

双通道符合计数光子外差探测系统仿真构建与研究

蒲梦瑶^{1,2,3}, 胡以华^{1,2*}, 杨博^{3**}, 董晓^{1,2}, 张鑫源^{1,2}

¹国防科技大学电子对抗学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;

²国防科技大学电子对抗学院安徽省电子制约技术重点实验室, 安徽 合肥 230037;

³95793 部队, 贵州 贵阳 550000

摘要 本文提出将符合测量方法用于光子外差测速技术中,将光子符合计数模式应用于光子外差测速系统,能够在一定程度上减少背景噪声、暗噪声和后脉冲带来的光子误计数,提高信噪比等测速性能。基于外差原理与单光子探测的泊松响应,以及光子符合计数原理,本文仿真研究了双通道符合计数光子外差系统的性能,利用 1550 nm 连续波激光器探测匀速运动目标,结果表明,双通道符合计数模式下中频信号功率谱的信噪比明显高于单通道自由运行模式和一阶滤波下的功率谱信噪比。随着信号光子数增加,两种计数模式的信噪比能够相差 2~3 dB。针对该方法,又进一步通过仿真研究了本振光强、背景噪声、中频频率、探测时长四个因素对双通道符合计数光子外差测速系统性能的影响。结果表明,随着本振光强与信号光强的比值逐渐增大,系统信噪比先增大后减小,在 $k_c=3$ 附近时达到最大;背景噪声越大,饱和信号光子数越大,饱和信噪比越低;探测时长越长,饱和信噪比提高幅度越大;而在探测带宽之内,中频频率也即运动目标的速度对结果影响较小。本文从改变前端光子计数模式的角度提高光子外差探测系统的性能,为提高光子外差测速的信噪比拓宽了思路。

关键词 探测器; 光子外差; 单光子探测; 符合计数; 测速性能; 影响因素

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222133

1 引言

随着对远距离目标探测的需求越来越大^[1],单光子探测技术迅速发展,已经能够达到光子量级的探测^[2],可探测到远距离目标的极微弱回波,激光外差技术与单光子探测技术相结合能够实现远距离运动目标的高灵敏度探测^[3],光子外差探测技术随着单光子探测技术的发展应运而生。单光子探测技术在弱光探测^[4]、3D 成像^[5]、空间光通信^[6]等多个领域已有广泛的应用。

然而由于单光子探测器具有较高的灵敏度,在白天强背景光噪声的影响下^[7],需要超窄带的滤光片才能保证探测器正常工作,因此光子外差探测抗背景噪声能力尤为重要。除此之外,单光子探测器的暗计数和后脉冲效应都会导致误计数从而降低信噪比^[8-9]。在前期光子外差探测的研究工作中,多数学者把降噪的关注点放在信号处理中,通过提出新的信号处理方法对回波信号进行滤波去噪^[10-12],很少有人从探测系

统的改善或者光子计数模式的改变入手。符合测量概念由来已久并得到了广泛的应用^[13],而且光子计数器中也存在符合计数模式,但多用于量子通信、弱光干涉测量、单光子测距、远距离成像等方面^[14-19]。

本文将符合计数模式应用于光子外差探测中,该模式依赖多通道探测,在光子计数端就对光噪声进行一定程度上的滤除,提高信噪比。多通道方法在传统激光外差技术中已有应用^[20]。理论上而言,多通道符合计数模式中通道数越多对随机噪声的滤除效果越好^[21],但是应用于光子外差探测中通道数越多混频光分束也越多,为保证探测准确性就要提高系统中激光功率,这有可能会对光学元件造成损伤同时也增大了后续安排实验的难度,因此本文研究双通道符合计数模式下的光子外差探测,既能保证不失光子符合计数模式的特点又贴合实际。

本文通过仿真构建了双通道符合计数光子外差探测系统,通过与单通道计数模式下的光子外差探测结果进行对比,证明符合计数模式的优越性。进一步地,

收稿日期: 2022-12-12; 修回日期: 2023-03-08; 录用日期: 2023-03-20; 网络首发日期: 2023-04-21

基金项目: 国防科技大学科研计划项目(ZK18-01-02,ZK-35)、国防科技大学自主科研创新基金(22-ZZCX-07)、国家自然科学基金(62201597)

通信作者: *skl_hyh@163.com; **yb18642533199@163.com

本文还研究了本振光强、背景噪声、中频频率、探测时长四个因素对两种不同模式下探测系统性能的影响。本文研究对后续符合计数光子外差实验系统的搭建和参数的选取具有指导意义。

2 基本原理

2.1 光子回波外差信号模型

激光外差探测中,本振光为 $E_L(t) = A_L \cos(\omega_L t + \varphi_L)$,信号光为 $E_S(t) = A_S \cos(\omega_S t + \varphi_S)$,光外差探测通过将频率一致或相近的光波做相干叠加,得到中频信号。传统探测器是将此中频信号转化为交变电流信号,实现对中频频率的探测,中频光电流为 $i(t) = \frac{e\eta}{h\nu} [E_S(t) + E_L(t)]^2$,变换后为

$$i(t) \propto \frac{1}{2} E_L^2 + \frac{1}{2} E_S^2 + E_L E_S \cos(\omega_I t + \varphi) = i_{dc} + i_{if}(t), \quad (1)$$

式中: E_L 是本振光强; E_S 是信号光强; ω_I 是中频角频率; i_{dc} 代表直流信号; i_{if} 代表交流信号。

中频光电流 i_{if} 的频率即为激光照射运动目标产生的多普勒频移,根据多普勒测速原理,中频信号频率为

$$f_{if} = \Delta f_d = \frac{2v}{\lambda}, \quad (2)$$

式中: f_{if} 为中频信号的频率; Δf_d 为激光的多普勒频移; v 为运动目标的速度; λ 为激光源的激光波长。

光子计数器只能记录光子的有无以及光子发生事件的时间信息^[22],将式(2)中频光电流转换为光子数的形式,即为

$$N(t) = N_S + N_{LO} + 2m \sqrt{N_S N_{LO}} \cos(\omega_I t + \varphi) + N_D + N_B, \quad (3)$$

式中: $N(t)$ 为总光子计数率; N_S 、 N_{LO} 、 N_D 和 N_B 分别为接收信号光、本振光、暗噪声和背景噪声的等效光子计数率; m 为外差效率。

2.2 单光子探测模型

由于光的粒子性,光子到达探测器的实际个数和理论情况会发生偏差,导致单光子探测器响应光子数和理论光子数存在一定波动,其统计特性符合泊松分布^[23]。盖革模式下的雪崩光电二极管(APD)在某时刻产生雪崩的概率与时刻 t 到时刻 $t + \Delta t$ 到达单光子探测器的光子总数有关。其雪崩概率^[24]是到达光敏面的光子流密度 $N(t)$ 的泊松响应在探测时间内的积分。因此在时刻 t 到时刻 $t + \Delta t$ 内探测到 k 个光子事件的概率 $P(t, k)$ 为

$$P(t, k) = \frac{\left[\int_t^{t+\Delta t} N_{(t)} dt \right]^k \exp \left[- \int_t^{t+\Delta t} N_{(t)} dt \right]}{k!}, \quad (4)$$

式中: k 为雪崩事件个数; $P(t, k)$ 为 k 个雪崩事件发生的概率; $N(t)$ 为光子流密度函数。

对于单光子探测器只能记录光子的有无,其只要探测到一个及以上光电子就会产生响应,所以,在时刻 t 到时刻 $t + \Delta t$ 内产生单光子事件的发生概率可以表述为

$$P(k > 0) = 1 - P(k = 0) = 1 - \exp \left[- \int_t^{t+\Delta t} N_{(t)} dt \right], \quad (5)$$

式中: $P(k = 0)$ 表示在时间 Δt 内没有单光子事件产生的概率。

2.3 光子到达时间序列

将探测到的所有有效光子事件进行时间排序,得到光子到达时间序列,光子到达序列是脉冲函数的和,每个脉冲函数 δ 对应一个光子事件,可表示为

$$X = \sum_{i=1}^{N_E} \delta(n - n_i), \quad (1 \leq n_i \leq N_T), \quad (6)$$

式中: X 是光子到达序列; N_E 是探测时间内发生光子事件的数量; N_T 是探测时长光子序列长度。

图1为在死时间为50 ns、中频信号频率为1 MHz的仿真条件下得到的仿真光子到达序列。光子响应时间序列与单光子探测器光敏面到达的光存在图1所示的对应关系。从图中可以看到,光子到达时间序列的疏密分布与探测光的强弱分布具有对应关系,可以通过光子到达的疏密规律得到中频信号的频谱分布。

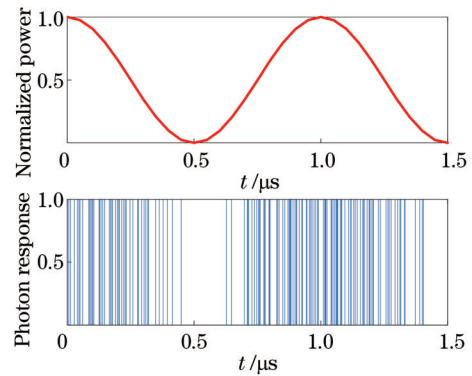


图1 光子响应时间序列疏密分布和光强对应图

Fig. 1 Density distribution of photon response time series corresponds to light intensity

3 双通道符合计数光子外差测速系统

3.1 光子计数模式

3.1.1 自由运行时间标签模式

单光子探测器在自由运行模式下,APD 偏压始终设置在雪崩点以上,在任意时刻探测到光子信号时,将会产生一个脉冲信号,控制电路在感应到有光子脉冲产生后随即将偏压信号拉低至雪崩点以下,从而实现淬灭^[25]。

时间相关单光子计数器会将自由运行模式的所有有效事件进行记录,并按照到达的时间先后顺序进行排序,记录每一个事件的时间信息,如图2所示。



图 2 自由运行计数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of free-running counting

3.1.2 双通道符合计数模式

同时利用两个单光子探测单元记录光子事件,然后用符合光子计数器两条通道一起连接两个探测单元的输出端,当符合光子计数器的两个通道同时有脉冲

到达时,执行一次有效计数。当两个通道中任意一个通道没有脉冲到达时,符合光子计数器不执行计数,即为双通道符合计数^[26]。

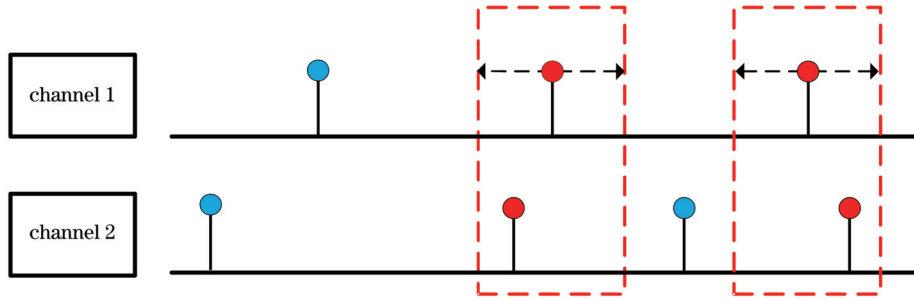


图 3 双通道符合计数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of two-channel coincidence counting

如图 3 所示,双通道符合计数系统会自动选择 channel 1 通道作为主通道,另外一个通道作为从通道,以主通道为中心创建一个时间窗口(该窗口大小可设定),当主通道和从通道在这个窗口内均有光子计数时,则产生一次有效的符合,最后给出在一定采集时间内的符合计数结果。

符合计数系统由内部逻辑判断符合关系,并输出符合脉冲^[27]。两个单光子探测单元输出的脉冲信号输入逻辑与门,当且仅当两输入都为高电平时,逻辑与门输出高电平,这意味着两个光子脉冲在一定时间范围内同时到达与门则符合光子计数器才会实现有效计数。

3.2 双通道符合计数光子外差测速系统设计与介绍

因为光子回波外差信号在时域上的分布是集中而有规律的,而背景光噪声和单光子探测器的暗计数和后脉冲是随机分布的。根据这一特点,结合符合计数原理,得到本文的双通道符合计数光子外差系统的设计思路。将拍频后的外差信号光波均匀分成两份,分别送入两个单光子探测通道中,根据不同的情况对系统设置不同的符合门宽,当双通道在符合时间内都探测到信号光子时,才判定为有效信号,从而得到光子到达时间序列。该系统的抗噪能力相较于单通道光子计数大幅提升,可以在较大背景噪声下提取出有效的回波信号。

光子外差探测系统的示意图如图 4 所示。利用带金属扇叶的可调速光轴电机作为变速运动目标,运动目标与外差系统之间的相对运动导致光信号产生多普勒频移。用 1550 nm 连续波激光器作为激光光源,用

光分束器将激光光源分为信号光和本振光两部分实现零差探测。在本振光路中,利用可调衰减器调节本振光的光强。在信号光路中,利用光纤环形器和光纤耦合镜构造收发同轴光路,光纤耦合镜前放置中心波长为 1550 nm 的近红外干涉滤波片去除一部分背景噪声,随后,光纤环形器接收端接收到返回的光,在光耦合器上与本振光混合,产生中频信号,光强衰减至 1550 nm 波段对应的单光子数在单光子探测器饱和计数率范围内后平均分为两束,连接到双通道单光子探测器的两个通道,并将两路光电信号连接符合计数器记录有效光子事件,从而得到中频信号的光子响应时间流。

4 仿真与分析

本节将利用仿真方法对本文设计的双通道符合计数光子外差测速系统进行研究分析。首先结合实际选择了合适的参数,而后对比分析了单光子计数器在单通道自由运行和双通道符合计数两种模式下光子外差测速系统的信噪比。在仿真中将光源线宽设置为 2 MHz,运动目标距离设置为 50 m,根据 $\tau_c = 1/\Delta\nu$ 可得相干时间约为 0.5 μs ,该线宽对应的相干长度约为 150 m,根据文献^[28]的研究结果,能够准确检测到对应的中频信号,所以本文不再着重分析光源的相干性对探测系统性能的影响,而是将重点放在其他可变因素对双通道符合计数光子外差探测系统性能的影响,进一步研究了本振光强、背景噪声、中频频率、探测时长在两种不同计数模式下对系统性能的影响。

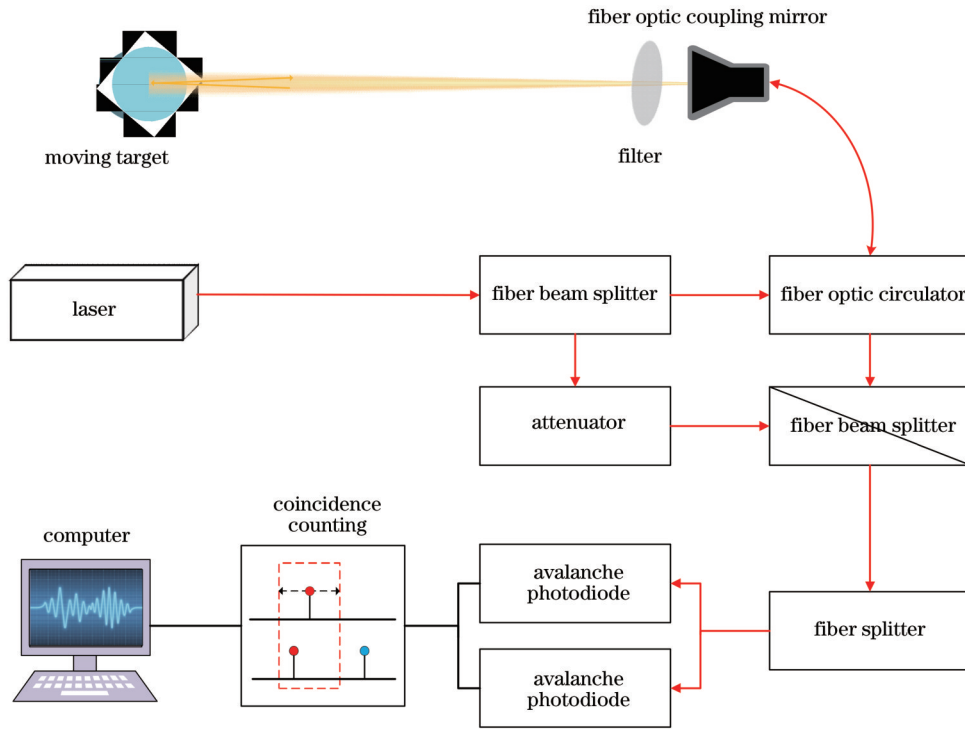


图 4 双通道符合计数光子外差测速系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of two-channel coincidence counting photon heterodyne velocity measurement system

4.1 不同滤波方法功率谱信噪比对比

光子外差探测传统的滤波方法是将光子响应分布初步处理得到光子累计直方图,对光子累计直方图曲线做一阶滤波得到滤波后的结果,作快速傅里叶变换(FFT)处理得到频谱图。本文一阶滤波算法选用滑动平均滤波法,将光子累计后滑动平均滤波方法与双通道符合计数方法相比较,再结合本文中未滤波单通道自由运行模式下所得结果,将三种方法进行对比。

符合计数时间窗口的大小,影响着窗口时间内两个通道同时有脉冲到达的概率。通过仿真研究时间窗口大小对探测结果信噪比的影响分布,仿真条件设置信号光子为 1.5 Mcps(Mcps 表示计数乘以 10^6 每秒)、本振光子为 1.5 Mcps、背景噪声光子为 1 kcps(kcps 表示计数乘以 10^3 每秒)、探测时长为 0.1 ms 的条件下,运动目标速度为 1.55 m/s 对应中频频率为 2 MHz,死时间为 50 ns,时间窗口在 20~100 ns 范围呈步进增加,仿真 20 次取平均值得到的结果如图 5 所示。

由图 5 可见,随着时间窗口的增加,探测信噪比先增大后减小,当时间窗口为 70 ns 时信噪比最大。显然,时间窗口过小时,时间窗口内两个通道同时有脉冲到达的概率太小会影响结果真实性,时间窗口越大,有效符合计数的概率越大,但持续增大,会导致双通道符合计数的滤噪能力下降。当时间窗口稍大于死时间时,有效符合概率最大,信噪比最高。根据图 5 再结合仿真采用的死时间参数,为方便处理将符合计数时间窗口设定为 50 ns。

本文根据多普勒测速基本原理和激光雷达方程仿

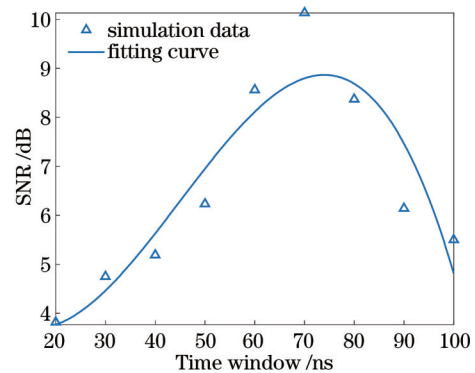


图 5 符合计数时间窗口大小对测速信噪比的影响

Fig. 5 Influence of coincidence counting time window size on signal-to-noise ratio (SNR) of velocity measurement

真模拟了光子外差系统对运动目标的探测过程,并将混频后的光子分别用单通道探测自由运行计数模式和双通道探测符合计数模式进行测量,得到两组光子响应脉冲的一维时间流数据,将这两组原始数据处理为等时间间隔下的光子到达时间 0~1 序列,单通道探测自由运行计数模式所得光子到达时间 0~1 序列进行光子累计直方图处理后再进行滑动平均滤波,利用 FFT 方法就能得到三组数据下的中频信号功率谱。本节仿真参数如表 1 所示。

通过仿真做定量分析,得到三种情况下归一化中频信号功率谱如图 6 所示。图 6 中 3 个分图从左至右依次为单通道自由运行模式结果功率谱解析图、光子累计后滑动平均滤波结果功率谱解析图,以及双通道

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Laser wave length	1550 nm
Single-photon detector dead time	50 ns
Single-photon detector dark count	100 Hz
Conforming time window	50 ns

符合计数法结果功率谱解析图。

通过图 6 可以看到,双通道符合计数模式下中频信号功率谱的信噪比明显高于单通道自由运行模式和一阶滤波下的功率谱信噪比。根据仿真结果,双通道

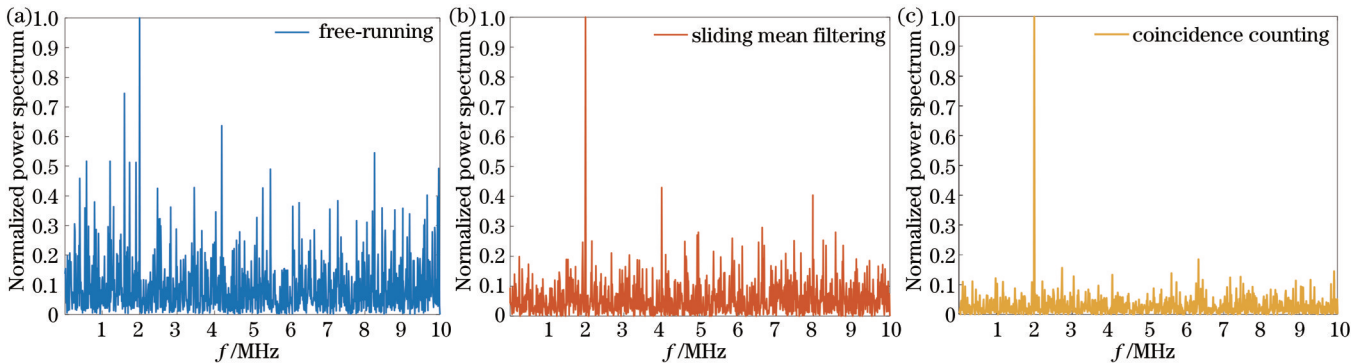


图 6 中频信号功率谱。(a)单通道自由运行模式;(b)光子累计直方图曲线做一阶滤波;(c)双通道符合计数模式

Fig. 6 Intermediate frequency (IF) signal power spectra. (a) Single channel free-running mode; (b) first order filtering of photon cumulative histogram curve; (c) two-channel coincidence counting mode

本文进一步研究了随着信号光子数增大,单通道探测自由运行计数模式和双通道探测符合计数模式的中频信号功率谱信噪比的变化规律,设置信号光子数从 1 Mcps 等步长增长至 5 Mcps,结果如图 7 所示。在本次及后续的仿真中,为了避免随机性带来较大误差,每个结果均是运行 20 次取平均值所得。仿真结果为离散的点且点数较少,虽然在一定程度上能够反映随着光子数增多中频信号信噪比的变化规律,但是不够直观。尤其为了观察后文中每个因素在多个赋值情况下的变化规律对比情况,将多个赋值情况结果置于一个图中,虽然不同赋值用不同颜色区分,但散点分布较为杂乱。因此将散点进行拟合形成曲线图,便于更直观地在图中观察影响规律,进一步地,每个因素在同一个图中多个赋值下的变化情况用曲线描述也更加清晰。显然,本文中双通道符合计数光子外差测速系统性能分布规律均为非线性规律,需要非线性拟合。三阶多项式拟合法作为常用的非线性拟合方法,其模型简单,曲线适应性强,所以将后续仿真中的点都进行了三阶多项式拟合。

由图 7 可以看到,无论是单通道自由运行模式还是双通道符合计数模式,信噪比都随着光子数的增加逐渐增大,当信号光子数增加时,信号在总响应光子数中占比更大,因此信噪比随之增大。当信号光子数到

符合计数模式的信噪比要比单通道自由模式高出 6 dB 左右,比一阶滤波下高出 4 dB 左右,但由于单光子探测具有泊松分布特点,噪声光子的响应也符合泊松分布的统计分布,仿真中又考虑了单光子探测的暗计数和后脉冲效应,因此单次仿真结果存在一定的随机性,不过三种方法的信噪比高低对比情况比较显著。双通道符合计数模式在符合过程中就滤掉了一部分在某单一通道独立出现的噪声光子,而单通道自由模式无论信号光子还是噪声光子都是直接响应,因此符合计数模式的信噪比更大,虽然对单通道自由模式光子累计直方图进行一阶滤波后能够消除一定的噪点,但无法避免单光子探测体制带来的影响。

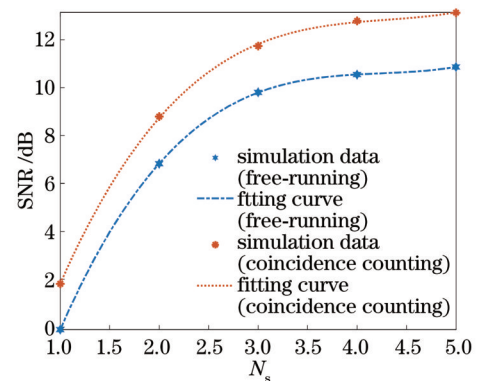


图 7 两种计数模式下中频信号的信噪比随信号光子数的变化规律

Fig. 7 Variation of SNR of IF signal with signal photon number under two counting modes

从 1 Mcps 增加到 3 Mcps 时,信噪比增幅很大,平均达到了 9 dB,然而当信号光子数继续增大时,信噪比增幅缓慢并逐渐达到饱和。与此同时,双通道符合计数模式相较于自由运行模式信噪比增幅也随着信号光子数增大并达到饱和,一开始增幅为 2 dB,饱和状态时增幅可达到 3 dB。由于单光子探测器的探测机理,其存在死区效应,因此具有饱和计数率,当探测到的光子数增大到一定程度时,信噪比不会再随着光子数的增

多而增大。

4.2 影响因素分析

本振光、信号光、背景噪声、暗计数、后脉冲概率、死时间、中频频率、探测时长等都会对光子外差探测性能造成影响,下面针对本振光强、背景噪声、中频频率和探测时长进行重点分析。

4.2.1 本振光

激光外差探测中本振光和接收到的信号光在探测器光敏面上要进行相干混频,探测器响应出差频信号电流,由于接收端接收到的信号光十分微弱,本振光功

率会对信号光功率起增强作用。在一定范围内,本振光功率越大增益越高,但是本振光功率过高时会产生附加的散粒噪声,反而使信噪比下降^[29]。因此本振光与信号光的比值在某个范围内将会达到系统信噪比的最大值。

将本振光与信号光的比值定义为 k_L ,仿真中 k_L 选取了四个值,除了比值等于1即本振光与信号光相等之外,另外也考虑了比值小于1和大于1的情况,为表现本振光并非越大越好, k_L 大于1的情况选择了两个值, k_L 对系统性能影响的具体结果如图8所示。

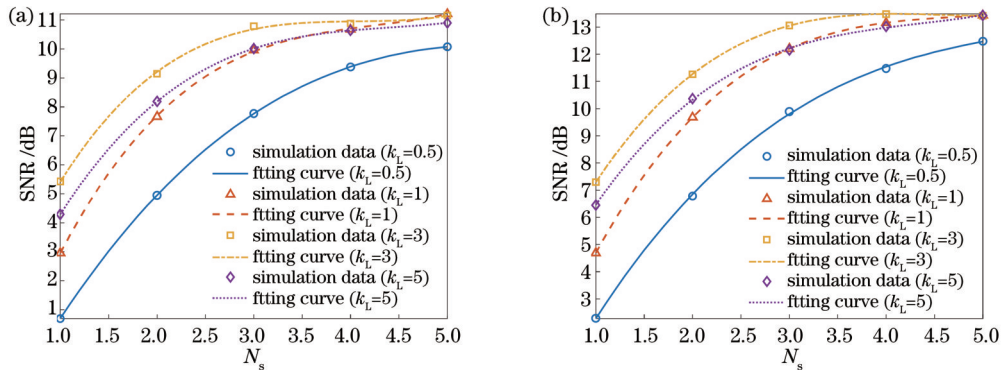


图8 本振光强对中频信号信噪比的影响。(a)单通道自由运行模式;(b)双通道符合计数模式

Fig. 8 Influence of local oscillator intensity on SNR of IF signal. (a) Single channel free-running mode; (b) two-channel coincidence counting mode

由图8可知,两种模式下中频信号的信噪比都会随着信号光子数增大而逐渐增大并达到饱和,其中单通道自由运行模式在信号光子数达到3 Mcps时就接近饱和,而符合计数模式达到将近4 Mcps才饱和。单通道自由计数模式的饱和信噪比约为11 dB,而双通道符合计数模式比单通道自由计数模式的信噪比高出2 dB左右。在本振光强与信号光强的比值小于1时,信噪比随信号光子数增大的变化规律最为明显,当信号光子数增大至5 Mcps时,还未达到饱和状态。 $k_L=1$ 比 $k_L<1$ 时信噪比要高,因为当本振光子数等于信号光子数时,相较于 $k_L<1$ 总光子数增多,噪声光子占比减小,信噪比增大。然后 k_L 并非越大越好,从图8中可以看到, $k_L=5$ 时中频信号信噪比虽然高于 $k_L=1$ 时,但小于 $k_L=3$ 时。可以推断出,随着本振光强与信号光强的比值逐渐增大,系统信噪比先增大后减小,在 $k_L=3$ 附近时达到峰值,但由于本文设置 k_L 的值较少,该结果存在一定误差,因此将在后续的研究中针对这个方向进行深入探讨。

4.2.2 背景噪声

光子外差系统在探测运动目标时不可避免地要在白天工作,因此背景光噪声成为单光子探测系统不可忽视的主要噪声来源^[30],研究分析背景噪声对双通道符合计数外差系统的影响非常重要,仿真结果如图9所示。

由图9可知,两种模式下中频信号的信噪比都会

随着信号光子数增大而逐渐增大并达到饱和,该结论与上文研究的结论一致。显而易见的是,背景噪声越大,信噪比越低。而且在不同背景噪声下,饱和信号光子数不同,背景噪声越大,饱和信号光子数就越大。当背景噪声为0.5 kcps时,信号光子数在3 Mcps左右就逐渐饱和,而当背景噪声为2 kcps时,信号光子数到5 Mcps时才接近饱和。其次不同的背景噪声下,所达到的饱和信噪比也不一致,背景噪声越大,饱和信噪比越低。单通道自由运行背景噪声为2 kcps比0.5 kcps下信噪比低1 dB左右,双通道符合计数时背景噪声为2 kcps比0.5 kcps下信噪比低2 dB左右。

4.2.3 中频频率

根据奈奎斯特采样定律,将单光子对光的强弱的响应看作是一次采样^[31],因此单光子探测器的响应带宽通常由死时间决定,所以探测差频频率上限为 $1/2t_{\text{dead}}$ 。下面研究 $1/2t_{\text{dead}}$ 以内的不同差频频率信号光对探测结果的影响。

从图10中可以看到,双通道符合计数模式比单通道自由运行模式信噪比平均高出2 dB。与图8、图9中信噪比随着信号光子数先增大后逐渐饱和这种变化缓慢且明显的特点相比,中频频率对信噪比的影响拟合曲线前期变化更陡,并在信号光子数为3 Mcps时信噪比达到峰值,当信号光子数继续增大,中频信号信噪比有少许的回落并逐渐稳定。其次,尽管中频频率 f_{IF} 的跨度从0.5 MHz到7 MHz,但4条曲线集中在一起难

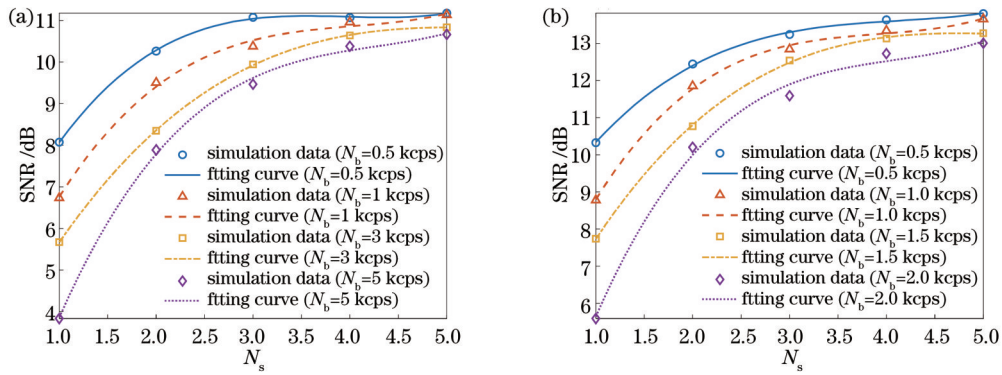


图9 背景噪声对中频信号信噪比的影响。(a)单通道自由运行模式;(b)双通道符合计数模式

Fig. 9 Influence of background noise on SNR of IF signal. (a) Single channel free-running mode; (b) two-channel coincidence counting mode

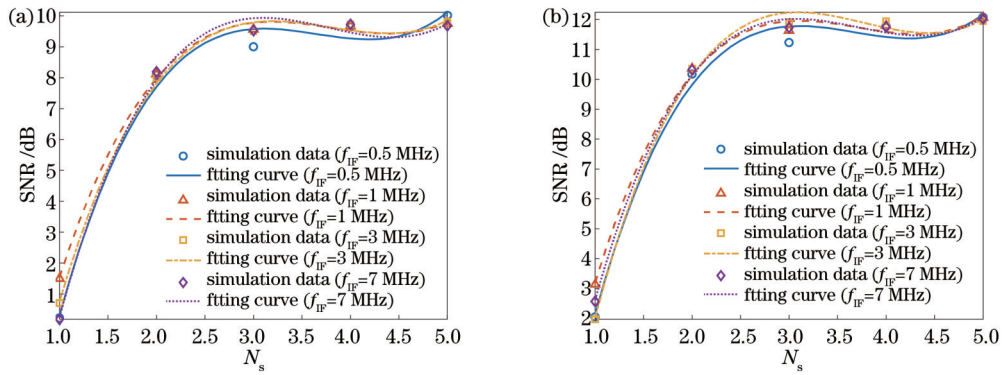


图10 中频频率对中频信号信噪比的影响。(a)单通道自由运行模式;(b)双通道符合计数模式

Fig. 10 Influence of IF on SNR of IF signal. (a) Single channel free-running mode; (b) two-channel coincidence counting mode

以分开甚至在某些线段中有交叉部分,因此中频信号频率也即运动目标的速度对系统信噪比的影响并不明显。

4.2.4 探测时长

采样频率设为 20 MHz,相同的采样频率,采样时间越长,采样点越多,累积的效果越明显,结果如图 11 所示。

图 11 中两种模式下信噪比的对比规律与之前一致,但能够看出,随着探测时长的增加,信噪比大幅提

高。原探测时长越短,增加探测时长后,饱和信噪比提高幅度越大,当探测时长从 0.05 ms 增加至 0.10 ms 时,饱和信噪比提高约 3 dB,而随着探测时长越来越大,从 0.15 ms 增加至 0.20 ms 时,饱和信噪比只提高了 1 dB 左右。由于单光子探测的死时间和符合窗口等时间参数一般为纳秒量级,虽然探测时间每次只增加 0.05 ms,但已经超出了 4 个数量级,因此探测时间越长,探测到的光子数越多,光子疏密分布规律累积效果越明显,中频信号分布在总光子数中贡献越大,所以

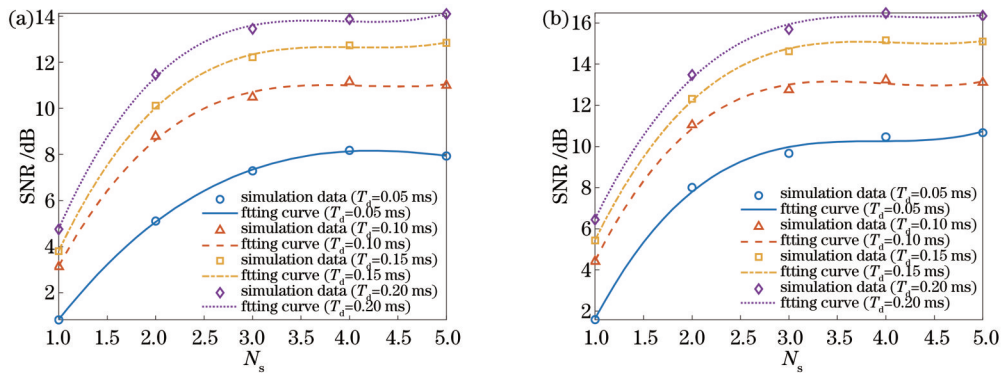


图11 探测时长对中频信号信噪比的影响。(a)单通道自由运行模式;(b)双通道符合计数模式

Fig. 11 Influence of detection duration on SNR of IF signal. (a) Single channel free-running mode; (b) two-channel coincidence counting mode

信噪比越高。

5 结 论

与单光子探测单通道自由运行计数模式相比,本文提出并设计的双通道符合计数光子外差方法,相较于一般的光子外差系统,不仅利用了两个单光子探测单元来探测外差信号光,还加入了符合计数器件。经过仿真验证,该方法和单通道探测相比具有显著优势,在符合计数的过程中,能够将一部分背景噪声、暗计数等噪声滤掉,从而提高信噪比,因为噪声是随机分布的,而信号是集中有规律地分布的。本文还进一步研究了本振光强、背景噪声、中频频率、探测时长四个因素对双通道符合计数光子外差系统性能的影响规律,并与单通道系统进行了对比。结果表明,本振光强、背景噪声、探测时长对结果的信噪比具有显著影响。本振光强并非越大越好,在本振光强与信号光强比值在 3~5 之间时,能达到最大信噪比。随着背景噪声的增大,信噪比越来越低,但是都会随着信号光子数到达 3 Mcps 后而逐渐饱和。探测时长越长,采样频率不变,采样点数增多,光子数随光强弱变化的起伏规律累积效果更明显,因此信噪比逐渐增大。不过在探测带宽之内,中频频率也即运动目标的速度对结果影响并不大。本文为符合计数的应用提供了新思路,也为光子外差探测系统信噪比的提高提供了可行的方案。

参 考 文 献

- [1] 吴洪波, 张新, 王灵杰, 等. 单光子激光与中波红外共口径探测光学系统[J]. 光学精密工程, 2021, 29(6): 1260-1269.
Wu H B, Zhang X, Wang L J, et al. Common aperture optical system of single photon laser and medium wave infrared[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(6): 1260-1269.
- [2] Holzman I, Ivry Y. Superconducting nanowires for single-photon detection: progress, challenges, and opportunities[J]. Advanced Quantum Technologies, 2019, 2(3/4): 1800058.
- [3] Jiang L A, Luu J X. Heterodyne detection with a weak local oscillator[J]. Applied Optics, 2008, 47(10): 1486-1503.
- [4] Shcherbatenko M, Lobanov Y, Semenov A, et al. Potential of a superconducting photon counter for heterodyne detection at the telecommunication wavelength[J]. Optics Express, 2016, 24(26): 30474-30484.
- [5] Huang X, Hong Y, Li Z P, et al. Frequency-modulated continuous-wave 3D imaging with high photon efficiency[J]. Optics Letters, 2022, 47(14): 3568-3571.
- [6] 万超, 郝浩, 赵清源, 等. 单光子探测在无线光通信收发技术中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 0500001.
Wan C, Hao H, Zhao Q Y, et al. Application of single photon detection in wireless optical communication transceiver technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(5): 0500001.
- [7] Chen Z, Liu B, Guo G M. Adaptive single photon detection under fluctuating background noise[J]. Optics Express, 2020, 28(20): 30199-30209.
- [8] Itzler M A, Ben-Michael R, Hsu C F, et al. Single photon avalanche diodes (SPADs) for 1.5 μm photon counting applications[J]. Journal of Modern Optics, 2007, 54(2/3): 283-304.
- [9] He D Y, Wang S, Chen W, et al. Sine-wave gating InGaAs/InP single photon detector with ultralow afterpulse[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(11): 111104.
- [10] 刘立生, 张合勇, 赵帅, 等. 激光拍频信号光子到达时间间隔特性分析[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0403001.
Liu L S, Zhang H Y, Zhao S, et al. Characteristics analysis of the photons arrival time interval of laser beat signal[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0403001.
- [11] Chen Z, Liu B, Guo G M, et al. Photon counting heterodyne with a single photon avalanche diode[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(17): 931-934.
- [12] Ge W J, Sun J F, Lu W, et al. Photon arrival sequence analysis of laser heterodyne signal with a Geiger-mode APD array[J]. Optics Communications, 2022, 523: 128723.
- [13] Buckman S M, Ius D. Digital coincidence counting[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1996, 369(2/3): 368-374.
- [14] Lu X Y, Li Q, Westly D A, et al. Chip-integrated visible-telecom entangled photon pair source for quantum communication[J]. Nature Physics, 2019, 15(4): 373-381.
- [15] 韦震, 陆荣华, 喻虹, 等. 基于符合计数的极弱光强度关联干涉测量研究[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111013.
Wei Z, Lu R H, Yu H, et al. Research on intensity-correlated interferometry with ultra-weak light based on coincidence counting[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111013.
- [16] 汪琳莉, 吴琛怡, 祁慧宇, 等. 多波束单光子雷达的多通道计时测量[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 0204001.
Wang L L, Wu C Y, Qi H Y, et al. Multi-channel timing measurement for multi-beam single-photon radar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(2): 0204001.
- [17] 王宇雷, 张笑颜, 李召辉. 多通道光子计数符合激光测距系统设计及实现[J]. 光电技术应用, 2022, 37(3): 23-27.
Wang Y L, Zhang X Y, Li Z H. Design and realization of photon-counting laser ranging with multi-channel coincidence[J]. Electro-Optic Technology Application, 2022, 37(3): 23-27.
- [18] Zhang Z D, Saurabh P, Dorfman K E, et al. Monitoring polariton dynamics in the LHCI photosynthetic antenna in a microcavity by two-photon coincidence counting[J]. The Journal of Chemical Physics, 2018, 148(7): 074302.
- [19] 盛娟, 张冰娜, 翟景升, 等. 多通道光子计数激光雷达信息快速提取技术[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(14): 1428001
Sheng J, Zhang B N, Zhai J S, et al. Rapid extraction of information from multi-channel photon counting Lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(14): 1428001.
- [20] 施剑波, 张娟, 刘德安. 光纤四通道双平衡外差相位检测实验研究[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0904005.
Shi J B, Zhang J, Liu D A. Fiber-optic four-channel dual-balanced heterodyne phase detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0904005.
- [21] Arabul E, Paesani S, Tancock S, et al. A precise high count-rate FPGA based multi-channel coincidence counting system for quantum photonics applications[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 7500114.
- [22] 杨杰, 王才喜, 乔凯, 等. 基于时间相关单光子计数技术的测速研究[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(10): 138-145.
Yang J, Wang C X, Qiao K, et al. Research on velocity measurement based on time-correlated single photon counting[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(10): 138-145.
- [23] Hu Y C, Peng X, Li T J, et al. On the Poisson approximation to photon distribution for faint lasers[J]. Physics Letters A, 2007, 367(3): 173-176.
- [24] Zappa F, Tisa S, Tosi A, et al. Principles and features of single-photon avalanche diode arrays[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 140(1): 103-112.
- [25] 曹智祥, 曾美玲, 杨健, 等. 一种改进型单光子雪崩二极管探测概率模型及验证[J]. 光学学报, 2023, 43(10): 1025002.
Cao Z X, Zeng M L, Yang J, et al. An improved detection

- probability model of single photon avalanche diode and its verification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(10): 1025002.
- [26] 靳亚晴, 董瑞芳, 权润爱, 等. 门控下 InGaAs/InP 单光子探测器用于符合测量的时域滤波特性研究[J]. *物理学报*, 2021, 70(7): 074202.
- Jin Y Q, Dong R F, Quan R A, et al. Temporal filtering characteristics of gated InGaAs/InP single-photon detectors for coincidence measurement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(7): 074202.
- [27] 胡意. 光子符合计数和激光锁相技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- Hu Y. Research on the technology of photon coincidence counting and laser phase locking[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [28] 李成强, 王挺峰, 张合勇, 等. 激光光源线宽对外差探测性能的影响[J]. *物理学报*, 2016, 65(8): 084206.
- Li C Q, Wang T F, Zhang H Y, et al. Effect of laser linewidth on the performance of heterodyne detection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(8): 084206.
- [29] 李彬, 雷宏杰, 靳文华, 等. 相干探测系统最佳本振光功率测量方法(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(10): 1004005.
- Li B, Lei H J, Jin W H, et al. Approach for measuring the optimal local optical power of coherent detection system(invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(10): 1004005.
- [30] Xiao L T, Zhao Y T, Huang T, et al. Effect of background noise on the photon statistics of triggered single molecules[J]. *Chinese Physics Letters*, 2004, 21(3): 489-492.
- [31] 刘立生. 光子计数激光外差探测及拍频信号频谱识别[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- Liu L S. Photon counting laser heterodyne detection and spectrum identification of beat signal[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014.

Simulation Construction and Study of Photon Heterodyne Detection System with Two-Channel Coincidence Counting

Pu Mengyao^{1,2,3}, Hu Yihua^{1,2*}, Yang Bo^{3**}, Dong Xiao^{1,2}, Zhang Xinyuan^{1,2}

¹State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, Anhui, China;

²Anhui Provincial Key Laboratory of Electronic Restriction, College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, Anhui, China;

³Unit 95793 of PLA, Guiyang 550000, Guizhou, China

Abstract

Objectives Due to the high sensitivity of the single-photon detector, an ultra-narrow band filter is needed to ensure the normal operation of the detector under the influence of strong background light noise in the daytime. Therefore, the anti-background noise ability of photon heterodyne detection is crucial. In addition, the dark count and post-pulse effect of the single-photon detector will lead to a false count and thus reduce the signal-to-noise ratio (SNR). Therefore, new methods are required to improve the SNR of photon heterodyne detection. In the earlier research on photon heterodyne detection, most scholars focused on signal processing for denoising. They proposed new signal processing methods to denoise echo signals and rarely made an effort to improve the detection system or change the photon counting mode. As current signal processing has limited ability to improve the SNR of photon heterodyne detection, this study applies the coincidence counting mode to photon heterodyne detection. This mode relies on multi-channel detection and filters out random optical noise at the photon counting terminal to improve the SNR.

Methods In this study, a photon heterodyne velocity measurement system with two-channel coincidence counting is constructed by simulation. After frequency beating, light waves of heterodyne signals are evenly divided into two parts and sent into two single-photon detection channels separately. A two-channel coincidence counting mode is adopted at the single-photon detection end, and different coincidence gate widths are set for the system according to different situations. The two-channel coincidence counting system will automatically select the channel 1 as the main channel and the other channel as the slave channel and create a time window (the size of which can be set) centered on the main channel. When both channels have photon counting in this window, an effective coincidence will be generated, and the coincidence counting results within a certain collection time will be given at last. When the signal photon is detected in both channels within the coincidence time, it is judged to be an effective signal. In this way, the arrival time series of the photon can be obtained. Compared with the case of single-channel photon counting, the anti-noise capability of the system is greatly improved, and effective echo signals can be extracted under strong background noise.

The traditional filtering method of photon heterodyne detection is to preliminarily process the photon response sequence to produce the cumulative photon histogram, perform the first-order filtering of the cumulative photon histogram

curve, and process the filtering results as FFT to obtain the spectrum diagram. In this study, the first-order filtering algorithm adopts the moving average filtering method and compares three methods, namely, single-channel free-running mode, post-photon cumulative moving average filtering, and two-channel coincidence counting mode. The simulation results show that the power spectrum SNR of the intermediate frequency (IF) signal in the two-channel coincidence counting mode is significantly higher than that in the single-channel free-running mode and the first-order filtering.

Furthermore, the variation laws of the power spectrum SNR of IF signals with the increase in the number of signal photons are studied under two counting modes. In addition, four factors such as local-oscillator light intensity, background noise, IF, and detection duration that affect the performance of photon heterodyne detection are investigated.

Results and Discussions According to the simulation, the SNR of both the single-channel free-running mode and dual-channel coincidence counting mode gradually increases with the increase in the number of photons. However, as the number continues to grow, the SNR rises slowly and gradually reaches saturation (Fig. 7). When the ratio of local light intensity to signal light intensity is less than 1, the SNR changes most significantly with the increase in the number of signal photons, and when the number grows to 5 Mcps (Mcps represents the counts multiplied by 10^6 per second), the saturation state cannot be reached. When the ratio is equal to 1, the SNR is higher than that when the ratio is less than 1. This is because when the number of photons in the local oscillator is equal to the number of photons in the signal, the total number of photons is higher than the case when the ratio is less than 1, and the proportion of noise photons decreases. Hence, the SNR increases. However, a greater ratio of local light intensity to signal light intensity does not lead to better results. As can be seen from the figure, if the ratio is equal to 5, the SNR of the IF signal is higher than that of 1, but if the ratio is less than 3, it can be inferred that as the ratio of local light intensity to signal light intensity gradually increases, the system's SNR increases before it declines. The peak is reached near the ratio of 3 (Fig. 8). Stronger background noise means a lower SNR. In addition, the photon number of the saturated signal is different under different background noises. Stronger background noise is accompanied by a larger photon number of the saturated signal. When the background noise is 0.5 kcps (kcps represents the counts multiplied by 10^3 per second), the number of signal photons gradually becomes saturated at about 3 Mcps, but when the background noise is 2 kcps, the number of signal photons is close to saturation at 5 Mcps. Under different background noises, the saturation SNR achieved is also inconsistent: stronger background noise indicates a lower saturation SNR (Fig. 9). IF has a steeper change in the early fitting curve of the influence of SNR and reaches a peak when the number of signal photons is 3 MHz. As the number continues to increase, the SNR of IF slightly declines and gradually becomes stable. Although the span of IF is from 0.5 to 7 MHz, the four curves are concentrated, and it is difficult to separate them or even have crossover parts in some line segments. Therefore, the IF signal frequency, that is, the speed of the moving target, has little influence on the SNR of the system (Fig. 10). As the detection duration becomes longer, the SNR increases significantly. When the detection duration increases from 0.05 to 0.10 ms, the saturation SNR increases by about 3 dB, while when it increases from 0.15 to 0.20 ms, the saturation SNR only increases by about 1 dB. The time parameters such as the dead time and coincidence window of single-photon detection are generally of the order of ns. Thus, although the detection duration only increases by 0.05 ms each time, it has already exceeded four orders of magnitude. Therefore, longer detection duration means more photons detected and more significant cumulative effects of the photon-density distribution law, and a greater contribution of IF signal distribution to the total number of photons indicates a higher SNR (Fig. 11).

Conclusion The results show that the proposed method has significant advantages over single-channel detection. In coincidence counting, part of the background noise and dark count noise can be filtered out to improve the SNR. This study provides a new idea for the application of coincidence counting and also renders guidance for the construction of a photon heterodyne detection system with two-channel coincidence counting in subsequent experiments.

Key words detector; photon heterodyne; single-photon detection; coincidence counting; speed measurement performance; influence factors