

引用格式: LIU Dongxu, YU Xiaonan, TONG Shoufeng, et al. Key Technologies of Laser Communication Based on Single Photon Detection and Pulse Position Modulation[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(3):0306002

刘东旭,于笑楠,佟首峰,等.基于单光子探测及脉冲位置调制的激光通信关键技术研究[J].光子学报,2021,50(3):0306002

基于单光子探测及脉冲位置调制的激光通信 关键技术研究

刘东旭^{1,2},于笑楠²,佟首峰²,王潼²

(1 长春理工大学 光电工程学院,长春 130022)

(2 长春理工大学 空间光电技术国家地方联合工程研究中心,长春 130022)

摘 要:为了实现高灵敏度的空间激光通信,并提高传输信道的抗干扰能力,将单光子探测技术和脉冲位置调制技术相结合,采用门控电路与反馈淬灭电路相结合的方式淬灭单光子探测器雪崩,设计了插入帧头法用于脉冲位置调制解调。用现场可编程门阵列进行了脉冲位置调制解调过程的仿真,验证了插入帧头法的有效性与可行性。在此基础上搭建了 1 550 nm 的脉冲位置调制激光通信实验,同时测试了单光子探测器在不同参数下的性能。结果表明,当探测效率为 25%,触发延时为 8.00 ns,门宽为 5.0 ns,死时间为 0.1 μ s 时,单光子探测器性能最佳。最后测试了不同调制速率下单光子探测器的探测灵敏度,结果表明,当通信码速率为 1 Mbps 时,通信灵敏度为 -51.8 dBm;当通信码速率为 4 Mbps 时,通信灵敏度为 -41.0 dBm,实现了高灵敏度的空间激光通信。

关键词:激光通信;单光子探测;脉冲位置调制;高灵敏度

中图分类号:TN929.12

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215003.0306002

Key Technologies of Laser Communication Based on Single Photon Detection and Pulse Position Modulation

LIU Dongxu^{1,2}, YU Xiaonan², TONG Shoufeng², WANG Tong²

(1 School of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022, China)

(2 NUERC of Space and Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022, China)

Abstract: In order to achieve high sensitivity space laser communication and improve the anti-interference ability of the transmission channel, this article combines single photon detection technology and pulse position modulation technology, the single photon detector avalanche is quenched by the combination of the gated circuit and the feedback quenching circuit. The insert frame header method was designed to modulate and demodulate the pulse position. The pulse position modulation and demodulation process was simulated by field programmable gate array, which verified the effectiveness and feasibility of the insert frame header method. On this basis, a 1 550 nm pulse position modulation laser communication experiment was built, and the performance of the single photon detector under different parameter was tested at the same time.

基金项目:水声对抗技术国防科技重点实验室基金项目(No.JZX7Y201911XXXX01),水声技术国防科技重点实验室稳定支持基金项目(No.JCKYS2020604SSJS012)

第一作者:刘东旭(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为激光通信及信号处理等。Email:2091503062@qq.com

导师(通讯作者):佟首峰(1972—),男,教授,博士,主要研究方向为空间光学遥感及自由空间光通信等。Email:tsf1998@sina.com

收稿日期:2020-11-03;**录用日期:**2020-12-15

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

The results show that the single photon detector has the best performance when the detection efficiency is 25%, the trigger delay is 8.00 ns, the gate width is 5.0 ns and the death time is 0.1 μ s. Finally, the detection sensitivity of single photon detectors with different modulation rates was tested. The results show that the communication sensitivity is -51.8 dBm when the communication code rate is 1 Mbps; the communication sensitivity is -41.0 dBm when the communication code rate is 4 Mbps, which realizes high sensitivity space laser communication.

Key words: Laser communication; Single photon detection; Pulse position modulation; High sensitivity

OCIS Codes: 060.4510; 040.1345; 250.4110

0 引言

随着大气激光通信等新兴光通信技术的飞速发展,对通信灵敏度,通信距离等提出了更高的要求,单光子探测器在信号强度仅为几个光子量级的条件下仍能精确计数,因其具有很高的灵敏度而被广泛使用,脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)因其具有更高的光功率利用率和频带利用率,并能提高传输信道的抗干扰能力,增加通信距离等诸多优点,有着广泛的应用前景。

目前对单光子探测器有众多的研究进展,1985年,贝尔实验室^[1]首次实现了InGaAs/InP雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)的单光子探测器。1995年,LACAITA A^[2]等对InGaAs/InP APD的单光子计数性能进行了更深入的研究。此后,InGaAs/InP APD受到了广泛关注^[3-4]。2006年,英国赫瑞瓦特大学^[5],成功开发出InGaAs/InP单光子雪崩二极管(Single Photon Avalanche Diode, SPAD),可在1 550 nm波长处进行有效的探测。2012年,美国弗吉尼亚CAMPBELL J C团队^[6]研制出了高探测效率的正弦门控InGaAs/InP单光子探测器。2019年,中国科学院上海技术物理研究所^[7],研究了盖革雪崩光电二极管(Geiger Avalanche Photo Diode, Gm-APD)的单光子探测电路,实现对微弱紫外光信号的探测;2020年,PROCHAZKA I等^[8]研究了基于InGaAs/InP雪崩结构的光子计数检测器套件,用于激光测距。国内外对PPM调制也有许多的研究进展。2011年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)^[10]将PPM调制用于月球激光通信演示(Lunar Laser Communication Demonstration, LLCD),对地月高速激光通信的可行性进行了验证。2017年,ESMAN D J等^[11]将PPM调制用于射频(Radio Frequency, RF)域,以实现低耗散要求并提供精确的测距。2018年,中科院长春光机所^[12]对大气激光通信PPM调制解调系统进行了研究设计。2019年,GURSOY M C等^[13]将PPM调制用于分子通信。同年,YOUSIF B B等^[14]将PPM调制用于无线通信系统。2020年,HE Y F等^[15]采用PPM调制技术来实现预示单光子源中信号状态的编码。

单光子探测技术的核心是对光子信号进行精确计数,并能抑制雪崩。目前常用的抑制方法主要包括被动抑制,主动抑制和门控抑制。常用的PPM调制解调方法主要为帧同步与位同步,实现方式较少,应用缺乏灵活性。因此本文设计了一种新的PPM调制解调方法,并结合两种技术实现高灵敏度PPM激光通信,为PPM激光通信系统搭建提供一个新的思路。

1 基本原理

1.1 单光子探测器工作原理

当光子入射到单光子探测器Gm-APD时,工作在盖革模式下的APD将会发生雪崩,长时间的雪崩会损坏APD,故需抑制雪崩以保护APD,雪崩抑制技术核心思想是将APD的反偏电压降至雪崩电压以下,使其失去单光子探测能力。门控抑制可以对光子进行精确计数并能快速抑制雪崩,同时最大程度的减小暗计数和后脉冲,但门控抑制只适合已知光子到达时间的单光子探测,如图1所示为本实验InGaAs/InP Gm-APD部分原理框图。

首先,工作前先将APD冷却至 -40°C ,以尽可能减少热噪声引起的暗计数,冷却后使APD工作在外门控模式,同步外部触发信号作为门控开关,通过调节触发延时使光子到达时间与门开启时间同步。光子到达时门开启,引发Gm-APD发生雪崩,雪崩电流上升沿可被快速捕获,计数器进行精确的计数。雪崩淬灭电路由门控电路和反馈淬灭电路共同组成,首先当门关闭时可快速淬灭雪崩,另外,在捕获到雪崩电流的上

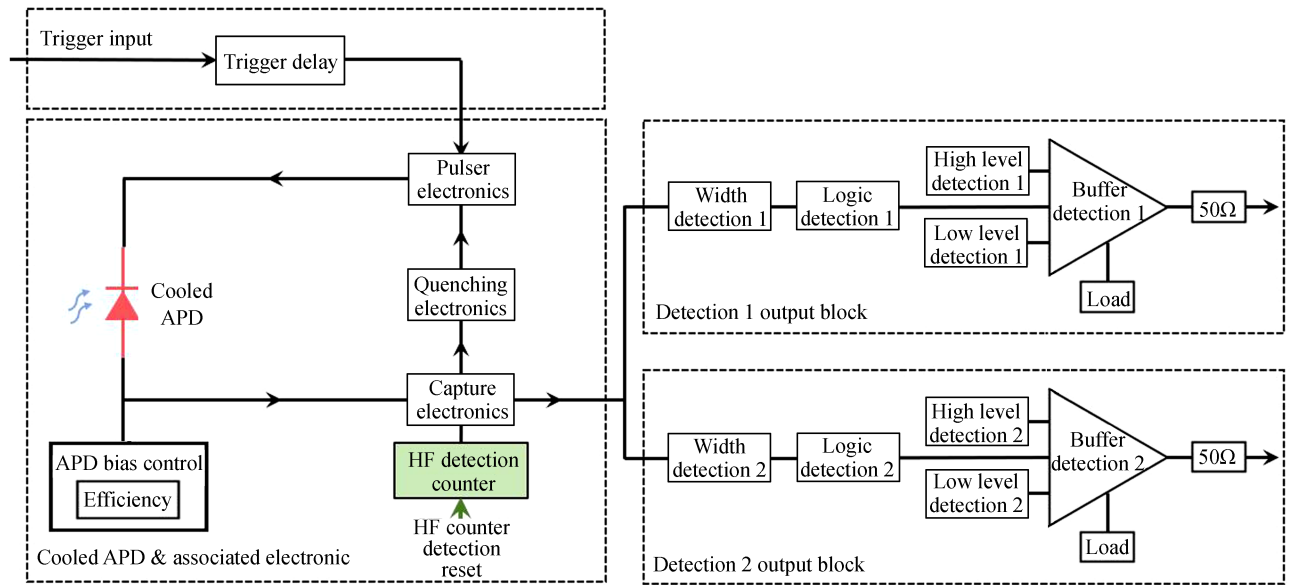


图1 InGaAs/InP Gm-APD 部分原理框图
Fig. 1 Block diagram of InGaAs/InP Gm-APD part

升沿后也会触发淬灭电路使 APD 的反偏电压迅速降至雪崩电压以下,快速淬灭雪崩,对 APD 进行双重保护,雪崩淬灭后门控电路继续工作准备进行下一次光子的探测。最后,Gm-APD 在雪崩的同时输出两路电脉冲信号,脉冲信号的电平高低,脉宽大小可进行一定调节。该 InGaAs/InP Gm-APD 系统在门控和反馈淬灭电路共同作用下,既可以快速淬灭雪崩保护 APD,增加 APD 的平均使用寿命,又可以减小单光子探测器的暗计数,可以很好地用于单光子探测及 PPM 激光通信系统中。如图 2 所示为 APD 单光子探测的工作时序图。

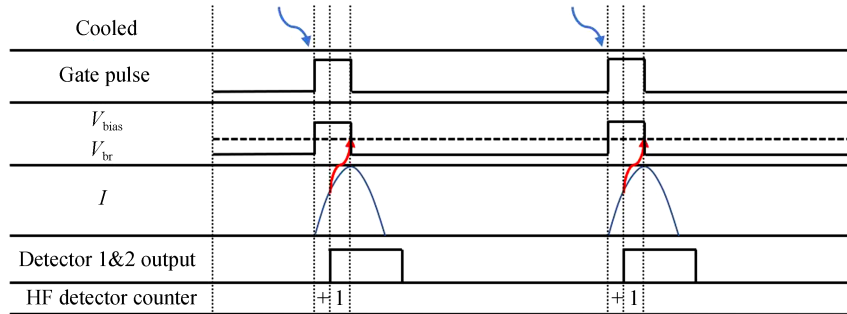


图2 APD 单光子探测时序图
Fig. 2 APD single photon detection timing diagram

1.2 单光子探测原理

通过 Gm-APD 门控操作测量强度可以得出信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)的表达式^[9],表达式的最终形式取决于光子探测效率(Photon Detection Efficiency, PDE),后脉冲概率,门数等,假设没有其他噪声源,忽略后脉冲,将一个或多个光子到达门内的情况记录为 1,没有光子到达记为 0,光子到达门内的概率服从泊松分布,则

$$\frac{n_{1's}}{n_{gates}} = P(n \geq 1) = 1 - P(n = 0) = 1 - \frac{e^{-\lambda} \lambda^0}{0!} = 1 - e^{-\lambda} \quad (1)$$

式中, $\frac{n_{1's}}{n_{gates}}$ 为 1 数与门数之比, n 代表每个门的载流子总数, $\lambda = \lambda_p + \lambda_d$ 为每个门的平均载流子总数, λ_p 为每个门的光生载流子数, λ_d 为每个门产生的暗电流载流子数。则 λ_d 估计为

$$\lambda_p = -\ln\left(1 - \frac{n_{1's}}{n_{gates}}\right) - \lambda_d \quad (2)$$

在黑暗条件下进行测量估计, PDE 小于 1 的曝光上入射到像素上的光子总数估计为

$$E_{PD} \cdot \hat{\lambda}_{tot} = \left[-\ln\left(1 - \frac{n_{1's}}{n_{gates}}\right) - \lambda_d \right] \cdot n_{gates} \quad (3)$$

使 $n_{1's}/n_{gates} = x$ 和 $E_{PD} \cdot \hat{\lambda}_{tot} = y$, x 的方差是基于门数量 n_{gates} 的二项式分布的方差, 以及在门内发生雪崩的可能性, $P(\text{gate} = 1) = p$ 。 x 只是 p 的估计, 因此它们的表示方式有所不同。定义估计的方差(它是 x 的函数)为

$$\sigma_x^2 = \frac{n_{gates} \cdot p(1-p)}{n_{gates}^2} = \frac{p(1-p)}{n_{gates}} \quad (4)$$

首先, 根据 x 或 $f(x)$ 的概率密度函数定义 $y(x)$ 的期望值, 表示为

$$E[y(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} y(x) f(x) dx \quad (5)$$

如果 $f(x)$ 集中在平均值上, 则假定 $f(x)$ 在范围 $(\mu - \epsilon, \mu + \epsilon)$ 之外可以忽略不计, 其中 μ 是 $f(x)$ 的平均值, 而 ϵ 是边界变量, 并且 $y(x)$ 成为 $y(\mu)$

$$E[y(x)] = y(\mu) \int_{(\mu-\epsilon)}^{(\mu+\epsilon)} f(x) dx = y(\mu) \quad (6)$$

可以通过多项式展开来改进此估计

$$y(x) = y(\mu) + y'(\mu)(x - \mu) + \dots + y^n(\mu) \frac{(x - \mu)^n}{n!} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)并忽略高阶项

$$E[y(x)] = y(\mu) + y''(\mu) \frac{(x - \mu)^2}{2} = y(\mu) + y''(\mu) \frac{\sigma_x^2}{2} \quad (8)$$

求 y 的方差

$$E[y^2(x)] = y^2(\mu_x) + \sigma_x^2 \left[\left| y'(\mu_x) \right|^2 + y(\mu_x) y''(\mu_x) \right] \quad (9)$$

μ_x 是观测到的雪崩概率分布 $P(\text{gate} = 1) = p$ 的平均值。曝光的总方差为

$$\lambda_{tot}^2 = \left| y'(\mu_x) \right|^2 \sigma_x^2 n_{gates}^2 = \frac{p}{1-p} n_{gates} \quad (10)$$

因此, 结合 PDE, 得门控 Gm-APD 进行无后脉冲强度测量的 SNR 为

$$R_{SN} = \frac{E_{PD} \cdot \lambda_p \cdot n_{gates}}{\sqrt{\frac{p}{1-p} \cdot n_{gates}}} \quad (11)$$

式中, $p = 1 - e^{-(E_{PD} \cdot \lambda_p + \lambda_d)}$, 为光子到达门内记录为 1 的概率, E_{PD} 为光子探测效率, λ_p 为每个门的光生载流子数, λ_d 为每个门产生的暗电流载流子数, $q = 1 - p$ 为记录为 0 的概率, n_{gates} 为门数 ($R_{SN} \propto \sqrt{n_{gates}}$)。

1.3 PPM 调制解调

设信道为理想信道, 在激光通信系统中, 误时隙率被定义为^[16]

$$p_{se} = p_0 p_{1/0} + p_1 p_{0/1} \quad (12)$$

式中, p_0 和 p_1 分别为发送 0 和 1 的概率, $p_{1/0}$ 为 0 被检测成 1 的概率, $p_{0/1}$ 为 1 被检测成 0 的概率。则 $p_{1/0}$ 和 $p_{0/1}$ 分别被定义为

$$p_{1/0} = \int_c^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) dy = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{c}{\sqrt{2} \sigma}\right) \quad (13)$$

$$p_{0/1} = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{c - \sqrt{\epsilon_t}}{\sqrt{2} \sigma} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\epsilon_t} - c}{\sqrt{2} \sigma} \right) \quad (14)$$

在 PPM 通信系统中, $p_0 = (2^k - 1)/2^k$, $p_1 = 1/2^k$, 通过推导取最佳判决门限 $c = [2\sigma^2 \ln(2^k - 1) + \epsilon_t]/2\sqrt{\epsilon_t}$ 可得误时隙率为

$$p_{se} = \frac{2^k - 1}{2^{k+1}} \operatorname{erfc} \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\sigma^2}{\epsilon_t}} \ln(2^k - 1) + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_t}{2\sigma^2}} \right] + \frac{1}{2^{k+1}} \operatorname{erfc} \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_t}{2\sigma^2}} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\sigma^2}{\epsilon_t}} \ln(2^k - 1) \right] \quad (15)$$

式中, $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-\eta^2} d\eta$ 为互补误差函数, k 为 PPM 调制位数。

此处取信噪比为 $\text{SNR} = \epsilon_t/2\sigma^2$, 则当信噪比一定时, PPM 调制的误时隙率会随着 k 的增加而减小如图 3 所示。因此本实验取 k 为 4。

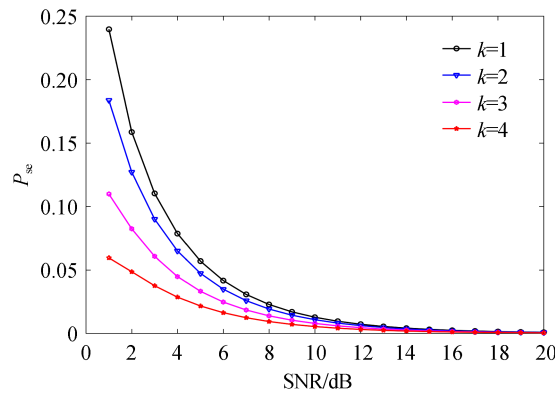


图 3 不同 k 值下误时隙率与信噪比仿真关系

Fig.3 The simulation relationship curve of time slot error rate and signal-to-noise ratio under different k values

PPM 调制中单脉冲位置调制,是在固定长度时隙下根据单个脉冲所在时隙位置的不同传输不同的信息,则 L 时隙的 PPM 调制信号传输的信息比特为 $\log_2 L$ 。以 16-PPM 调制为例,每次调制传输 4 比特信息,若时隙个数为 20,由 16 个数据时隙和 4 个保护时隙组成。PPM 调制流程图如图 4 所示。

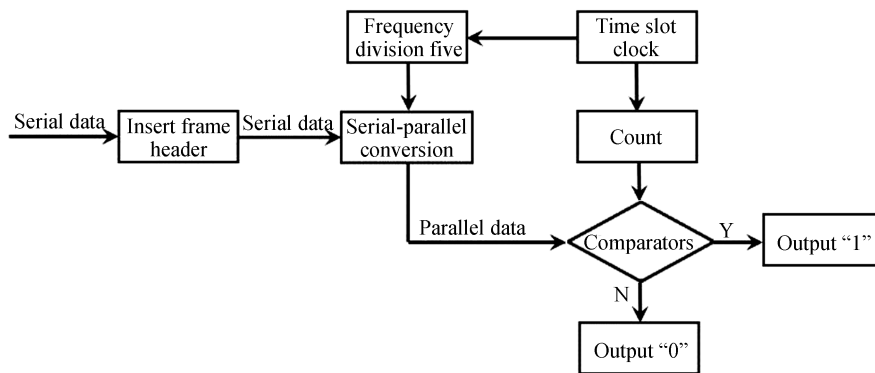


图 4 PPM 调制流程图

Fig.4 PPM modulation flow chart

首先在原二进制数据前插入 8 位特殊数据“11110000”作为帧头,再通过计数将每 4 位串行数据进行串并转换,转换后的 4 位并行数据需与 16 进制计数器值进行比较从而确定脉冲在这一帧中的时隙位置,当并行数据与计数器的输出值相等时,就输出高电平“1”,否则输出低电平“0”,保护时隙默认为输出低电平“0”,这样就产生了所需的 PPM 调制信号如图 5 所示。

PPM 解调过程为调制的逆过程,解调流程图如图 6 所示。

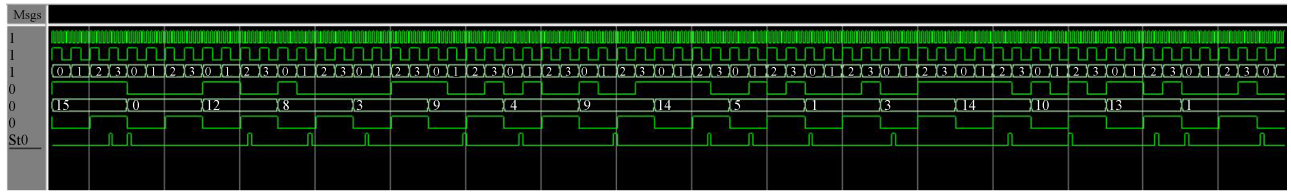


图5 PPM调制仿真图
Fig.5 PPM modulation simulation diagram

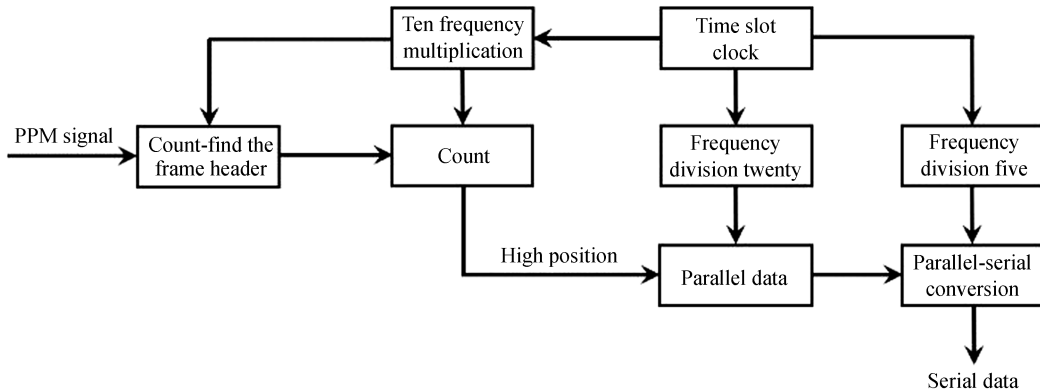


图6 PPM解调流程图
Fig.6 PPM demodulation flowchart

单光子探测器的输出为PPM电脉冲信号,可发现每个PPM帧仍有20个时隙,由16个数据时隙和4个保护时隙组成,其中每帧有且只有一个时隙是高电平,代表着数据信息,其余的都是低电平。若出现2个高电平之间仅有4个时隙时,说明两帧之间只有保护时隙,且两个高电平分别对应数据“1111”和“0000”,说明已找到特殊数据,从此刻开始为起点继续解调,以时隙时钟上升沿开始计数,每20个时隙为一帧,查询20个时隙中高电平相对数据时隙所在位置,转换为并行数据,再经过并串转换单元,解调出原二进制数据,PPM解调仿真图如图7所示。原数据code与解调后的数据decode仅存在相位的不同。

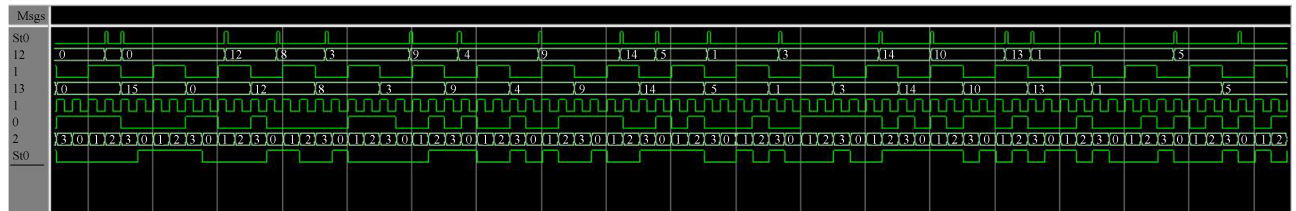


图7 PPM解调仿真图
Fig.7 PPM demodulation simulation diagram

2 实验系统搭建

通信系统总体框图如图8所示,首先由现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)将串行数据进行串并转换后输出一个PPM调制信号,将该调制信号加载到单光子发生器使其发出超短脉冲激光,脉冲激光经光衰减器后接单光子探测器Gm-APD;同时FPGA输出一路PPM同步信号至单光子探测器,最后将Gm-APD输出的电脉冲信号接入FPGA中进行PPM解调,并将解调后的串行数据与本地数据进行比对,将误码数与总计数通过可变静态存储控制器(Flexible Static Memory Controller, FSMC)传至单片机中计算误码率,并将误码率结果返回上位机LabVIEW中实时观测。

现场可编程门阵列(FPGA)采用iCore3,核心为Altera Cyclone系列第四代产品EP4CE10F17C8N,具有功耗低、性能强、资源多、使用方便等优点;单光子发生器ID300,可以输出脉宽0.3 ns,峰值功率1 mW,波长1 550 nm的短脉冲激光;可变光衰减器FVA-3150,具有稳定时间短,衰减设置分辨率达±0.002 dB,可编

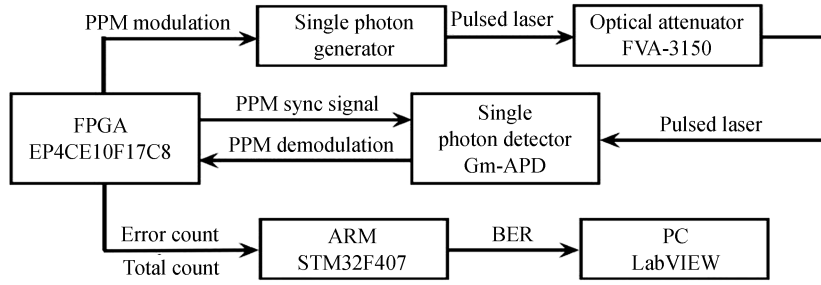


图8 通信系统总体框图

Fig.8 Overall block diagram of the communication system

程等优势;单光子探测器为InGaAs/InP Gm-APD,可对1 550 nm单光子进行有效的探测。通信系统实物图如图9所示。



图9 通信系统实物图

Fig.9 Physical map of the communication system

3 结果与讨论

3.1 单光子探测器最佳参数选取

将单光子探测器的探测效率调至25%,PPM调制速率为0.5 Mbps,死时间调至最小,门宽调大,不断衰减光功率并粗调触发延时使误码率刚好为0。此时,使入射光功率保持不变,在其他参数不变条件下,先调节触发延时为一个很小的数值,再不断增加触发延时并实时记录误码率变化,改变PPM的调制速率为1 Mbps、2 Mbps、4 Mbps重复上述实验过程。实验发现,仅当触发延时为7.15~8.90 ns时误码率可视为0,此时门控信号与PPM脉冲激光信号保持同步,随着触发延时的调小或调大,误码率逐渐降低,在6.95 ns和9.10 ns时误码率降为 10^{-6} 。本次实验选择触发延时为8.00 ns。如图10所示,为在上述实验下的PPM同步触发延时与误码率关系曲线。

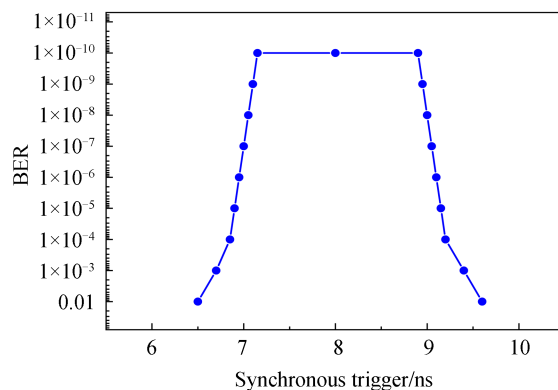


图10 PPM同步触发延时时间与误码率关系曲线

Fig.10 The relationship between PPM synchronization trigger delay time and bit error rate

在上述实验的基础上,仍先将PPM调制速率设置为0.5 Mbps,探测效率调至25%,将死时间调至最小,此时最佳触发延时已经确定为8.00 ns,误码率一定为0,再次衰减光功率并粗调门宽至误码率刚好为0。此时,使入射光功率保持不变,在其他参数不变条件下,先调节门宽为一个很小的数值,再不断增加门宽并实时记录误码率变化,改变PPM的调制速率为1 Mbps、2 Mbps、4 Mbps重复上述实验过程。实验发现,随着门宽的不断增大,误码率逐渐降低,门宽为4.0 ns时误码率达到 10^{-6} ,在4.2~5.7 ns时误码率可视为0,此时脉冲激光刚好到达门内且无其他噪声干扰。超过5.7 ns后由于门宽过大,Gm-APD始终处于盖革模式,噪声等导致暗计数增加,误码率开始降低,最终稳定在 10^{-6} 。

单光子探测器由于门控电路和淬灭电路共同作用,既可以很好地淬灭雪崩,减小暗计数,又对单光子探测器起到了双重保护作用,因此当门宽过大门开启时间较长时,淬灭电路在捕获到雪崩电流的上升沿后触发脉冲电路淬灭雪崩,最终可使误码率基本稳定在 10^{-6} 。但门控抑制才是淬灭雪崩,抑制暗计数最好的方法,因此本次实验选择最佳门宽为5.0 ns。图11所示为上述实验下的门宽与误码率关系曲线。

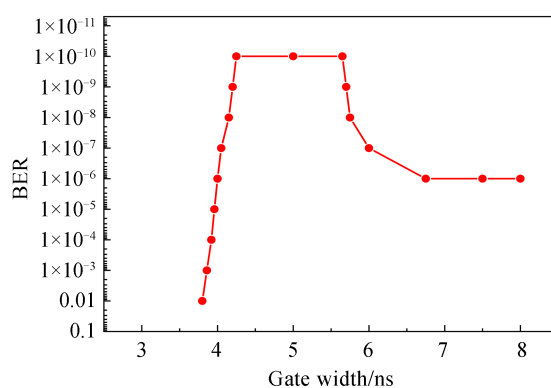


图11 门宽与误码率关系曲线

Fig.11 Relation curve of gate width and bit error rate

经上实验后,已确定最佳触发延时为8.00 ns,最佳门宽为5.0 ns,误码率一定为0,再次衰减光功率至误码率刚好为0。此时,使入射光功率保持不变,在其他参数不变条件下,增加死时间大小并实时观测误码率变化,改变PPM的调制速率为1 Mbps、2 Mbps、4 Mbps重复上述实验过程。实验发现,当死时间超过PPM帧周期时,出现误码,随着死时间不断增加,误码率增加。因此,本实验死时间设置不可超过帧周期。如图12所示,为在入射光功率保持不变,探测效率为25%,触发延时为8.00 ns,门宽为5.0 ns,其他参数不变条件下,死时间与误码率关系曲线。

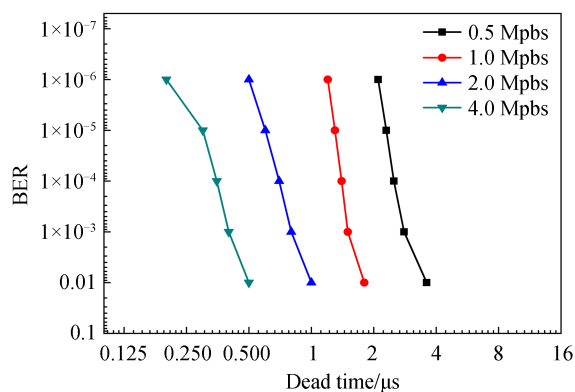


图12 死时间与误码率关系曲线

Fig.12 Dead time and bit error rate relationship curve

3.2 通信灵敏度

光接收机的灵敏度通常定义为保证一定误码率所需的光接收机最小输入光功率。光接收灵敏度、光发

射机发射光功率与光纤光缆等传输衰减,共同决定了通信系统的中继长度。因此,对于一个通信系统,光接收机接收灵敏度的测试是一项重要的工作。本通信系统的灵敏度定义为误码率达到 10^{-6} 时的光接收机最小输入光功率。

如图13所示为在探测效率为25%,触发延时为8.00 ns,门宽为5.0 ns,死时间 $0.1 \mu\text{s}$ 下,不同码速率下接收光功率与误码率关系曲线。在相同码速率下,随着接收光功率的不断增大,误码率逐渐降低,当码速率为4 Mbps,光功率达到 -41 dBm 时,误码率达到 10^{-6} ;当光功率达到 -39.5 dBm 时,误码率为0;随着PPM调制速率成倍增加,想要达到相同误码率则需要更大的接收光功率,理论上光功率相差3 dBm,实验过程中由于其他噪声等因素的影响,所需光功率的数值范围为 $3 \pm 0.5 \text{ dBm}$ 。

如图14所示,为在触发延时为8.00 ns,门宽为5.0 ns,死时间为 $0.1 \mu\text{s}$ 下,PPM调制速率与灵敏度关系曲线。在相同探测效率下,随着PPM调制速率的增加,探测灵敏度降低;在相同PPM调制速率下,随着探测效率的增加,探测灵敏度增加,增加逐步变缓;在探测效率为25%,在PPM调制速率为1 Mbps时,Gm-APD探测灵敏度可达 -51.8 dBm ;在PPM调制速率为4 Mbps时,Gm-APD探测灵敏度可达 -41.0 dBm 。

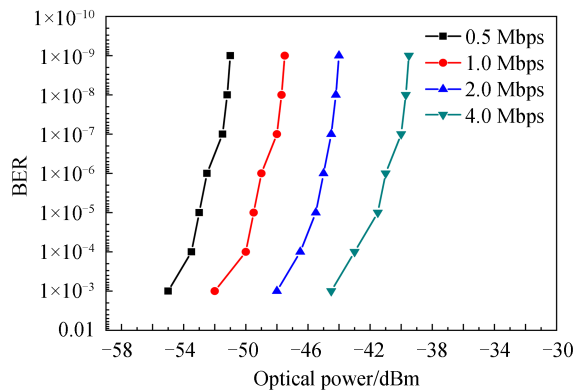


图13 不同码速率下接收光功率与误码率关系曲线

Fig.13 The relationship between received optical power and bit error rate under different code rates

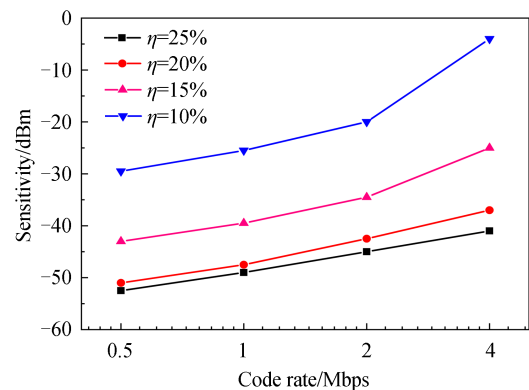


图14 不同探测效率下调制速率与灵敏度关系曲线

Fig.14 The relationship between modulation rate and sensitivity under different detection efficiency

由此可以看出该PPM激光通信系统具有非常高的灵敏度,在相同条件下与开关键控调制(On-Off Keying, OOK)相比,该通信系统理论上可以传输更远的距离且有更强的抗干扰性。

4 结论

从PPM仿真图可知原码code与解调码decode只存在相位的延迟,结果表明了新的PPM调制解调方法用于实际通信系统中是可行的。在探测效率25%,触发延时8.00 ns,门宽5.0 ns,死时间 $0.1 \mu\text{s}$,其他条件一定时,Gm-APD可以对到来的光子进行精确的计数,此参数下单光子探测器性能最佳,同时验证了门控结合反馈电路抑制雪崩方法的可行性。在上述基础上,得出PPM调制速率为1 Mbps和4 Mbps时,Gm-APD通信灵敏度分别可以达到 -51.8 dBm 和 -41.0 dBm ,实现了高灵敏度PPM激光通信的目的。本文主要在实验室环境下得出该通信系统所能达到的理论通信灵敏度,下一步可以做更多时隙PPM激光通信实验、外场实验等来进一步验证上述结论。

参考文献

- [1] LEVINE B F, BETHEA C G, CAMPBELL J C. Room-temperature 1.3- μm optical time domain reflectometer using a photon counting InGaAs/InP avalanche detector[J]. Applied Physics Letters, 1985, 46(4): 333-335.
- [2] LACAITA A, ZAPPA F, COVA S, et al. Single-photon detection beyond 1 μm : performance of commercially available germanium photodiodes[J]. Applied Optics, 1996, 35(16): 2986-2996.
- [3] ZHANG J, THEW R, GAUTIER J D, et al. Comprehensive characterization of InGaAs-InP avalanche photodiodes at 1550 nm with an active quenching ASIC[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 45(7): 792-799.
- [4] COMANDAR L C, FROHLICH B, DYNES J F, et al. Gigahertz-gated InGaAs/InP single-photon detector with detection efficiency exceeding 55% at 1550 nm[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(8): 083109.

- [5] PELLEGRINI S, WARBURTON R E, LIONEL J J, et al. Design and performance of an InGaAs-InP single-photon avalanche diode detector[J]. *Quantum Electron*, 2006, 42(4): 397-403.
- [6] CAMPBELL J C, SUN W, LU Z, et al. Common-mode cancellation in sinusoidal gating with balanced InGaAs/InP single photon avalanche diodes[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(12): 1505-1511.
- [7] ZHANG Huiying. Research on ultraviolet communication system based on geiger mode APD [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
张惠鹰. 基于盖革模式雪崩光电二极管的紫外光通信系统研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2019.
- [8] PROCHAZKA I, BIMBOVA R, KODET J, et al. Photon counting detector package based on InGaAs/InP avalanche structure for laser ranging applications[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(5): 056102.
- [9] KIMBERLY K. Signal-to-noise ratio of Geiger-mode avalanche photodiode single-photon counting detectors[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(8): 081904.
- [10] ROBINSON B S, BOROSON D M, BURIANEK D A, et al. The lunar laser communications demonstration [C]. *IEEE*, 2011, 7923: 54-57.
- [11] ESMAN D J, ATAIE V, KUO B P, et al. Frequency-hopping pulse position modulation ultrawideband receiver[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(10): 1894-1899.
- [12] TU Yanyang. Research and design of atmospheric laser communication with pulse position modulation [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2018.
涂焱阳. 大气激光通信 PPM 调制解调系统研究与设计[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- [13] GURSOY M C, BASAR E, PUSANE A E, et al. Pulse position-based spatial modulation for molecular communications [J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(4): 596-599.
- [14] YOUSIF B B, ELSAYED E E, ALZALABANI M M. Atmospheric turbulence mitigation using spatial mode multiplexing and modified pulse position modulation in hybrid RF/FSO orbital-angular-momentum multiplexed based on MIMO wireless communications system[J]. *Optics Communications*, 2019, 43(6): 197-208.
- [15] HE Y F, MA W P. The decoy-state measurement-device-independent quantum key distribution with heralded single-photon source[J]. *International Journal of Theoretical Physics*, 2020, 59(3): 908-917.
- [16] YIN Binglin, WANG Fuchang. PPM optical communication related digital phase locked loop time slot synchronizer[J]. *Optical Communication Technology*, 1998, 22, 3: 211-215.
尹冰琳, 王福昌. PPM 光通信相关式数字锁相环时隙同步器[J]. *光通信技术*, 1998, 022, 003: 211-215.