

基于分集接收的单光子探测技术

杨旭, 谭吉锋, 韩威, 闫瑞涛, 刘子龙, 张宇, 夏双志, 王鹏毅

(中国电子科技集团公司第54研究所, 石家庄 050000)

摘要: 单光子三维探测技术因为在微弱信号目标的光学探测方面的独特优势, 在空间目标探测、空中目标侦查、远距离预警探测等方面有重要应用, 近年来获得了广泛关注; 对主动扫描成像的单光子探测系统, 为扩展作用距离和提高扫描速度, 接收口径和接收视场角不断增大; 但对高集成的盖革 APD 型的单光子探测器, 大接收口径和大接收视场带来背景噪声光子数量的增大, 这会导致探测器频繁进入死区, 给扫描图像带来大量盲点; 针对此问题, 提出和通过仿真证明, 利用多镜头分集接收和联合单光子信息处理, 可实现对单光子探测器死区时间抑制, 进而有效提高系统探测概率, 降低扫描图像的盲点数量, 并通过试验系统进行了验证。

关键词: 单光子探测; 分集接收; 死区时间; 背景噪声; 探测概率

Single Photon Detection Based on Diversity Reception

YANG Xu, TAN Jifeng, HAN Wei, YAN Ruitao, LIU Zilong, ZHANG Yu,

XIA Shuangzhi, WANG Pengyi

(Fifty-fourth Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Due to its unique advantages in optical detection of weak signal targets, single photon three-dimensional detection technology has important application prospects in space target detection, aerial target detection, long-distance early warning detection, and has received widespread attention in recent years. For active scanning imaging single photon detection systems, to expand the operating range and improve scanning speed, the receiving aperture and receiving field of view angle continue to increase. However, for highly integrated Geiger APD single photon detectors, the large receiving aperture and field of view bring an increase in the number of background noise photons, which can cause the detector to frequently enter the dead zone and bring a large number of blind spots to the scanned image. In response to this issue, it is proposed that using multi lens diversity reception and joint single photon information processing can achieve suppression of the dead time of single photon detectors, thereby effectively improving the detection probability of the system and reducing the number of blind spots in scanned images. This has been verified through simulation and experimental systems.

Keywords: single photon detection; diversity reception; dead time; background noise; detection probability

0 引言

随着激光探测和激光成像技术的发展, 激光三维成像技术获得了越来越广泛的应用。与传统的平面成像技术相比, 激光三维成像具有分辨率高、测距精度高、隐蔽性好、抗干扰能力强等特点^[1-3], 已被广泛应用于机载地形探测、星载对地测绘、植被覆盖探测等领域^[4]。其中, 单光子三维成像技术, 采用单光子探测器取代传统线性的光电探测器, 具备理论极限为单光子量级的超高灵敏度, 可以成数量级的提高探测系统的接收灵敏度和作用距离, 在空间目标探测、空中目标侦查、远距离预警探测等领域有重要应用价值^[5], 近年来获得迅速的发展。

在单光子探测系统中, 最为常用的单光子探测器为雪崩光电二极管型和超导纳米线型两种。其中, 超导纳米线单光子探测器具备探测效率高、暗计数低的优势, 但同时

有探测器体积庞大、冷却系统要求高等缺点, 主要用于地面固定的大型单光子探测系统。雪崩光电二极管型的单光子探测器, 是工作在盖革模式下的雪崩光电二极管, 简称 Gm-APD (geiger-mode avalanche photodiodes)^[6]。Gm-APD 经过多年发展, 工作环境已经从低温转为常温, 阵列规模和面元不断增大, 探测效率不断提高。具备体积小、重量轻、成本低、时间分辨率高、适合机动平台等显著优势。但是 Gm-APD 由于雪崩过程, 在单光子探测过程中存在死区时间。死区时间通常在 10 ns 到 10 μ s 量级, 在死区时间内, 探测器阵元无法探测新的光子, 这降低了系统对目标的探测概率, 并导致扫描图像出现随机盲点^[7]。近年来, 随着单光子探测系统的接收口径和接收视场不断扩大, 镜头接收到的背景噪声不断提高, 死区时间对 Gm-APD 型单光子探测系统的影响更加突显。

为抑制死区时间对 Gm-APD 型单光子探测系统的影响,

收稿日期: 2023-11-06; 修回日期: 2023-11-11。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61975198)。

作者简介: 杨旭(1989-), 女, 博士, 高级工程师。

通讯作者: 王鹏毅(1968-), 男, 博士, 研究员。

引用格式: 杨旭, 谭吉锋, 韩威, 等. 基于分集接收的单光子探测技术[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 97-102, 129.

本文研究了基于分集接收的单光子探测系统。在该系统中,传统系统的大口径接收镜头被分割为多个小口径镜头。每个小口径接收镜头各自拥有一个 Gm-APD 探测器。通过合理光机设计,它们指向同样的空间角度。由于总口径和等效接收视场角不变,系统的接收增益不变^[8-9]。分集接收后,原本大口径镜头收到的大量背景噪声光子,被各小镜头随机分割。原本会因一个背景噪声光子触发雪崩就进入死区而产生盲点的接收系统,升级为需要 N 个小镜头同时触发雪崩进入死区才会彻底致盲。由此,系统通过分集接收抑制了探测器死区时间对系统的影响,提升了探测概率,减少了图像盲点。本文首先通过仿真证明了该方法的有效性,然后通过试验完成了实测验证。

1 单光子探测原理

单光子探测器由利用工作在盖革模式下的雪崩光电二极管和光子计数器组成^[10]。

其中,雪崩光电二极管的作用是将光信号转化为电信号,由于对其施加了反向偏置电压,当有光射入探测器时,二极管发生雪崩倍增。在盖革模式下,二极管偏置电压高于击穿电压,因此,雪崩光电二极管始终处于击穿状态,从而对信号进行无限大的放大,实现单个光子的射入也会引发雪崩效应,进而出现电流脉冲,为单光子探测技术提供探测基础^[11-12]。

在雪崩光电二极管完成一次单光子探测工作时,探测器电路需要对器件电流值有所限制,从而防止器件损坏并保证器件的雪崩状态复位。同时,由于器件复位需要一定时间,而在此时间内,探测器入射光信号将无法再次触发二极管雪崩。因此,复位期间内,单光子探测器的探测功能失效,这段时间称为死区时间。

雪崩光电二极管的输出信号通过光子计数器实现脉冲检测计数从而进行处理使用,用以完成单光子探测工作。而光子计数器主要由信号放大器、甄别器以及计数器组成。其中,放大器将电脉冲放大,具有较宽的通频带和线性范围以及低噪声系数;甄别器通过设定的甄别电平实现对低幅度的噪声脉冲滤除,从而降低探测器的背景噪声干扰;计数器的主要作用为,对采样周期内甄别器输出脉冲进行计数,完成单光子探测的检测工作。

在单光子探测器工作过程中,对探测能力存在影响的因素主要包括:

1) 暗计数:在单光子探测技术中,暗计数作为单光子探测系统性能重要影响因素,是指杂散光(非信号光)和电噪声被单光子探测器误判为有效光信号的情况^[13]。

同时,暗计数是在没有入射信号光的情况下的平均计数率,主要由热效应引起,可以通过对探测器增设冷却装置以及减小探测器口径等方式降低暗计数率。

2) 死区时间:由于单光子探测器中雪崩二极管工作在盖革模式,当探测器完成一次触发后需要通过一段时间完成二极管复位,在此之前无法进行下一次光子触发事件的

探测,雪崩光电二极管复位所用的时间也叫做死区时间,死区时间的大小会影响光子计数的分布以及目标回波信号被检测的概率,死区时间越小,探测器性能越优秀。

3) 泊松统计噪声:在单光子探测系统中,泊松统计噪声是一种常见的噪声类型。主要来源是光电倍增管探测热光源发射的光子,当这些光子打到光阴极上的时间间隔存在随机性,而大量粒子的统计结果往往服从泊松分布。

泊松统计噪声的主要特点为:泊松统计噪声对探测系统的影响正比于光子数。这种噪声会对测量结果产生影响,例如在非视域成像过程中,探测到的回波光光子数较少,泊松噪声较大,从而导致探测效率的降低以及探测结果不理想。

4) 脉冲堆积效应:脉冲堆积效应是单光子探测中出现的现象,会影响信号计数系统的性能^[14]。这一效应主要发生在高速甄别器和计数器构成的信号计数系统中。具体来说,当单光子探测器在分辨时间内相继有两个或两个以上的光子入射时,由于光子间时间间隔小于分辨时间,雪崩光电二极管只会输出一个电脉冲,导致计算光子数小于实际光子数。同时,由于死区时间的存在,在死区时间输入信号时,计数率也会受到损失。这一现象成为脉冲堆积效应,会造成输出脉冲计数率的误差。

2 单光子探测技术

2.1 单光子探测技术累积过程

在单光子探测技术应用过程中,探测器回波信号如图 1 所示,其中黑色脉冲为目标回波信号,白色脉冲为干扰信号,可以看出,从一个探测周期内无法将目标脉冲所含信息从全部脉冲序列中有效剥离出来^[15]。因此,在探测工作中,需要对多个周期信号进行累计处理,获取探测结果。



图 1 一个探测周期内探测器回波信号示意图

多次累积方法指的是对目标点进行探测时,发射 N 个激光脉冲,对回波信号进行 N 次累积,每个激光脉冲波束对应一次累积过程。在这 N 次累积过程中,噪声信号对探测器的触发是无序的,随机的,均匀的分布在整个时间轴上,而目标信号的回波光光子是有序的,集中在某个区间,呈泊松分布,在时间轴上会突显出来^[16-17]。累积结果如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,多次累积的方法可以将信号光从噪声中提取出来,但是仍然需要确定累积次数、门限时间等条件。

2.2 单光子探测技术工作情况分类

在单光子探测计数工作过程中根据激光脉冲宽度与计时时钟分辨率大小的关系,可以分成两种情况:窄脉冲累积探测和宽脉冲累积探测^[18]。

当激光脉冲宽度小于计时时钟分辨率,或者两者相等的情况下,信号光子计数分布图分布在少数的子区间内,称之为窄脉冲累积探测,如图 3 所示。

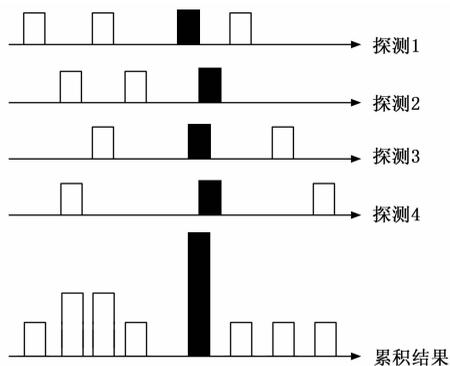


图 2 多个周期累积结果示意图

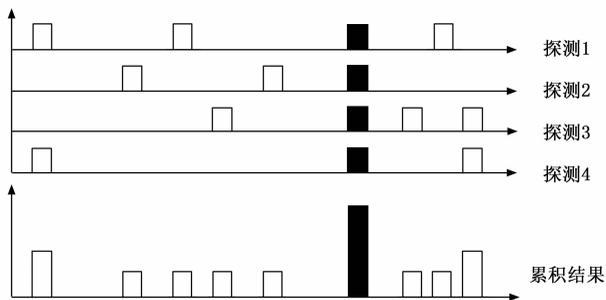


图 3 窄脉冲探测累积检测示意图

当光子信号射入单光子探测器时, 单光子探测器探测模块输出一个脉冲宽度为 $A \text{ ns}$ 的高电平 TTL 信号, 光子计数器将捕捉到 TTL 信号的上升沿到达的时刻并记录一个光子计数。白色脉冲表示噪声光子触发了雪崩效应, 它是均匀的分布在探测区间内的, 且背景噪声触发雪崩效应具有随机性; 黑色脉冲表示目标回波信号光子触发了雪崩效应, 它的位置是固定的。因此, 如图 3 中累积结果所示, 经过累积之后, 目标位置的光子计数情况异常明显。单光子探测器光子探测正是基于此特点判断目标信号的。

当激光脉冲宽度远大于计时时钟分辨率时, 信号光子计数分布图分布在很多子区间内, 称之为宽脉冲累积探测, 如图 4 所示。

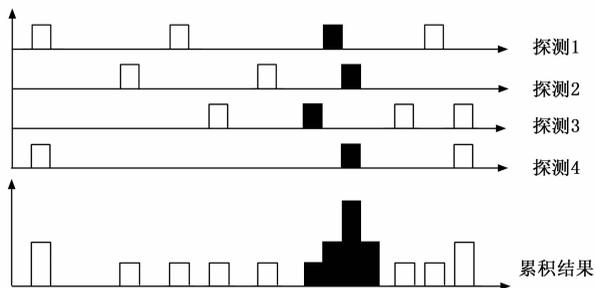


图 4 宽脉冲探测示意图

由于宽脉冲累积探测中的信号区间较宽, 信号光子计数可能在信号区间内的任意位置触发, 少次累积探测由于目标信号的随机性而无法体现出信号的相关性。只有当累

积次数逐渐增加时, 累积的信号光子计数分布图才会呈现出一个近似脉冲形状的包络。

本文中单光子探测系统采用窄脉冲探测体制, 激光脉冲宽度小于时钟分辨率。

2.3 单光子探测技术累积概率模型

在针对单光子探测计数累积次数及门限时间等条件进行建模的研究过程中, 将时间区间分割成多个子区间, 子区间的宽度为计时时钟的分辨率。从目标反射回来的信号光子和背景噪声光子同时入射到单光子探测器的光敏面上, 在整个探测过程中, 可以认为背景噪声是均匀分布的。平均信号光子数以探测效率转变为平均信号光电子数, 平均背景噪声光子同样以探测效率转变为平均背景噪声光电子数 N_b , 探测器本身还存在着平均暗电流电子噪声, 暗电流电子数同样可以认为是均匀分布的, 每一个光电子都能 100% 发生雪崩击穿效应。其中单光子探测效率 $\eta = \text{量子效率} \times \text{雪崩效率}$, 量子效率和雪崩效率都是探测器的固有属性。

一般的光子探测而言, 经漫散射目标作用的回波信号服从负二项分布, 当回波信号非常小的时候, 二项分布可以很好地近似为泊松分布。这对于主要用于微弱信号探测的光子探测非常容易满足, 所以采用泊松分布来描述单光子探测器光子信号响应模型。

基于上述理论分析, 一个激光脉冲内的光子数统计^[19]分布为:

$$p(n) = \frac{\bar{n}^n e^{-\bar{n}}}{n!} \quad (1)$$

\bar{n} 为每个脉冲的平均光子数, $p(n)$ 为某个脉冲中出现 n 个光子数的概率。

考虑单光子探测器接收的波长属性, 探测器所接收到的单个脉冲平均光子数 N_s 为:

$$N_s = \frac{\lambda E_{\text{pulse}}}{hc} \quad (2)$$

式中, λ 为激光波长, E_{pulse} 为单脉冲能量, h 为普朗克常数 6.626×10^{-34} , c 为光速。

而单光子探测模式的噪声光子主要由视场内的背景光噪声 N_b 和单光子探测器暗计数 N_d 构成, 噪声产生的随机过程相互独立且服从泊松分布, 总噪声光子为:

$$N_n = N_b + N_d \quad (3)$$

综合上述分析, 每个脉冲光子分布^[20]为:

$$s(t) = s_1(t) + N_1(t) = N_s \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(t-T)^2}{2\sigma_s^2}\right] + N_n \quad (4)$$

$s(t)$ 为探测器脉冲光子分布, N_s 为单脉冲平均信号光子数, N_n 为单位时间噪声光子数, σ_s 为信号均方根脉宽, T 为信号时间中心。

因此, 在 t 时间段内探测到 k 个光子的概率^[21]:

$$p(k, t) = \frac{\left[\int_0^t s(t) dt \right]^k e^{-\int_0^t s(t) dt}}{k!} \quad (5)$$

单次探测发生光子探测的概率为，

$$p_d = 1 - \exp\left[-\int_0^{T_i} s(t) dt\right] \quad (6)$$

定义探测概率为在目标区间发生探测，其概率为：

$$p_d = \left[\exp\left(-\int_0^{T_i} N(t) dt\right)\right] \cdot \left[1 - \exp\left(-\int_0^{T_i} s(t) dt\right)\right] \quad (7)$$

单次时隙虚警概率为噪声光子引起了光子探测。

$$p_{fa} = \left[\exp\left(1 - \int_0^{T_i} N(t) dt\right)\right] \cdot \left[1 - \exp\left(-\int_0^{T_i} N_n(t) dt\right)\right] \quad (8)$$

进行 M 次探测，当光子探测累积次数阈值 N 次后，认为进行了一次探测。此时光子探测概率为：

$$p_D = C_M^N p_d^N (1 - p_d)^{M-N} + \dots + p_d^M \quad (9)$$

此时光子虚警概率为：

$$p_{FA} = C_M^N p_{fa}^N (1 - p_{fa})^{M-N} + \dots + p_{fa}^M \quad (10)$$

3 单光子探测分集接收设计方法和仿真测试

基于前文单光子探测技术中光子检测概率理论研究进行仿真分析。

本文方案设计中的视场角设计为 1 mrad，理想情况下，随着镜头口径增加，噪声光子和回波光子同比例增加。但是在实际应用过程中大口径镜头的加工误差控制和杂散光抑制难度更大，背景噪声更高^[22-23]。

为抑制高背景噪声条件下死区时间对接收系统的影响，本文设计中采用了分集接收方案，利用多个口径完全一致的接收镜头等效替代一个接收面积相同、视场相等的大口径接收镜头采集光回波信号。图 5 展示了一种可行的分集接收镜头排布方式，如图所示，分集接收系统中各镜头围绕同一圆心均匀分布，各镜头中心距公用圆心距离为 R 。各镜头指向的方位角和俯仰角相同，其接收光轴互相平行。所有镜头安装于同一转台上用于进行探测扫描，转动扫描过程中，各镜头接收视场的变化同步。当各镜头探测同一目标时，该系统的总接收面积，为各镜头的接收面积之和。为保证目标信号被所有镜头收到，目标与镜头之间存在最小距离限制，在图 5 所示的镜头排布中， $L = L_{\min} \geq R \times \cot\left(\frac{\theta_{\text{收}}}{2}\right)$ ， L 为目标距离， L_{\min} 为近距离分集接收盲区， $\theta_{\text{收}}$ 为任一镜头接收视场角（全角）。小于该距离时，信号只能被部分镜头接收到，系统接收增益下降。

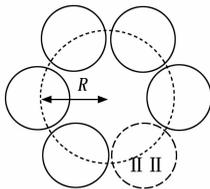


图 5 分集接收镜头设计原理图

在采用飞行时间法测量目标位置的探测系统中，由于信号回波时间具有相关性，在后续累积处理过程中，信号光子数在时间轴的固定位置上不断累积，而背景噪声光子

具有随机性，噪声光子数在时间轴的随机位置出现。分集接收方案使得系统在背景噪声光子数总量相同的情况下，多个探测器同时进入死区时间，进而系统彻底致盲的概率大大下降。

针对以上理论分析，首先进行了仿真分析验证，仿真工具选择 MathWorks MATLAB R2018b 软件，仿真条件分为噪声环境较好和噪声环境较恶劣两种，仿真模型包括 1 个 10 cm 镜头、1 个 14.14 cm 镜头、1 个 20 cm 镜头和 4 个 10 cm 镜头，其中 20 cm 镜头和 4 个 10 cm 镜头的接收面积等效，通过对不同镜头在不同环境下多次累计后判别目标理论参数与判决结果的差异性计算系统探测结果为虚警、漏报还是探测成功，经过环境影响随机生成的大量重复仿真获取系统探测及虚警概率。仿真流程如图 6 所示。

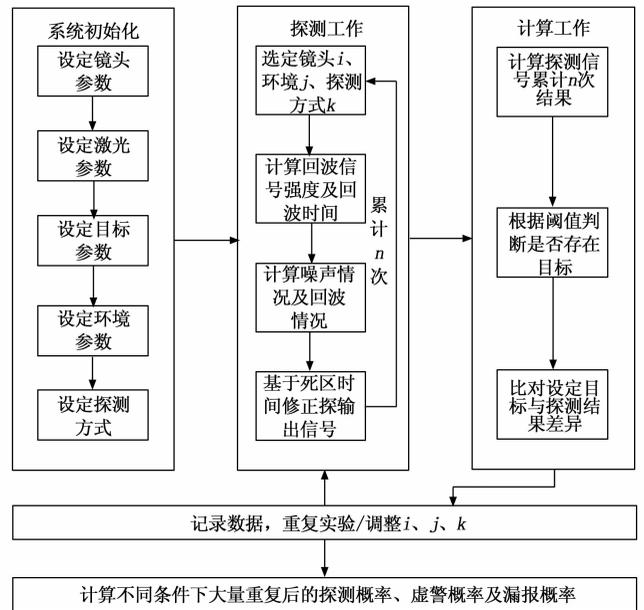


图 6 分集接收仿真示意图

在仿真工作中，首先对系统进行初始化设计，主要包括：

- 1) 镜头参数设计：四种镜头的尺寸、个数、滤波片线宽以及探测器死区时间等参数；
- 2) 激光参数设计：激光波长、脉冲频率、脉冲宽度等参数；
- 3) 目标参数设计：目标距离、目标位置以及光反射率等参数；
- 4) 环境参数设计：背景噪声强度等参数；
- 5) 探测方式：定点探测距离和扫描探测成像。

其中，环境 1（小噪声）条件下，大气散射强度 3 W/(sr/m²/μm)；环境 2（大噪声）条件下，大气散射强度 9 W/(sr/m²/μm)。接收镜头滤波片线宽 1.2 nm，接收视场角 1 mrad。

在探测工作中，选定镜头 1、环境 1 和探测方式 1 后计算目标在激光照射下的回波信号强度及回波时间，并通过

这两个计算参数判断本次探测目标回波信号是否可以被探测以及探测的时间。而后计算噪声对探测器输出信号的影响, 并通过全周期噪声信号结合探测器死区时间对输出信号进行修正, 即第 m 个点存在噪声或目标的情况下, 第 $m+1 \sim m+p$ 个点为 0, p 为死区时间占用采样点数。重复探测 n 次, 并将探测结果用于计算。

在计算工作中, 计算 n 次累计结果, 并通过设定阈值判断是否存在可判决为目标的结果。比对设定目标位置与探测目标位置的差异。当不存在探测目标时, 漏报次数加 1; 当设定目标位置与探测目标位置不等时, 虚警次数加 1; 当两者相等时, 探测次数加 1。

重复上述流程到实验次数足够判断当前参数下的漏报概率、虚警概率和检测概率后, 更换镜头或环境参数, 重复实验。

扫描成像仿真中, 探测图像如图 7 所示。

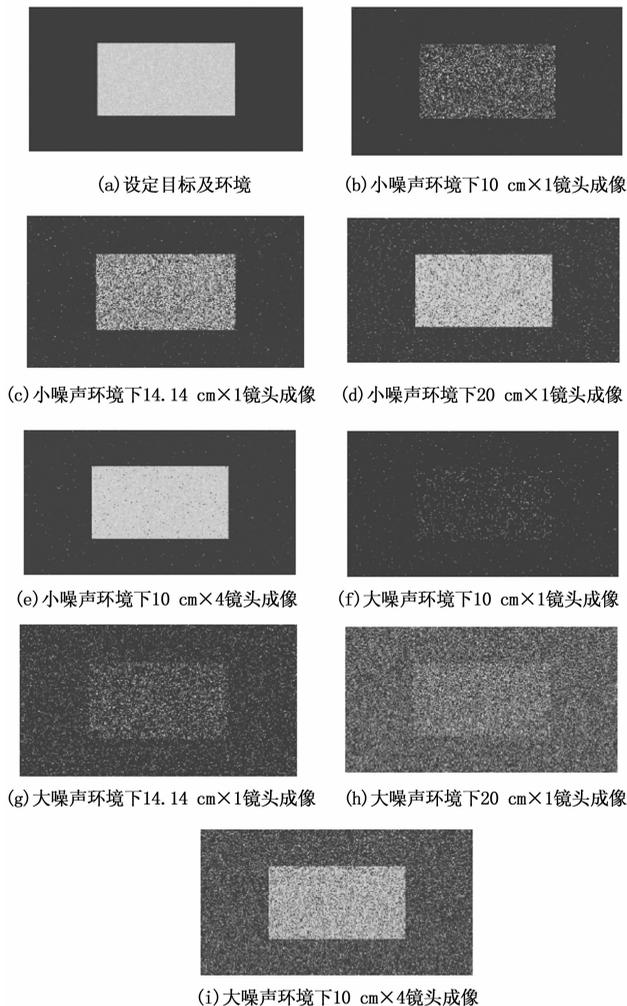


图 7 分集接收扫描成像仿真示意图

图 7 (a) 为目标图像, 图 7 (b) ~ (i) 为不同环境及镜头下成像的仿真结果, 可以看出, 在小噪声环境下, 探测概率随着镜头口径的增大而增加, 而利用分集接收的探测系统成像效果要明显优于等效口径下单个大口径探测器。而在

大噪声环境下的情况下, 探测效率与口径大小间的关系无法直观获取, 但采用分集接收的探测器成像效果的提升十分明显。对各参数下单光子探测系统的探测概率、虚警概率等参数进行定量分析, 仿真结果如表 1 所示。

表 1 分集接收探测概率仿真结果(噪声环境较好)

序号	口径	探测概率/%	虚警概率/%
镜头 1	10 cm×1	20.8	0.2
镜头 2	14.14 cm×1	60.6	0.8
镜头 3	20 cm×1	83	3.7
分集接收	10 cm×4	98.7	0.4

首先分析小噪声环境下的仿真结果。由于不同口径镜头背景噪声与口径的平方成正比关系, 因此随着口径增加, 背景噪声逐渐升高。从表中可以看出, 随着单个镜头面积的增加, 探测概率获得提升, 但并不是线性等比增大; 而采用分集接收后, 噪声环境没有变化, 但是探测概率和虚警概率明显获得了改善。从而保证了采用分集接收的探测系统探测概率提升、虚警概率下降。

大噪声环境下的仿真结果如表 2 所示。

表 2 分集接收探测概率仿真结果(噪声环境恶劣)

序号	口径	探测概率/%	虚警概率/%
镜头 1	10 cm×1	15.4	0.8
镜头 2	14.14 cm×1	24.6	10.6
镜头 3	20 cm×1	9.6	56.1
镜头 4	10 cm×4(分集接收)	92	6.9

对比表 2 中多个镜头仿真所得探测概率可以看出, 在大噪声环境下, 对单一镜头情景, 对 10 cm 口径的镜头 1, 若镜头面积增大一倍变为口径 14.14 cm 的镜头 2, 探测概率从 15.4% 提升至 24.6%。若镜头面积再增大一倍到 20 cm 的镜头 3, 由于背景噪声过大造成 Gm-APD 频繁进入死区而致盲, 系统的探测概率反而降低到 9.6%。这说明在大背景噪声条件下, 单纯提升镜头口径, 无法有效提升系统探测概率。这是单光子探测的量子效应和 Gm-APD 的死区时间特性综合造成的, 与传统非单光子的激光探测系统中, 探测概率会随着镜头口径增大会不断提升的传统经验不同。

对比表 2 中的镜头 3 和镜头 4。两者的等效总接收口径相同, 镜头 3 为传统单镜头模式, 镜头 4 为分集接收模式。仿真数据表明, 分集接收的镜头 4, 在大背景噪声条件下, 探测概率和虚警概率明显优于单一镜头的镜头 1。

综合分析表 1、表 2 可以看出, 在相同接收口径条件下, 无论是小背景噪声条件还是大背景噪声条件, 分集接收可以提升系统的监测概率, 并降低虚警概率。大背景噪声条件下, 分集接收的优势更为明显。

4 实验验证

为了验证分集接收对抑制死区时间影响的有效性, 搭建了原理样机, 并通过对远距离目标扫描成像进行试验验证, 实验装置如图 8 所示, 包括转台、发射镜头、接收镜头

以及信号处理模块和上位机，实验装置采用自研设备，其中，接收镜头 A 镜头口径 7.07 cm，接收镜头 B1、B2 镜头口径 5 cm，两镜头间距 6.5 cm。分集接收时，为保证 B1、B2 镜头同时接收到目标信号，目标与镜头间的距离应 $\geq L_{\min} = 65 \text{ m}$ 。

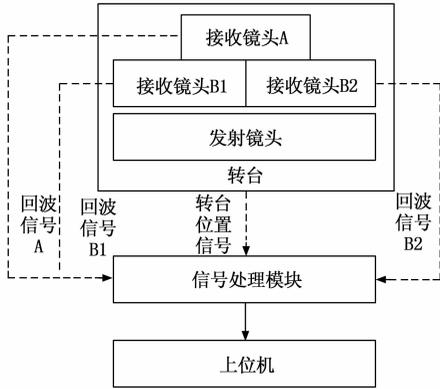


图 8 实验装置示意图

实验装置工作流程如图 9 所示。

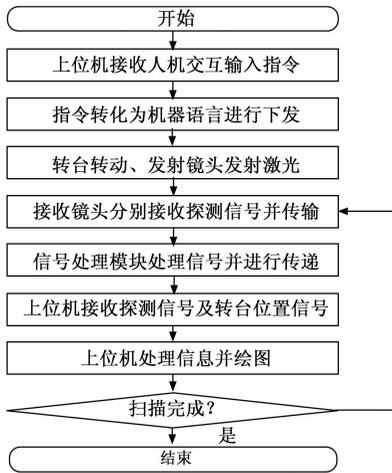


图 9 实验装置工作流程图

其中，上位机人机交互界面指令包括：发射镜头激光功率、脉冲宽度、脉冲周期；转台扫描范围以及扫描速度；发射镜头以及转台的启停；接收镜头对分集接收探测和传统探测的模式选取等。“开始”指令下发后，各模块按设定参数工作，上位机实时接收信号处理模块反馈探测信号与转台的位置信号，对传统探测信号或完成逻辑处理的分集接收探测信号进行累计计算，判别目标的有无与参数，结合转台位置信号进行图像绘制，完成扫描工作。

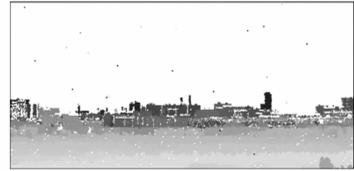
实验过程中保持发射镜头输出功率、扫描目标、作用距离等实验参数不变，并在同一天内极为接近的时间内进行不同参数镜头的实验，从而保证环境因素的最小变化可能。且目标足够远，统一转台上各镜头的位置差异带来的影响可以忽略。实验的单光子探测系统配备了一个发射镜头和 3 个接收镜头。3 个接收镜头的口径分别是 5 cm、5 cm

和 7.07 cm。3 个接收镜头除口径存在差异外，探测器型号、接收视场角等参数完全一致。发射和接收镜头光轴平行，共同固定在转台上，通过转台的转动实现了发射视场和接收视场的转动和扫描成像。单光子探测采用飞行时间法，通过信号的回波时间确定目标距离。工作时，发射镜头始终不变，接收镜头可以选择任单个接收镜头独立工作，也可以选择多个接收镜头联合工作。

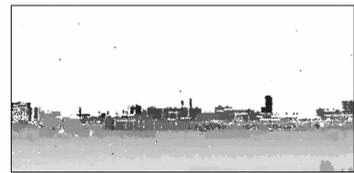
实验中，目标距离 11.1 km，环境能见度 10 km，天气晴朗，发射视场角 0.5 mrad，接收视场角 1 mrad，激光脉冲宽度 1 ns，激光线宽 1.2 nm。对环境扫描探测成像的实验结果如图 10 所示。



(a) 扫描目标照片 (相机拍摄)



(b) 7.07 cm 单个镜头扫描成像结果



(c) 2个5 cm镜头分集接收扫描成像结果 (等效口径与1个7.07 cm镜头相同)

图 10 扫描成像实验结果对比

图 10 (a) 为待探测目标相机摄像照片；图 10 (b) 显示了第一次成像的结果，第一次成像接收镜头采用了单个 7.07 cm 镜头；图 10 (c) 显示了第二次成像的结果，第二次成像的接收采用了 2 个 5 cm 镜头分集接收。单个 7.07 cm 镜头和 2 个 5 cm 镜头，在接收镜头面积上是等效的。在实验过程中，两次成像的时间间隔相差 5 min，外部环境的变化可以忽略，发射镜头参数不变。

图 10 (b) 和图 10 (c) 的图像中，不同颜色代表了不同的目标距离。除天空区域外，图像中的白色噪点为探测盲点。造成盲点的主要原因，为单光子探测器进入死区时间。对比图 10 (b) 和图 10 (c)，可以看出，在分集接收的模式下，图像中的盲点数量明显少于传统单个镜头模式。根据数据统计结果，图 10 (b) 盲点数目约为图 10 (c) 的 7 倍。可以得出结论，在同等条件下，采用分集接收时，比等效的单个镜头，能够明显降低图像盲点数量，提高对目标的探测概率。

(下转第 129 页)