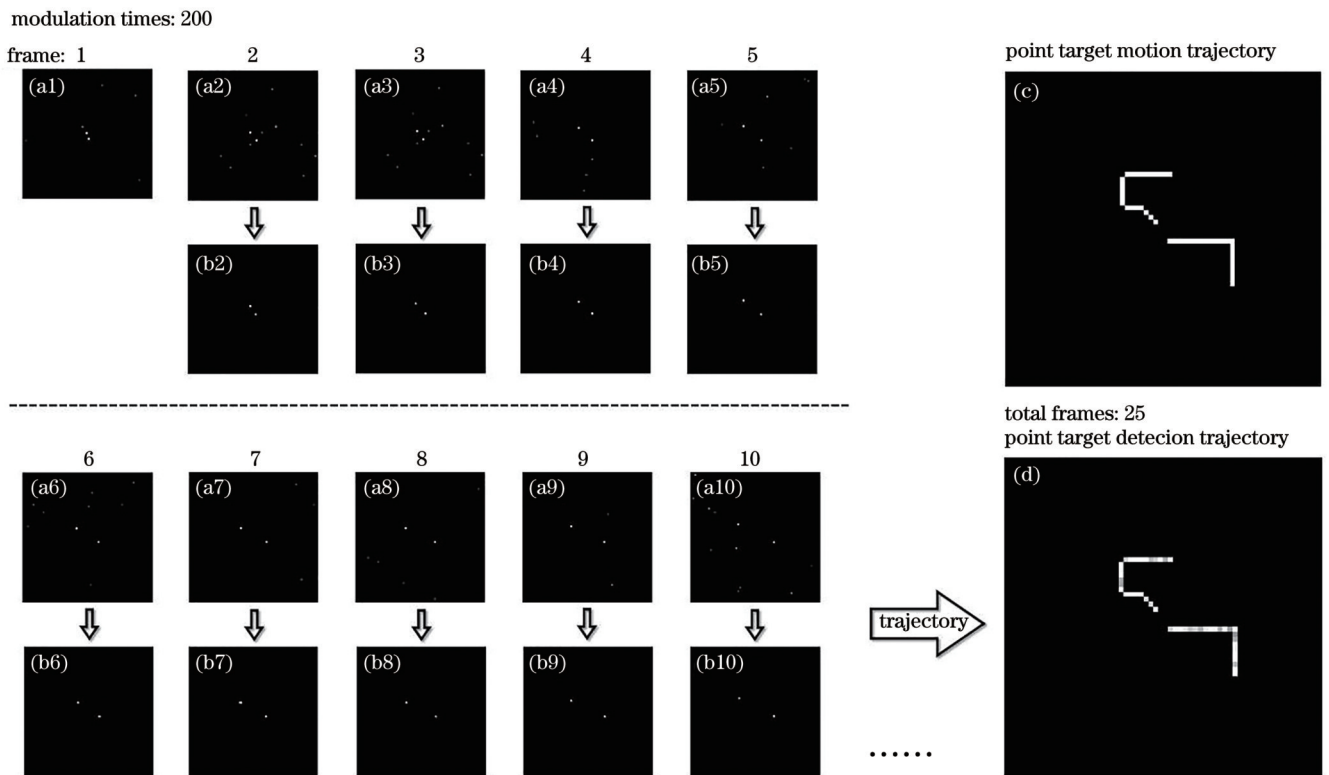


图 8 动态多点目标检测实验结果。(a)动态多点目标检测原始重建结果;(b)动态多点目标检测去噪后的结果;(c)动态多点目标的原始轨迹;(d)动态多点目标的实验检测轨迹

Fig. 8 Experimental results of dynamic multi-point target detection. (a) Reconstructed results of dynamic multi-point target detection; (b) dynamic multi-point target detection results after denoising; (c) original trajectory of dynamic multi-point target; (d) experimental detection trajectory of dynamic multi-point target

并处理得到的点目标运动轨迹,将其与图 8(c)进行对比,可以看到,实验检测得到的两个点目标运动轨迹和真实运动轨迹完全一致,进一步验证了所提出的检测方法的可行性和正确性,证明该方法不仅可以对静态或运动的单点目标进行检测,还适用于运动的多点目标检测。

## 4 结 论

提出一种基于光子时间测量的压缩感知单光子成像点目标检测方法,利用点目标图像的稀疏特性,通过压缩感知成像调制获得的首光子时间估计点目标是否存在,将单一光子时间信息转换为 0、1 测量结果,并重建获得点目标图像。该方法解决了在暗弱环境下需要长时间积累光子才能实现成像的问题,突破了在被动检测中仅使用光子计数这一单一维度信息的限制,利用首光子时间进行目标检测,每次调制最多需要测量 1 个光子,大幅提升了点目标的检测效率,实现了对暗弱点目标的高准确率检测。相较于传统的扫描式单光子成像方法,本文利用压缩感知的亚采样重建能力和点目标的高稀疏性,实现了极低采样率下的点目标检测。除此之外,针对点目标检测的结果,提出一种相邻帧差分去噪方法,该方法可以有效降低运动点目标多帧图像重建中的噪声,且适用于多个点目标的检测。多次重复仿真结果表明,该方法的正确率可达 99% 以上,实验结果则证明所提出的方法在采样率仅为 2.2% 的条件下能够实现对点目标的准确检测,结合差分去噪算法则可以在低采样率下准确获得多目标的运动轨迹。

基于压缩感知单光子成像实现高灵敏度点目标检测,能够解决高分辨率单光子阵列探测器难以获取的问题。虽然压缩感知成像需要对目标进行多次调制,但是利用首光子时间信息和点目标高稀疏性大幅降低了单次调制的信号累积时间和成像所需的调制次数。以 DMD 最高 20 kHz 调制速度和 100 次采样次数为例,所提方法检测多点目标的帧率最快可达 200 Hz,符合实时检测的要求。另外,基于现有的小面阵单光子探测器结合并行压缩感知成像方法还能够进一步提升检测速度。虽然本实验的工作波段为可见光,但利用 InGaAs 单光子探测器和超导纳米线单光子探测器可以将所提方法扩展到近红外、中红外等波段,有望在国防、天文、生物等领域产生较大的应用价值。

所提检测方法主要针对点目标信号极弱情况下的快速检测问题,目的在于大幅降低目标检测所需光子数和采样次数,但仅考虑了均匀暗背景的简单情况,且探测信噪比较高,对于复杂背景干扰下的点目标检测问题,检测速度和检测正确率可能会有所降低。因此,在低信噪比检测方法及复杂背景滤除算法等方面仍有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] Savage N. Single-photon counting[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3: 738-739.
- [2] Johnson S, Gatt P, Nichols T. Analysis of Geiger-mode APD laser radars[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5086: 359-368.
- [3] Kodet J, Prochazka I, Koidl F, et al. SPAD active quenching circuit optimized for satellite laser ranging applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7355: 73550W.
- [4] Yu W K, Liu X F, Yao X R, et al. Single-photon compressive imaging with some performance benefits over raster scanning[J]. *Physics Letters A*, 2014, 378(45): 3406-3411.
- [5] Liu X F, Yao X R, Wang C, et al. Quantum limit of photon-counting imaging based on compressed sensing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3286-3296.
- [6] Donoho D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [7] Candes E J, Tao T. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies? [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [8] 夏中秋, 宋海智, 史衍丽, 等. 星载单光子计数成像系统仿真技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(16): 1611001.
- [9] Xia Z Q, Song H Z, Shi Y L, et al. Simulation techniques of a space-borne single-photon counting imaging system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(16): 1611001.
- [10] Migdall A, Polyakov S V, Fan J, et al. Single-photon generation and detection: physics and applications[M]. Gaithersburg: Academic Press, 2013.
- [11] 李明飞, 杨然, 霍娟, 等. 基于光子计数的合作目标“量子”成像[J]. *物理学报*, 2015, 64(22): 224208.
- [12] Li M F, Yang R, Huo J, et al. “Quantum” imaging of cooperative target based on photon-counting regime[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 224208.
- [13] Massa J S, Wallace A M, Buller G S, et al. Laser depth measurement based on time-correlated single-photon counting [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(8): 543-545.
- [14] Massa J S, Buller G S, Walker A C, et al. Time-of-flight optical ranging system based on time-correlated single-photon counting[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(31): 7298-7304.
- [15] Kirmani A, Venkatraman D, Shin D, et al. First-photon imaging[J]. *Science*, 2014, 343(6166): 58-61.
- [16] Shin D, Kirmani A, Goyal V K, et al. Computational 3D and reflectivity imaging with high photon efficiency[C]//2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), October 27-30, 2014, , 2015, Paris, France. New York: IEEE Press, 2014: 46-50.
- [17] 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: 66-69.
- [18] Li Z P. Long range single-photon three-dimensional imaging[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 66-69.
- [19] Li Z P, Ye J T, Huang X, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. *Optica*, 2021, 8(3): 344-349.
- [20] Liu X L, Shi J H, Chen H C, et al. First-photon ghost imaging at low light level[C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 14-19, 2017, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2017.
- [21] Liu X L, Shi J H, Wu X Y, et al. Fast first-photon ghost imaging[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 5012.
- [22] 涂敏, 鄢秋荣, 郑勇健, 等. 基于深度学习的单光子非视域成像泊松降噪[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(20): 2011003.
- [23] Tu M, Yan Q R, Zheng Y J, et al. Poisson noise suppression for single-photon non-line-of-sight imaging based on deep learning[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(20): 2011003.



- [20] 刘夏林. 单光子探测下少光子鬼成像[D]. 上海: 上海交通大学, 2021: 14-22.  
Liu X L. Photon-limited ghost imaging under single photon detection[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2021: 14-22.
- [21] Shin S, Kim K, Yoon J, et al. Active illumination using a digital micromirror device for quantitative phase imaging[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5407-5410.
- [22] Li C B. An efficient algorithm for total variation regularization with applications to the single pixel camera and compressive sensing[D]. Houston: Rice University, 2004.
- [23] Chen S S, Donoho D L, Saunders M A. Atomic decomposition by basis pursuit[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1998, 20(1): 33-61.
- [24] Pati Y C, Rezaifar R, Krishnaprasad P S. Orthogonal matching pursuit: recursive function approximation with applications to wavelet decomposition[C]//*Proceedings of 27th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, November 1-3, 1993, Pacific Grove, CA, USA. New York: IEEE Press, 1993: 40-44.

## Passive Single-Photon Point Target Detection Based on First-Photon Time

Li Changheng<sup>1,2</sup>, Liu Fan<sup>1,2\*</sup>, Wang Xiaoqing<sup>1,2</sup>, Zhu Lujie<sup>1,2</sup>, Liu Xuefeng<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

**Objective** Dynamic point target detection is vital in fields such as computer vision, remote sensing, and the military. With the technical development, there is an increasing demand for real-time and highly sensitive target detection, in which single-photon imaging has great potential and application significance. Unfortunately, most currently available single-photon detectors have only single-pixel or limited resolution, and traditional scanning imaging with these detectors will cause time waste. Therefore, single-pixel single-photon imaging based on compressed sensing has become a research hotspot. However, traditional single-photon detection relies on photon number accumulation, which requires increased time to resist shot noise interference under the extremely low target signal, thus reducing detection speed. In recent years, first-photon imaging technology has been proposed to achieve imaging by employing only one photon per pixel based on utilizing time information of the photon, but until now this technology can only be applied to active lidar systems, limiting its application scenarios. Thus, we propose a passive compressed sensing single-photon imaging method for weak target detection, which utilizes first-photon time information to improve the sensitivity and sampling speed of point target detection. Simulation analysis and experimental verification show that this method is feasible for high-precision imaging and positioning of weak targets in passive detection conditions and suitable for the simultaneous detection of multiple moving point targets. Our study is of great significance for improving the performance of weak target detection technology.

**Methods** Firstly, we analyze the statistical relationship between the first-photon time and average photon number under the influence of shot noise in single-photon detection. The results show that as the average photon number increases, the probability of a smaller first-photon time increases (Fig. 1). Based on this, a point target detection method based on compressed sensing imaging with first-photon time measurement is proposed. This method employs a digital micromirror device (DMD) to spatially modulate a target with photon level and measures the arrival time of the first photon on the single-photon detector after each modulation (Fig. 2). By setting a threshold, the corresponding relationship between the target position and the modulation matrix is estimated using the first-photon time, leading to a binary measurement result of 0 or 1. Then, the target-related information can be extracted from the single photon detected after each modulation. By adopting the estimation results and modulation matrices, the point target image is reconstructed via a compressed sensing algorithm to achieve target position detection. Finally, a denoising algorithm based on frame difference is proposed to calculate the intensity difference between the neighbor pixels in adjacent frames and thus identify a reconstructed point as a target or noise point with a set threshold. As a result, the reconstructed noise can be removed from dynamic detection results, with information on moving point targets retained (Fig. 3).

**Results and Discussions** Different from traditional compressive single-photon imaging based on photon number accumulation, this method leverages first-photon time information in the passive detection mode. Within each modulation, only one photon is needed to be detected. By extracting helpful information from the first-photon time and combining it with the compressed sensing algorithm, we can conduct imaging on point targets quickly and accurately and locate them with a very low sampling number and extremely low photon numbers. We first verify the effectiveness of this method by

simulations. The effects of time threshold, measurement matrix sparsity, and modulation time on detection performance are studied (Fig. 4, Tables 1–3). It is proved that with optimal parameters, the point target detection probability can be higher than 99%. Then, an optical system is built for verifying the performance in real experiments. The experimental results show that for a 64 pixel $\times$ 64 pixel resolution image, point targets can be accurately detected with only a 2.2% sampling rate. In multi-frame detection results of a moving target, the frame-difference denoising algorithm can remove noise points from the reconstructed results and provide the trajectory of moving point targets (Fig. 7). Furthermore, this method is also applicable to the simultaneous detection of multiple moving point targets (Fig. 8).

**Conclusions** We propose a point target detection method based on compressive single-photon imaging with first-photon time measurement. This method breaks through the limitation of only employing single-dimensional information of photon number in passive detection by utilizing first-photon arrival time for target detection. For each modulation, at most one photon is required, which dramatically improves the utilization efficiency of photon information and achieves high-accurate point target detection in an ultra-weak environment. Additionally, compared with the traditional scanning single-photon imaging method, we adopt the compressed sensing algorithm to achieve sparse point target reconstruction and position detection at a low sampling rate. Finally, for the dynamic target detection results, we propose an adjacent frame difference algorithm that can reduce the reconstructed noise and realize high-quality detection of multiple moving point targets simultaneously. Simulations show that the probability of point target detection can be higher than 99%, and optical experiments prove that a point target can be accurately detected under a sampling rate of only 2.2%, which demonstrates the feasibility of this method in real conditions.

**Key words** imaging system; single-photon imaging; compressed sensing; point target detection; first-photon time