

宽带可重构单光子激光通信收发关键技术研究

高子怡 盛亚培 董娇 林鹏 徐立 于笑楠 董科研

Research on key technologies of broadband reconfigurable single-photon laser communication transceivers

GAO Zi-yi, SHENG Ya-pei, DONG Jiao, LIN Peng, XU Li, YU Xiao-nan, DONG Ke-yan

引用本文:

高子怡, 盛亚培, 董娇, 林鹏, 徐立, 于笑楠, 董科研. 宽带可重构单光子激光通信收发关键技术研究[J]. *中国光学*, 2026, 19(3): 1-14. doi: 10.37188/CO.2025-0145

GAO Zi-yi, SHENG Ya-pei, DONG Jiao, LIN Peng, XU Li, YU Xiao-nan, DONG Ke-yan. Research on key technologies of broadband reconfigurable single-photon laser communication transceivers[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(3): 1-14. doi: 10.37188/CO.2025-0145

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0145>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单波长激光通信终端的隔离度

Isolation of single wavelength laser communication terminals

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1137 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0253>

空间激光通信组网技术与应用研究进展

Research progress of space laser communication networking technology

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 429 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0140>

微型头戴式单光子荧光显微成像技术研究进展

Research progress of miniature head-mounted single photon fluorescence microscopic imaging technique

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1010 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0007>

太极计划星间激光通信测距的伪随机码选取

Pseudo-random code selection for inter-satellite laser ranging and data communication in the Taiji program

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 547 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0033>

距离选通成像系统中短脉冲激光驱动技术研究

Short pulse laser drive technology in a distance-selective imaging system

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 567 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0142>

重复频率可调窄脉宽228 nm紫外激光器

An ultraviolet laser at 228 nm with adjustable repetition rate and narrow pulse width

中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 100 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0058>

文章编号 2097-1842(2026)03-0001-14

宽带可重构单光子激光通信收发关键技术研究

高子怡, 盛亚培, 董 娇, 林 鹏, 徐 立, 于笑楠, 董科研*
(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘要:单光子探测器灵敏度高、抗干扰能力强,常与传统PPM调制技术相结合进行远距离激光通信,但通信速率较低。针对PPM调制速率受限问题,提出一种基于单光子探测器的宽带可重构脉冲采样数据传输方案,并基于该调制方式设计了一套自适应脉宽算法,实现对单光子探测器数据的最优脉宽选取。发射端使用FPGA GTX高速收发器与实时串口收发改进了发射码型,接收端设计了误码率(BER)监测与自适应算法模块。对信道实际场景中的影响进行了链路仿真与自适应仿真,并搭建了1550 nm的单光子探测器实验系统进行验证。实验结果表明,该调制方式可以实现Kbps-Mbps速率的单光子激光通信,并基于雪崩光电二极管(APD)初步验证了Gbps量级速率通信的可行性。在Kbps、Mbps速率量级下,相比于默认脉宽,采用自适应脉宽调制算法使通信误码率分别降低了1、2个数量级。相较于传统单光子激光通信系统,该调制方式可以实现Kbps-Gbps宽速域调节和Kbps-Mbps速率下最优脉宽选取,为不同技术路线的单光子探测设备提供了一种新的解决方法。

关键词:激光通信;FPGA;GTX;单光子探测器;脉宽自适应;宽带可重构;脉冲采样

中图分类号:TN929.1 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2025-0145 CSTR:32171.14.CO.2025-0145

Research on key technologies of broadband reconfigurable single-photon laser communication transceivers

GAO Zi-yi, SHENG Ya-pei, DONG Jiao, LIN Peng, XU Li, YU Xiao-nan, DONG Ke-yan*
(College of Optoelectronics Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: dongkeyan@cust.edu.cn

Abstract: Single-photon detectors (SPDs) exhibit high sensitivity and strong anti-interference capability, and are often integrated with the traditional pulse position modulation (PPM) technique for long-distance laser communication. However, this integration suffers from low communication rates. To address the rate performance limitations of PPM modulation, a broadband reconfigurable pulse sampling data transmission scheme based on single-photon detectors is proposed. In addition, an adaptive pulse-width algorithm tailored to this modulation method is designed to achieve optimal pulse-width selection for the data acquired by single-photon detectors. At the transmitter, the FPGA GTX high-speed transceiver and real-time serial port transceiving are adopted to optimize the transmitted code pattern; at the receiver, a bit error rate (BER) mon-

收稿日期:2025-11-17; 修订日期:xxxx-xx-xx

基金项目:国家重点研发计划(No. 2021YFA0718804); 吉林省科技发展计划项目(No. YDZJ202401608ZYTS)

Supported by the National Key Research and Development Program (No. 2021YFA0718804); Science and Technology Development Project of Jilin Province, China (No. YDZJ202401608ZYTS)

itoring and adaptive algorithm module is developed. Link simulations and adaptive simulations are conducted to evaluate the impacts of actual channel scenarios, and a 1550 nm single-photon detection experimental system is built for validation. Experimental results show that this modulation scheme enables single-photon laser communication with a rate range from Kbps to Mbps. Meanwhile, preliminary tests based on avalanche photodiodes (APDs) demonstrate the feasibility of Gbps-level high-speed communication using this scheme. At the Kbps and Mbps rate levels, compared with the default pulse width, the adaptive pulse-width modulation algorithm reduces the communication BER by one and two orders of magnitude, respectively. In comparison with traditional single-photon laser communication systems, this modulation scheme supports wide-rate-range adjustment from Kbps to Gbps and optimal pulse-width selection at Kbps-Mbps rates, thus providing a novel solution for single-photon detection devices based on different technical routes.

Key words: laser communication; FPGA; GTX; single photon detector; pulse width adaptive; broadband reconfigurable; pulse sampling

1 引言

随着信息技术的飞速发展,对高速、低延迟和高带宽的通信需求日益增长。激光通信作为一种先进的通信技术,凭借其高带宽、抗干扰能力强、保密性好等优势,逐渐成为现代通信领域的重要发展方向^[1]。同时,单光子探测器作为一种高灵敏度的光探测设备,能够在极低光强下实现对光信号的精确检测,在激光通信系统中展现出独特的优势,具有广泛的应用前景。

激光通信在国内外已经取得较为显著的研究进展。2013年,美国航空航天局(NASA)首次完成了月球轨道卫星与地球地面站之间的双工激光通信任务,实现了地月间622 Mb/s的下行通信速率和20 Mb/s的上行通信速率^[2-4]。2016年至2017年,中国科学院上海光学精密机械研究所研制的高速相干激光通信载荷搭载于量子卫星“墨子号”上发射升空并进行了在轨测试,在1000 km的链路距离下实现了5.12 Gb/s的通信速率。2017年,哈尔滨工业大学研制的激光通信载荷搭载于“实践十三号”在40000 km的轨道高度下实现了5 Gb/s的下行通信速率^[5]。2023年6月,低轨卫星“吉林一号”MF02A04与中国科学院光电技术研究所研制的Φ500 mm自适应光学常态化激光通信地面站进行了10 Gb/s星地激光通信实验^[6]。同时,将单光子探测器用于激光通信也具有较为显著的进展。2006年,英国赫瑞瓦特大学成

功开发出InGaAs/InP单光子雪崩二极管(Single Photon Avalanche Diode, SPAD),可在1550 nm波长处进行有效的探测^[7]。2019年,中国科学院上海技术物理研究所,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^[8]。2024年,南京大学赵清源教授及其团队成功研发了一种紧凑的多像素超导纳米线单光子探测器(SNSPD)阵列,利用8-PPM(8-ary Pulse Position Modulation)格式的通信实验,在深空探测和空地通信领域达到了1.5 Gbps的峰值数据传输速率^[9]。

不同单光子探测器的性能具有显著差异,其响应带宽覆盖范围从Mbps级(如传统光电倍增管,PMT)到Gbps级(如超导纳米线单光子探测器,SNSPD)不等^[10-11]。在传统的激光通信系统中,开关键控(On-Off Keying,OOK)技术实现方式简单,功耗较低,可以实现高速率数据通信^[12],但OOK调制技术抗噪声和抗干扰能力弱,无法检测单光子级别的信号。传统单光子探测器件多与PPM技术相结合,PPM能量效率极高,抗干扰和抗衰减能力强,但PPM的应用存在本质性速率限制问题且脉冲宽度固定^[13-17]。PPM的符号结构要求每个信息位必须通过光子脉冲在特定时间窗内的位置进行编码,这种时域资源独占特性导致单位时间内可传输的有效符号数被严格限制。由于光子效率与传输速率相互限制,从根本上制约了PPM系统的速率性能提升,在高速单光子激光通信中具有一定局限性。

为了解决上述调制系统中的局限性, 解决单光子探测器应用场景下不同速率的传输需求, 本文提出一种宽带可重构脉冲采样 OOK 数据传输方案, 改进了 GTX(Gigabit Transceiver) 高速收发器的发射码型, 构建了一套速率、占空比可调节的归零 (Return-to-Zero, RZ) 编码收发系统, 使其可以应用于单光子激光通信, 并针对该调制方式设计了一套自适应脉宽算法, 可筛选不同速率下的最佳脉宽。相较于传统 PPM 单光子激光通信, 该方案在高灵敏度的前提下可以实现 Kbps-Gbps 宽速域调节和 Kbps-Mbps 下最优脉宽选取, 不仅克服了 PPM 与 OOK 的局限性, 也为不同技术路线的单光子探测设备提供了一种新的解决方法, 具有很高的研究价值。

2 单光子激光通信基本原理

2.1 整体架构与传输模型

图 1(彩图见期刊电子版)展示了星间单光子通信系统的整体传输框架。发射端采用 FPGA (Field-Programmable Gate Array) GTX 脉冲采样调制技术对信号进行调制, 并通过 SFP 光模块进行电光转换实现码型的光信号发射, 接收端 SPAD 单光子探测器对低功率数据进行接收后, 利用 FPGA 对接收信号进行数据处理。同时在发射端与接收端应用掺铒光纤放大器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) 可以提升整体的链路裕量, 从而实现远距离高速单光子激光通信。

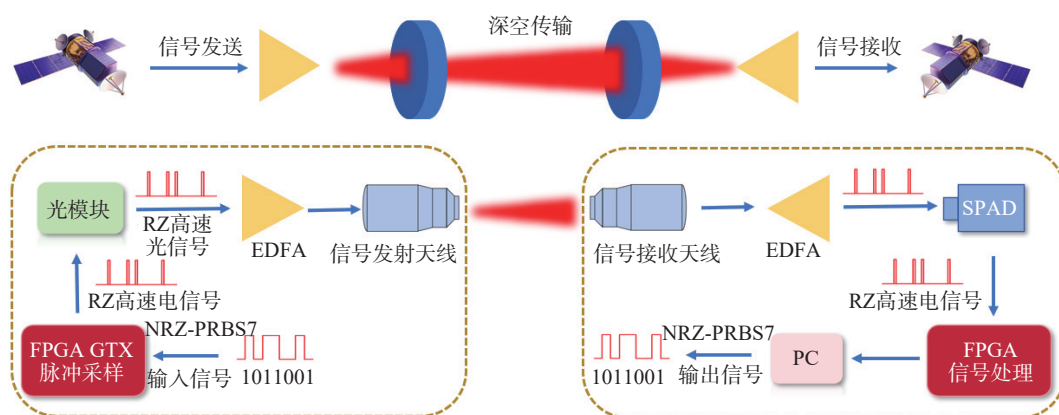


图 1 激光通信系统整体框架

Fig. 1 The overall framework of laser communication system

2.2 脉冲采样光信号发射原理

单光子探测器在接收到光子信号并进行响应之后, 需要一段时间进行恢复, 这段时间定义为单光子探测器的死时间。在死时间内, 探测器不会对光子信号进行响应, 会造成一定程度的信号丢失, 不利于后续信号的接收与恢复。针对单光子探测器存在的固有死时间问题, 本文提出脉冲采样信号调制技术, 将周期脉冲信号与非归零码型进行相乘, 生成速率与脉宽可调的归零信号, 确保单光子探测器恢复时间内不会接收到信号光子, 从而避免信号丢失。在空间激光通信系统中, 传统 NRZ-OOK (Non-Return to Zero-OOK) 调制由于存在连续的“1”信号, 无法与单光子探测器的死时间特性相匹配, 导致信号无法被有效探测, 因此不适用于单光子光通信系统^[18]。而脉冲采样 OOK 可以根据 SPAD 的死时间合理设置占空比,

其不仅能规避探测器死时间导致的漏码问题, 还具有更强的抗干扰能力。图 2 为脉冲采样原理图。

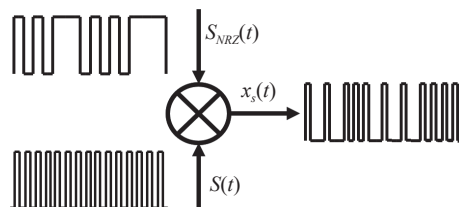


图 2 脉冲采样原理图

Fig. 2 Principle diagram of pulse sampling

周期脉冲信号函数为:

$$S(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \quad , \quad (1)$$

其中, $\delta(t)$ 表示脉冲函数, T 为脉冲周期, 设置伪随机归零码信号函数为 $S_{NRZ}(t)$, 根据奈奎斯特采样

定理知, 采样率必须大于被测信号最高频率分量的两倍, 因此采样频率与信号频率应满足如下关系:

$$S(t) \geq 2S_{NRZ}(t) \quad (2)$$

采样之后的函数 $x_s(t)$ 为:

$$\begin{aligned} x_s(t) &= S_{NRZ}(t) S(t) = \\ &= S_{NRZ}(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT) = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_{NRZ}(nT) \delta(t-nT) \quad (3) \end{aligned}$$

发射端的光模块是一种小型激光器, 可以通过控制驱动电流的强弱对光信号进行强度调制。假设发射端脉冲振幅均为理论值 1 的状态, 则传输的脉冲波形 $p(t)$ 为:

$$p(t) = \begin{cases} 1 & \text{for } t \in [0, \tau_p) \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (4)$$

其中, τ_p 为脉冲持续时间, 即脉冲宽度。发射脉冲的能量表达式 E_p 为^[19]:

$$E_p = \int_{-\infty}^{\infty} p^2(t) dt = \tau_p \quad (5)$$

脉冲能量与光子数的关系表示为:

$$E_p = \tau_p = \mu_0 \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (6)$$

其中, μ_0 为每个激光脉冲的平均光子数, h 为普朗克常量, c 为光速, λ 为光波长。为了确保发射端每个脉冲的平均光子数 μ_0 趋近于 1, 即单个脉冲仅包含 0 个或 1 个光子, 通常采用高精度光衰减器对发射光进行衰减。根据公式 (6), 通过调控发射端码型的脉冲宽度, 可以进一步精准控制每个发射脉冲的光子数量, 使每个脉冲的光子数维持在单光子水平, 以匹配接收端单光子探测器的探测特性。

在单光子激光通信中, 接收信号光子数与总噪声光子数均服从泊松^[20]分布, 激光器输出的每个激光脉冲含有的光子数 n_0 的概率分布为:

$$P(n_0, \mu_0) = \frac{\mu_0^{n_0}}{n_0!} \exp(-\mu_0) \quad (7)$$

2.3 单光子探测器工作原理

半导体单光子探测器利用 SPAD 实现单光子

探测, SPAD 为盖革模式下的 APD^[21]。图 3 为盖革模式 I-V 特性曲线。当 APD 的反向偏压高于击穿电压时, APD 碰撞电离产生电子空穴对的速率会大大加快, 比电子空穴对的吸收率快, 这就就会使电流随着时间按指数级增长, 从而发生雪崩, 产生电流脉冲, 此过程为盖革模式。这种雪崩倍增效应使探测器拥有对单个光子的探测能力, 从而使灵敏度大大提高。

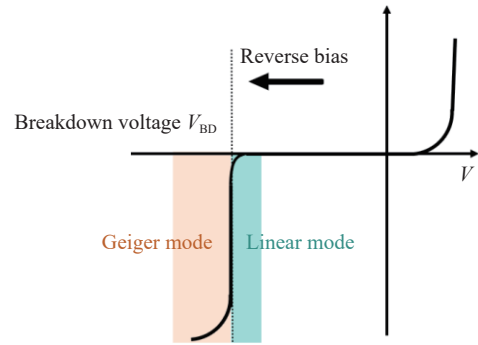


图 3 盖革模式 I-V 特性曲线

Fig. 3 Geiger-mode I-V characteristic curve

探测器接收光子信号时, 光强持续过高不仅会对 SPAD 探测效率产生较大影响, 持续的雪崩过程还会对探测器造成损伤。为了防止探测器被破坏, 提高探测效率, 选择门控模式对雪崩进行抑制, 图 4 为门控模式雪崩光电二极管示意图。门控抑制技术是一种高效的雪崩控制手段。它通过精确控制反向偏压, 使探测器仅在需要探测光子的瞬间处于雪崩模式并迅速终止雪崩, 有效减少暗计数和后脉冲现象, 实现对光子的精准计数。

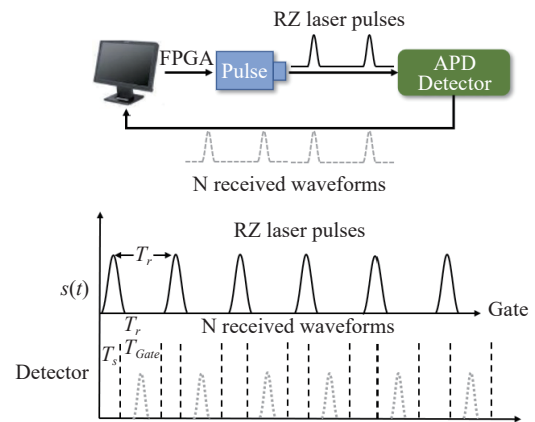


图 4 门控模式雪崩光电二极管示意图

Fig. 4 Schematic diagram of gated-mode APD

当发射码型速率为 R_s , 脉冲宽度为 τ_p , 则其与门控模式的对应关系为:

$$R_s = j \cdot f_g, j = 1, 2, 3 \dots, \quad (8)$$

$$T_g \geq \tau_p, \quad (9)$$

式中 f_g 为门控频率, 通常与信号速率相等, T_g 为探测器门宽。

为了适配多速率的宽带接收需求, 通常利用单光子探测器的外部门控模式实现对发射码型的实时匹配。当发射码型速率与脉宽发生变化时, 接收端根据发射码型不同, 实时调整门控频率与门宽。通过上述方法可以实现单光子探测器对动态码型的接收需求, 进而实现更高效的光信号探测和处理。

由于 SPAD 的雪崩事件属于概率事件, 有两种情况会导致单光子探测产生误码^[22]。一种是光子到达探测器后未发生雪崩效应, 应有的光计数没有产生, 另一种是在没有光子到达时发生了雪崩效应, 产生了不该有的光计数, 前者对应于单光子探测器的探测效率 (PDE) 不够高, 而后者则对应单光子探测器的暗计数 (DCR) 与后脉冲 P_{ap} 过大。PDE 的表达式为:

$$PDE = \frac{1}{\mu} \ln \frac{1 - R_d/f_g}{1 - R_{ph}/f_l}, \quad (10)$$

其中, μ 为接收的脉冲平均光子数, R_d 为无光照射时测量的计数率 (暗计数率), f_l 为激光重复频率; R_{ph} 为有光照射时的光子探测计数率, $R_{ph} = N/T_{gate}$, N 是在门控时间内单光子探测器检测到的光子计数总数, T_{gate} 是门控信号的总时间。DCR 的表达式为:

$$DCR = R_d/f_g t_w, \quad (11)$$

其中, t_w 为有效门宽。后脉冲的表达式为:

$$P_{ap} = \frac{R - R_{ph} - R_d}{R_{ph}}, \quad (12)$$

其中, R 为光照下总计数率。

2.4 实际激光通信场景模型

信噪比由探测器表面接收到的平均信号光子数 N_s 与探测器的平均噪声光子数 N_n 决定^[23-24]:

$$SNR = \frac{N_s}{\sqrt{N_n}}, \quad (13)$$

其中, N_s 会受到信道衰减 β 、大气湍流 T_{turb} 、大气散射 T_{scat} 以及瞄准误差 T_{point} 、有效探测效率 η_{det} 等影响; N_n 主要受背景辐射噪声 N_{bg} 、暗计数噪

声 N_{dark} 等约束。

大气湍流是关键传输信道扰动因素, 常会对光束产生光强闪烁、相位起伏等影响^[25-26], 湍流导致光强服从对数正态分布, 其平均传输系数为:

$$T_{turb} = \exp\left(-\frac{1.23 \cdot C_n^2 \cdot k^{7/6} \cdot L^{11/6}}{2}\right), \quad (14)$$

其中 C_n^2 为折射率结构常数, L 为传输距离, $k=2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为激光波长。

大气散射也是一种影响传输信道的关键因素。当光与大气中的分子发生相互作用, 会偏离原来的传播方向造成大气散射损耗。大气散射系数表达式为:

$$T_{scat} = \exp(-\sigma_s \cdot L), \quad (15)$$

其中 σ_s 为大气散射系数, 该项值越高, 空气中的散射越强。

对准误差是由于通信系统的收发设备之间由于震动、热膨胀等因素, 导致光束质心在接收平面上的随机移动引起的。对准误差的客观存在将不可避免地影响到激光在接收平面的光强分布, 损耗由光斑尺寸 $\omega(L)$ 和偏移量 Δr 决定:

$$T_{point} = \exp\left(-\frac{2\Delta r^2}{\omega^2(L)}\right). \quad (16)$$

背景辐射噪声 N_{bg} 是指来自探测系统外部的、非目标通信信号的光子辐射干扰。这些光子会被单光子探测器接收并误判为信号光子, 从而影响信噪比:

$$N_{bg} = \Phi_{bg} \cdot A_{det} \cdot \tau_p \cdot \eta_{det}, \quad (17)$$

其中, Φ_{bg} 为背景光子通量, A_{det} 为探测面积, η_{det} 可表示为:

$$\eta_{det} = \frac{\tau_p}{\tau_p + k_0 \cdot \tau_d} \cdot \exp(-\tau_p/\tau_0), \quad (18)$$

其中 k_0 为影响系数, 会随着信道影响增大而增大, τ_0 为探测器的死时间。 η_{det} 与探测器固有的探测效率 PDE 具有一定的关系。

暗计数噪声 N_{dark} 为单个脉冲内的暗计数噪声光子数, 主要受到暗计数率 R_d 与脉冲宽度 τ_p 的影响:

$$N_{dark} = R_d \cdot \tau_p. \quad (19)$$

根据上述公式, 可得最终信噪比 SNR 为:

$$SNR = \frac{\mu_0 \cdot T_{\text{turb}} \cdot T_{\text{scat}} \cdot T_{\text{point}} \cdot \eta_{\text{det}}}{\sqrt{N_{\text{bg}} + N_{\text{dark}}}} = \frac{\frac{\lambda}{hc} \cdot T_{\text{turb}} \cdot T_{\text{scat}} \cdot T_{\text{point}} \cdot PDE \cdot \frac{\tau_p^2}{\tau_p + k_0 \cdot \tau_d} \cdot e^{-\frac{\tau_p}{\tau_0}}}{\sqrt{\phi_{\text{bg}} \cdot A_{\text{det}} \cdot \tau_p \cdot PDE + N_{\text{dark}}}} \quad (20)$$

3 系统设计

3.1 宽带可重构 RZ 码发送端设计

发射激光的速率与脉宽可以通过算法进行自定义。Xilinx 7 系列 FPGA 内部集成专用硬件电路用于实现高速数据流的串行传输^[27], GTX 是 Xilinx FPGA 芯片中的一种高速串行收发器, 支持 500 Mb/s 至 12.5 Gb/s 的数据传输速率, 能够实现数据的高速收发。图 5 为 GTX 收发器工作原理图, 数据通过 PCS 与 PMA 物理子层可以完成并串转换, 产生高速数据。

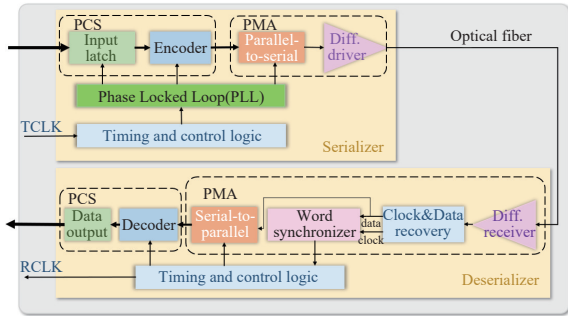


图 5 GTX 收发器工作原理图

Fig. 5 GTX transceiver working principle diagram

通过 Vivado 中的 IP 核配置线速度后, 锁相环 (CPLL) 产生的时钟经由 PMA 内部的分频逻辑分频后, 产生 TXOUTCLK。该时钟可作为发送端内部逻辑驱动时钟 TXUSRCLK 以及发送端逻辑接口时钟 TXUSRCLK2 的时钟源。TXUSRCLK 的时钟频率与线速率的关系如下:

$$TXUSRCLK \text{ Rate} = \frac{\text{Line Rate}}{\text{Internal Datapath width}} \quad (21)$$

以原始 GTX 速率最短调制周期为基准, 可以配置算法实现宽带可重构归零码型调制。发射端脉冲最小时间单位与时钟周期单位关系如下:

$$\tau = \frac{1}{TXUSRCLK2 \times \text{Internal Datapath width}} \quad (22)$$

发射码型速率与发射端脉冲最小时间单位数量 m 关系如下:

$$m = \frac{1000}{\text{Transmission Rate} \times \tau} \quad (23)$$

根据 τ 可以实现 GTX 低重频、窄脉宽的码型发射, 实现低至 Kbps、高至 Gbps 级别速率的更改。

为了模拟链路上的随机流量, 选择发送伪随机序列数据从 TX 模块流向 RX 模块, 伪随机序列利用移位寄存器产生。使用 FPGA, 选用 PRBS7 作为随机码型生成, 其生成多项式为: $X^7 + X^6 + 1$, 初始状态设置为 0000001, 每次将第六位与第七位进行异或运算并作为新的输出循环往复, 以此可以生成 127 位伪随机非归零二进制数据。由于配置的 GTX 数据宽度为 32 位, 且 PRBS7 并不是 32 的倍数, 直接放进 GTX 模块中作为发送数据时会产生冗余, 因此首先利用 MATLAB 生成与 GTX 适配的数据文件, 再通过 FPGA 将数据文件中的数据依次读出, 以此来使 PRBS7 在 GTX 中正常循环。数据文件总位数可以根据以下公式进行计算:

$$N_z = W \times L_{\text{prbs}} \quad (24)$$

其中, N_z 为数据文件总位数, W 为 GTX 中的数据宽度, L_{prbs} 为 PRBS 伪随机码型总长度。同时根据所需占空比 D , 在发送端配置一条数据宽度相同、速率相同的周期脉冲信号。该信号由 1 的持续个数 a 与 0 的持续个数 b 组成, 且 $a+b=m$, $a/b=D$, a 决定了脉冲宽度, b 决定了数据占空比。

将周期脉冲信号与数据信号进行相乘, 便可得到调制好的伪随机归零码信号, 将调制信号接入数据发送端便可进行数据发送。

3.2 脉宽可调数据自适应接收端设计

为了实现脉宽实时调节功能, 在下位机与上位机进行通信时采用 UART-RS232 模块配置串口收发, 利用串口上位机 XCOM 软件向 GTX 发送实时脉宽信号。

单光子探测器接收到光信号后会将信号转换为电脉冲信号, 信号显示与发射端 PRBS7 码型一致。为了选取不同速率下误码率最低情况下的脉宽, 设计了一种实现接收端脉宽自适应算法, 图 6 为误码接收端框图。该算法由误码接收、误码处

理、数据对比三个模块实现。误码接收模块定义接收数据总数 $total_num$ 与错误码型个数 $error_num$, 每当发射端上位机使发射码型脉宽速率发生改变, 发射码型均从 0000001 开始重新生成, 同时在 FPGA 接收端接收到第一个单光子探测器产生的电信号时, 开始记录接收到的码型, 并与本地 PRBS7 码进行对比。根据定义接收数据总数与错误码型个数检测误码率。误码处理模块对接

收模块传来的不同脉宽下误码数与总数进行相同时钟域处理, 控制不同脉宽下抓取的误码周期 $code_num$ 总数相同, 并记录 $code_error$, 同时 $signal_flag$ 信号升高一个时钟周期, 将误码数、脉宽、总数与 $signal_flag$ 信号传递至数据对比模块。数据对比模块通过比较, 可以选出误码率更低的脉宽并将信号传送至发送端。

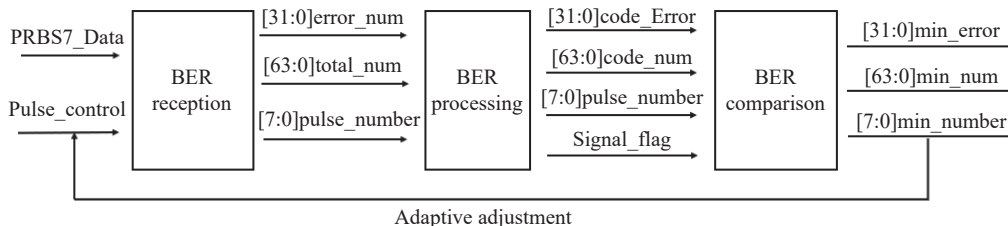


图6 误码接收端框图

Fig. 6 Block diagram of the BER receiving terminal

脉宽自适应算法逻辑框图如图7所示。当开始通信时设定默认脉宽, 进行第一次误码率的检测, 增加一个步长的脉宽后再次检测误码率, 并与上一次的误码率进行对比。当误码率降低时, 步长符号(正/负)不变, 否则改变步长符号。根据这种反馈调节机制, 脉宽参数最终会收敛至适配当前通信链路的最优区间内。

比进行仿真, 对实际激光通信场景中的湍流、大气散射以及对准误差进行模拟。仿真参数初值如表1所示。

表1 Python 仿真参数

Tab. 1 Parameters for Python simulation

参数	取值
λ	1550
τ_p/ns	1~100
$C_n^2/m^{-2/3}$	10^{-17}
σ_s/m^{-1}	10^{-5}
T_{point}	1
τ_0/ns	25
ϕ_{bg}	10^8
A_{det}	10^{-6}
η_{det}	0.3
R_{dark}	100
k_0	0.1

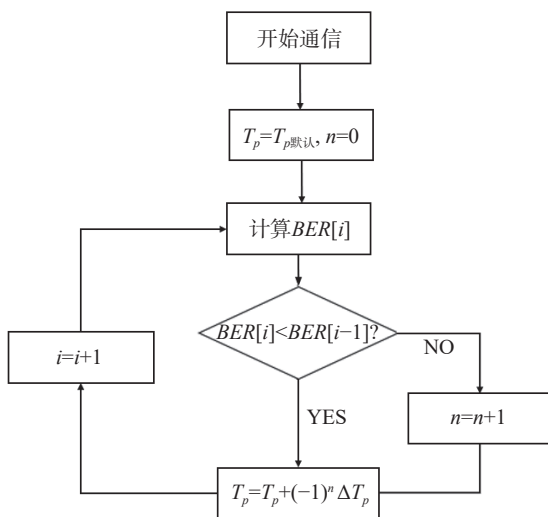


图7 脉宽自适应算法逻辑框图

Fig. 7 Logic diagram of the adaptive pulse-width algorithm

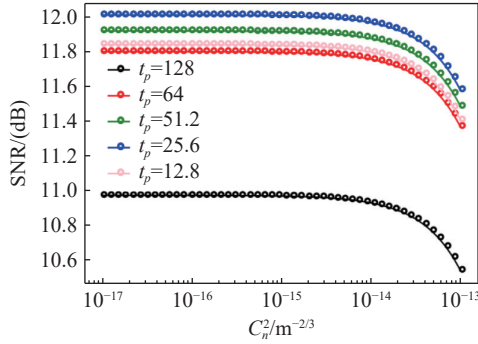
4 仿真实验

本节利用第二章所推导的大气信道下的信噪

4.1 不同信道影响下的信噪比

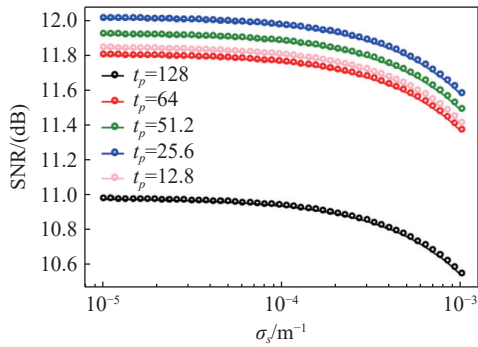
图8(彩图见期刊电子版)为不同脉宽条件下不同参数与信噪比的关系, 可以看出整体信噪比随着大气中湍流、散射、对准误差的增大而降低; 同时, 随着脉宽的增大, 接收端接收到的光子数逐渐增加, 信噪比随之上升; 当光子数饱和后, 探测器的有效探测效率会下降, 信噪比也随之降低。因此, 在整个脉宽增加的过程中, 存在使系统信噪

比最优的脉宽取值范围。



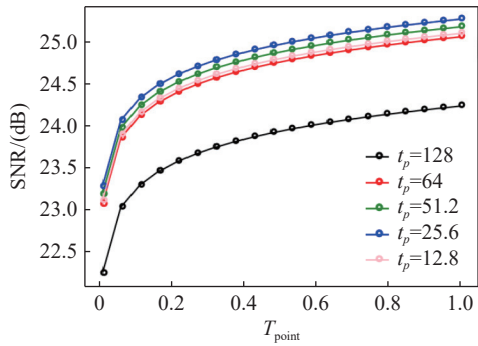
(a) 大气湍流的影响

(a) Impact of atmospheric turbulence



(b) 大气散射的影响

(b) Impact of atmospheric scattering



(c) 对准误差的影响

(c) Impact of pointing errors

图 8 不同脉宽条件下不同参数与信噪比的关系

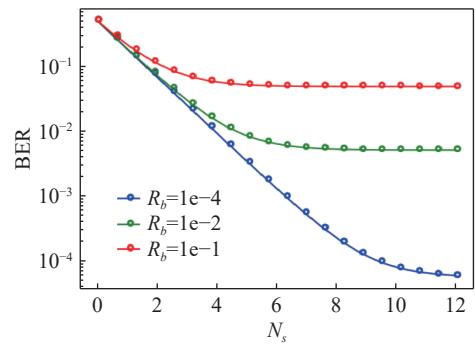
Fig. 8 Relationship between different parameters and signal-to-noise ratio under different pulse-width conditions

4.2 低功率下背景噪声对误码率的影响

在传统单光子激光通信系统中,系统误码率由“0 码误判为 1 码”与“1 码误判为 0 码”两类错误的概率叠加得到^[28],其表达式可写为:

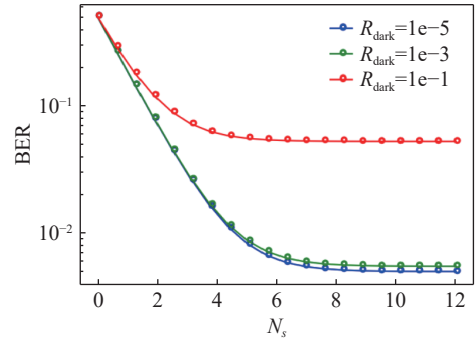
$$\begin{aligned} BER &= 0.5 \cdot P(1|0) + 0.5 \cdot P(0|1) = \\ &= 0.5 \cdot (1 - e^{-N_n}) + 0.5 \cdot e^{-(N_s + N_n)} = \\ &= \frac{1}{2} [1 - e^{-N_n} + e^{-(N_s + N_n)}] \end{aligned} \quad (25)$$

其中总噪声光子数 N_n 主要受到大气背景噪声 R_b 与暗计数噪声 R_{dark} 影响。由于接收端的信号光子数量较少,噪声对信道整体误码率的影响会相应增大。图 9(彩图见期刊电子版)为不同噪声条件下光子数与误码率曲线图,图 9(a)为不同大气背景噪声的曲线,图 9(b)为不同暗计数的曲线。可以看出,在低功率条件下,大气背景噪声与暗计数噪声越多,系统的误码率越高;随着光子数的增加,误码率迅速降低,系统的通信质量可以得到明显改善。



(a) 不同大气背景噪声

(a) Different atmospheric background noise



(b) 不同暗计数

(b) Different dark counts

图 9 不同噪声条件下光子数与误码率曲线图

Fig. 9 Photon number vs. BER curve under various noise conditions

由上述曲线可知,在通信系统低功率的条件下,通过增加脉冲宽度,可以直接调控发射端光子的数量,进而提升接收端所接收到的信号光子数,实现误码率的优化。自适应脉宽机制能够根据信道条件动态调整:当通信信道条件恶化时,增大发射脉宽从而优化误码率;当信道条件良好时,减小脉宽,在维持误码率稳定的前提下可以降低发射功率、减少能耗。在实际通信链路中,自适应脉宽展现出一定的环境适应性与稳定性。

4.3 自适应脉宽算法仿真

为了通过自适应程序找到最优脉宽, 将发射数据速率固定。为了保证不同脉宽下接收总数据量一致, 需控制发射机每经过固定时钟周期后都进行一次误码检测, 并在每次循环后都与上一周

期的误码数进行对比, 根据误码数的变化调整脉宽。图 10 为 1.56 Mbps 自适应算法得到的最优脉宽仿真测试结果, 显示最优占空比为 4%, 即脉宽 25.6 ns, 此时的误码率为 $5.8e-6$ 。

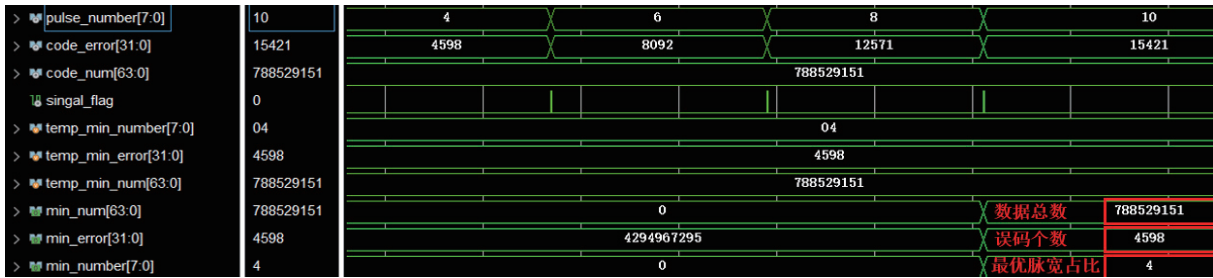


图 10 1.56 Mbps 自适应脉宽仿真测试结果

Fig. 10 1.56 Mbps adaptive pulse-width simulation test results

为了进一步验证算法的收敛速度及其对信道动态变化的响应能力, 在不同的衰减条件下进行了仿真验证。图 11(彩图见期刊电子版)为 3 条不同速率的通信响应曲线, 在 40 s 的时候将 k_0 值由 0.1 调整至 1.5, 用来模拟大气信道变化引起的链路衰减突变。可以看出不同速率的初始调整时间分别在 8~24 s 左右, 信道突变之后调整时间在 2~10 s 左右。这是因为在初始寻找最优脉宽时系统处于默认脉宽, 需要进行更多次的误码率对比迭代才会找到最优脉宽。当找到最优脉宽之后, 信道进行衰减, 系统脉宽会基于已有最优值向前或向后进行步长调整, 相比于默认脉宽需要走的步长更少、时间更短。同时由于设定的误码率基准为 10^{-6} , 通信速率越高, 对应的误码率统计速度越快, 自适应调整时间越短。

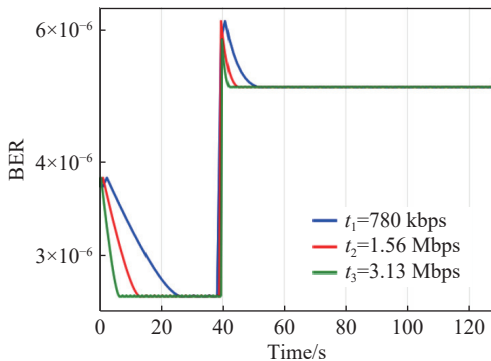


图 11 不同速率下脉宽自适应调整时间

Fig. 11 Adaptive pulse-width adjustment time at different rates

5 实验测试与结果讨论

5.1 实验系统搭建与结果显示

实验系统整体框图如图 12 所示, FPGA 首先生成归零码信号并储存至 GTX 发送端, 通过 GTX IP 将生成的信号传入 SFP 接口与光模块连接实现电光转换, 经过光衰减器后进入单光子探测器, 同时在 FPGA 中生成一路 RZ 同步信号传入单光子探测器。其中 XCOM 上位机可以实现发射端归零码速率与占空比的手动调节。单光子探测器接收到数据后产生的电信号传回 FPGA, 对接收到的 RZ 信号进行解调恢复为 NRZ 后, 与本地数据进行比对, 统计误码率。当脉宽自适应功能开启时, 接收到的误码率会自动更新数据发送端的占空比, 当误码率最低时显示并调节至最优占空比结果。

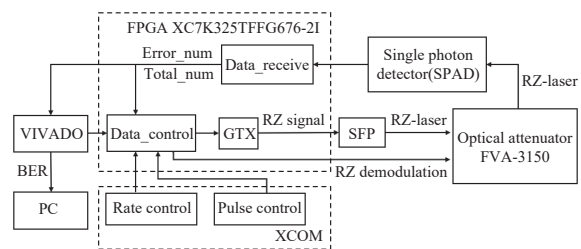


图 12 实验系统总体框图

Fig. 12 Overall block diagram of the experimental system

通信系统实物图如图 13(彩图见期刊电子版)所示, FPGA 采用 XILINX 系列 XC7K325TF-

FG676-2I, 该芯片具有功耗低、性能强、资源多、使用方便等优点。光模块最高速率可达 10 G; 可变光衰减器 FVA-3150, 衰减分辨率达 ± 0.002 dB; 单光子探测器为 ID210 infrared Single-Photon Detector, 可以对 1550 nm 单光子进行有效探测。

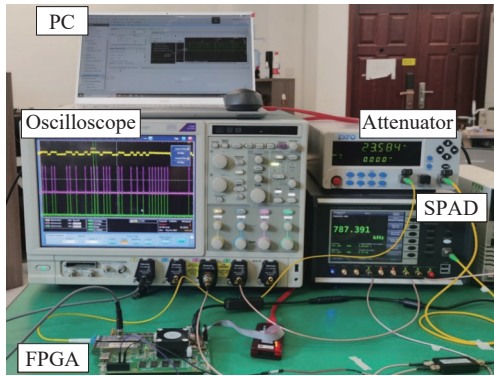


图 13 通信系统实物图

Fig. 13 Physical diagram of the communication system

调节发射端, 首先让 FPGA 生成 781.25 Kbps、1.5625 Mbps、3.125 Mbps 三条不同速率 RZ 信号, 并传送至单光子探测器, 占空比均为 4%, 同时针对不同速率的发射信号, 在单光子探测器的另一路接入配置好的相同速率、门宽略大于发射数据脉宽的外门控信号。在发射端速率与脉宽发生实时改变时, 门控信号也可以随之实时调节。设置单光子探测器触发延时 2.5 ns, 死时间 0.1 μ s, 在示波器上显示的结果如图 14(彩图见期刊电子版)所示。最下方绿色信号为 PRBS7 NRZ 码型演示, 紫色信号为 FPGA 发出的 RZ 波形, 蓝色信号为单光子探测器探测到的数据波形, 发送端波形数据与接收端波形数据保持一致, 证明该单光子实验系统在 Kbps-Mbps 速率条件下可以进行通信, 也证明单光子探测器也可以对不同速率、不同脉宽的信号进行接收。

此外, 在接收端选用高速 KG-APD 雪崩光电模块对 Gbps 级别的信号进行了初步测试, 发射端调制了 1.25 Gbps、2.5 Gbps 与 5 Gbps 的归零脉冲采样码型进行发射, 在衰减-18 dBm 后连接至 APD 模块对数据进行接收, 图 15(彩图见期刊电子版)为 APD 所接收到的归零码码型。对接收到的归零码数据进行低通滤波与误码处理, 得到高速信号情况下不同码型的速率, 如表 2 所示。可以初步验证所调发射端 Gbps 速率量级的可行性。

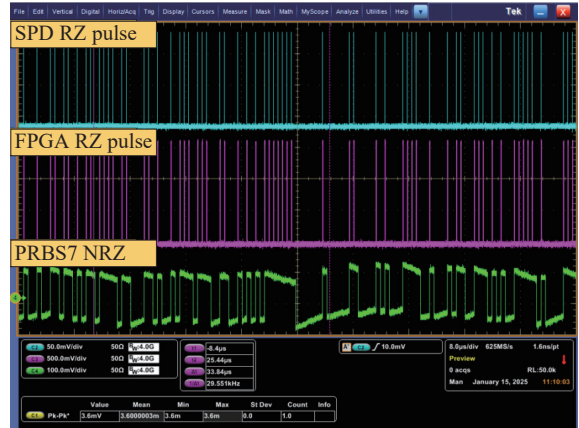


图 14 波形结果显示

Fig. 14 Waveform test results

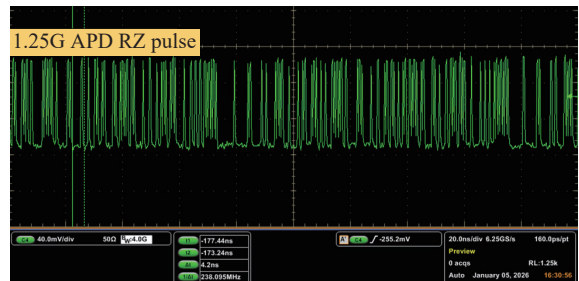


图 15 APD 接收到的 RZ 码型

Fig. 15 RZ code pattern received by the APD

表 2 不同速率下 APD 接收所得误码率

Tab. 2 BER obtained by APD reception at different rates

速率	占空比	误码率
1.25 Gbps	50%	1.838e-12
2.5 Gbps	50%	4.819e-12
5 Gbps	50%	1.442e-11

5.2 单光子探测器脉宽与误码率的关系

为了验证宽带可重构算法, 研究发射端脉宽与探测器接收情况的联系, 测试了不同速率、不同脉宽条件下单光子探测器的误码率。在发射速率不变的情况下, 调节衰减器的衰减使误码率降至 10^{-6} 左右, 调节发射端 RZ 码的脉宽, 使其从 0.8 ns 逐渐增加, 最高为 160 ns, 不断观测接收端误码率的变化情况。图 16(彩图见期刊电子版)为 781 Kbps、1.56 Mbps、3.125 Mbps 三种不同传输速率下误码率随脉宽变化曲线。从图中可得, 随着占空比的增加, 误码率先降低后升高。由式 (10) 可知, 随着脉宽的逐渐增加, 每个激光脉冲的平均光子数 μ_0 增大, 光子探测计数率 R_{ph} 也会增

大,二者会在不同的脉宽阶段分别占据主导。当发射脉宽较小时,门控窗口与探测器响应时间的重叠区域(有效探测时段)占比低, R_{ph} 增长幅度相对较小,导致探测效率低;随着脉宽的增大,有效探测时段占比提高, R_{ph} 增益变高,使探测效率上升;脉宽过大时探测器未响应时段增加,匹配度下降,使探测效率降低,从而出现误码率先降后升的现象。

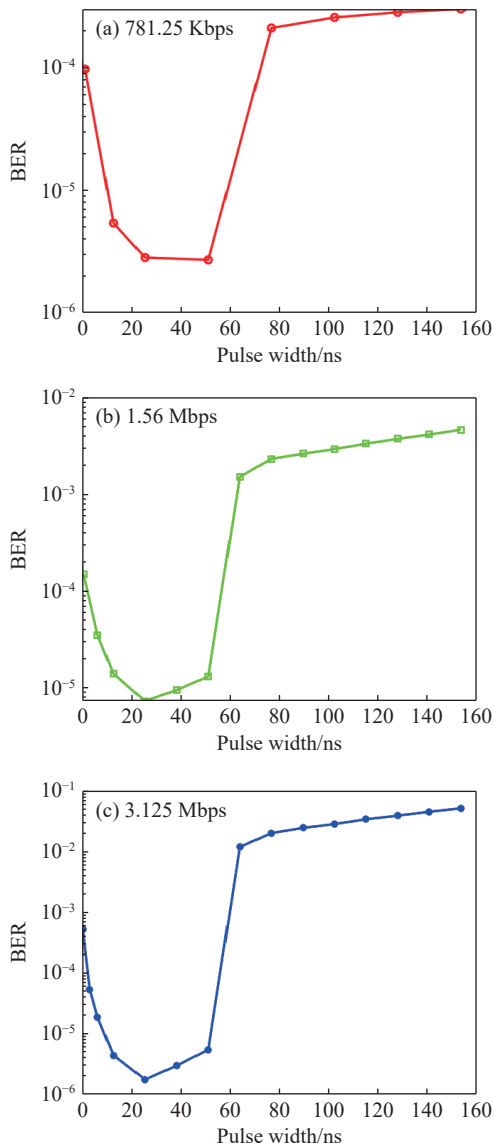


图 16 不同速率脉宽与误码率关系

Fig. 16 Relationship between pulse-width at different rates and bit error rate

5.3 单光子探测器通信灵敏度比较与分析

在不同速率下,保持数据占空比均为 4%,通过高精度光衰减器将发射光功率调节至单光子量级,观察波形的变化。随着光功率的不断减小,光子探测器受暗计数、背景噪声的影响加剧,示

波器显示的波形错误数肉眼可见增加。将单光子探测器探测到的波形信号传回 FPGA 监测错误个数,其中误码率与单光子探测器的功率大小关系如图 17(彩图见期刊电子版)所示。在光功率不变的情况下,FPGA 传输速率增加时,误码率相应也增加。在调制速率不变时,随着光功率的增加,误码率随之减小。在速率分别为 781.25 K、1.56 Mbps、3.125 Mbps 时,单光子探测器灵敏度(误码率低于 10^{-6})分别为 -49.6 dBm、 -46.4 dBm、 -44.9 dBm,同时,在相同的实验条件下应用 PPM 调制对相同速率下的通信系统进行灵敏度对照测试,如图 18(彩图见期刊电子版)所示。所得通信系统灵敏度分别为 -50.7 dBm、 -46.5 dBm、 -42.9 dBm。相比于传统的 PPM 单光子激光通信,本实验系统同样也具有较高的灵敏度,可以用于通信系统收发。

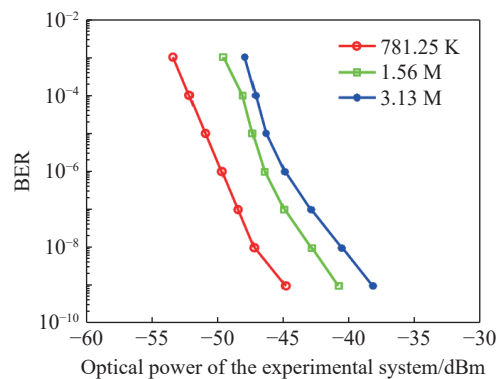


图 17 光功率与误码率关系曲线

Fig. 17 Relationship curve between optical power and BER

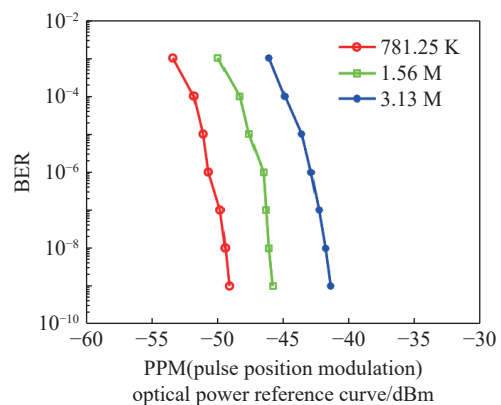


图 18 PPM 实验对照曲线

Fig. 18 PPM control experiment curves

5.4 脉宽自适应实验

为了验证脉宽自适应算法的可行性,在 Kbps-Mbps 不同速率下进行了脉宽自适应实验

证。将发射端脉宽调节至 72.6 ns, 调节衰减器使接收端误码率在 $1e-6$ 附近, 然后启动脉宽自适应程序, 记录收敛后的误码率数值。图 19(彩图见期刊电子版) 为不同速率下默认脉宽与最优脉宽的对比。可以看出, 通信速率为 390 kbps 时, 采用脉宽自适应算法能够将通信误码率从 $1.72e-6$ 降低至 $6.64e-7$; 通信速率为 3.125 Mbps 时, 误码率从 $2.47e-6$ 降低至 $7.74e-8$, 同时随着通信速率的增加, 自适应脉宽优化的程度更加明显并趋于稳定, 证明该方法可以有效降低通信误码率, 进而提升单光子激光通信的传输质量。

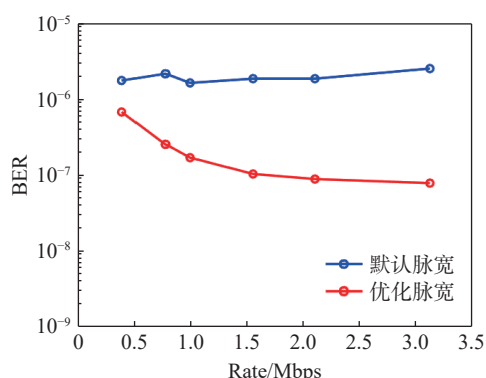


图 19 不同速率下默认脉宽与最优脉宽的对比

Fig. 19 Comparison of default pulse-width and optimal pulse-width under different rate conditions

参考文献:

- [1] 刘智, 蒋青芳, 刘树通, 等. 空间激光通信组网技术与应用研究进展[J]. 中国光学 (中英文), 2025, 18(3): 429-451. LIU ZH, JIANG Q F, LIU SH T, *et al.*. Research progress of space laser communication networking technology[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 429-451. (in Chinese).
- [2] KRAINAK M A, LUZHANSKIY E, LI S X, *et al.*. A dual format communication modem development for the Laser Communications Relay Demonstration (LCRD) program[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8610: 86100K.
- [3] LUZHANSKIY E, EDWARDS B, ISRAEL D, *et al.*. Overview and status of the laser communication relay demonstration[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9739: 97390C.
- [4] DEVOE C E, PILLSBURY A D, KHATRI F, *et al.*. Optical overview and qualification of the LLCDC space terminal[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 10563: 105630F.
- [5] 崔岳, 唐勇. 实践二十号卫星在轨核心试验全部完成[J]. 国际太空, 2020(7): 38-41. CUI Y, TANG Y. All in-orbit core tests of the Shijian-20 satellite have been completed[J]. *Space International*, 2020(7): 38-41. (in Chinese).
- [6] 景洋. 100 秒, “吉林一号”实现星地激光高速通信[EB/OL]. (2023-06-29)[2025-07-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1769966227103819019&wfr=spider&for=pc>. JING Y. 100 seconds: "Jilin-1" achieves high-speed satellite-to-ground laser communication[EB/OL]. (2023-06-29)[2025-07-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1769966227103819019&wfr=spider&for=pc>.
- [7] PELLEGRINI S, WARBURTON R E, TAN L J J, *et al.*. Design and performance of an InGaAs-InP single-photon avalanche diode detector[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42(4): 397-403.
- [8] 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: 中国科学院大学 (中国科学院上海技术物理研究所), 2019.

6 结 论

传统 PPM 应用存在速率较低、脉冲宽度固定等问题。为了使单光子探测器在不同传输速率下仍有较好的传输质量, 本文提出了一种宽带可重构脉冲采样数据传输方案。通过设计归零码调制解调算法、脉宽可调谐算法, 改进了 GTX 发射码型。通过脉宽自适应算法测量接收信号的误码率, 找到最佳脉宽, 最终提升了单光子激光通信传输速率与质量。本文对信道实际场景中的影响进行了链路仿真与自适应仿真, 并进行了低速与高速的实验验证。分别在 781.25 Kbps、1.5625 Mbps、3.125 Mbps 速率下进行测试, 在衰减分别为 -49 dBm、 -47 dBm、 -45 dBm 时, 接收误码率约为 $1e-6$ 。在 Kbps、Mbps 速率量级下, 采用自适应脉宽调制算法使通信误码率相比于默认脉宽分别降低了 1、2 个数量级。证明采用脉宽自适应的方法可以有效提升传输质量。本文主要在实验室环境下完成了通信系统理论灵敏度与通信速率的验证工作, 后续研究可开展更高响应速率的单光子探测实验以及外场实验以进一步验证上述结论。

- ZHANG H Y. *Research on ultraviolet communication system based on Geiger mode APD*[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese).
- [9] HAO H, ZHAO Q Y, HUANG Y H, *et al.*. A compact multi-pixel superconducting nanowire single-photon detector array supporting gigabit space-to-ground communications[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 25, doi: [10.1038/s41377-023-01374-1](https://doi.org/10.1038/s41377-023-01374-1).
- [10] YOU L X. Superconducting nanowire single-photon detectors for quantum information[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(9): 2673-2692.
- [11] 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.
- LIU D X, YU X N, TONG SH F, *et al.*. Key technologies of laser communication based on single photon detection and pulse position modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(3): 0306002. (in Chinese).
- [12] 田睿阳. 基于 PPM 调制的水下激光通信系统研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2024.
- TIAN R Y. *Underwater wireless optical communication system based on pulse-phase modulation*[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2024. (in Chinese).
- [13] 吴晓薇, 杨雷, 展月英, 等. 高速脉冲位置调制对 SNSPD 探测光子计数特性影响 (特邀)[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(7): 0706015.
- WU X W, YANG L, ZHAN Y Y, *et al.*. Photocount characteristics of SNSPD for PPM signals in deep-space laser communication (invited)[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(7): 0706015. (in Chinese).
- [14] 熊强强, 严林波, 樊鑫. 考虑发射时隙的可见光通信差分脉冲位置调制[J]. *激光杂志*, 2025, 46(1): 179-184.
- XIONG Q Q, YAN L B, FAN X. Differential pulse position modulation of visible light communication considering transmission time slots[J]. *Laser Journal*, 2025, 46(1): 179-184. (in Chinese).
- [15] 杨义军, 魏博文, 童峰, 等. 一种 PPM 调制近距高速率低复杂度水声通信方案[J]. *舰船科学技术*, 2025, 47(3): 129-134.
- YANG Y J, WEI B W, TONG F, *et al.*. A short-distance high-data-rate low-complexity PPM modulation underwater acoustic communication method[J]. *Ship Science and Technology*, 2025, 47(3): 129-134. (in Chinese).
- [16] 胡春源, 林玉洁, 朱简尊, 等. 单光子激光通信测距一体化系统设计[J]. *国外电子测量技术*, 2024, 43(6): 119-126.
- HU CH Y, LIN Y J, ZHU J Z, *et al.*. Design of single-photon laser communication and ranging integration system[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2024, 43(6): 119-126. (in Chinese).
- [17] 潘玉枝, 李锋, 张婷, 等. 基于衰减自适应调制切换的水下激光通信[J]. *激光杂志*, 2026, 47(1): 171-179.
- PAN Y ZH, LI F, ZHANG T *et al.*. Underwater laser communication based on attenuation adaptive modulation switching[J]. *Laser Journal*, 2026, 47(1): 171-179. (in Chinese).
- [18] CHITNIS D, COLLINS S. A SPAD-based photon detecting system for optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(10): 2028-2034.
- [19] FAN Y Y, GREEN R J. Comparison of pulse position modulation and pulse width modulation for application in optical communications[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(6): 065001.
- [20] 刘旭超, 李华贵, 孙时伦, 等. 湍流信道下光量子通信系统误码分析及优化[J]. *光学学报*, 2022, 42(3): 0327018.
- LIU X CH, LI H G, SUN SH L, *et al.*. Bit error analysis and optimization of optical quantum communication system under turbulent channel[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(3): 0327018. (in Chinese).
- [21] WANG B H, MU J F. High-speed Si-Ge avalanche photodiodes[J]. *Photonix*, 2022, 3(1): 8.
- [22] 童启夏, 雷勇, 申向伟, 等. 实时激光通信自由运行 InGaAs/InP 单光子探测器 (特邀)[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(7): 0706014.
- TONG Q X, LEI Y, SHEN X W, *et al.*. Compact free-running InGaAs/InP single-photon detector for real-time space laser communication (invited)[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(7): 0706014. (in Chinese).
- [23] 向辛夷, 徐国宁, 贾忠臻, 等. 临近空间弱大气条件下激光无线能量信息同传研究[J/OL]. *北京航空航天大学学报*, (2025-12-09)[2026-01-05]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0303>.
- XIANG X Y, XU G N, JIA ZH ZH, *et al.*. Investigation on simultaneous laser information and power transfer in near-space under weak atmosphere[J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, (2025-12-09)[2026-01-05]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0303>. (in Chinese).

- [24] 陈牧. 无线光相干通信中的信道噪声及其对相干检测性能影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
CHEN M. *Research on channel on noise in wireless optical coherence communication and its effect on coherence detection performance*[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. (in Chinese).
- [25] 杨慧哲, 张贞钰, 刘进, 等. 基于投影光瞳分布的星地激光通信波前探测[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(7): 945-955.
YANG H ZH, ZHANG ZH Y, LIU J, *et al.*. Wavefront sensing for FSO systems based on projected pupil plane pattern[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(7): 945-955.
- [26] 李洪利, 刘欣悦, 杜博军, 等. 面向自由空间光通信波前校正的改进模拟退火算法[J]. *中国光学(中英文)*, 2025, 18(4): 784-793.
LI H L, LIU X Y, DU B J, *et al.*. Improved simulated annealing algorithm for wavefront correction in free-space optical communication[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(4): 784-793. (in Chinese).
- [27] ALOISIO A, GIORDANO R, IZZO V, *et al.*. A frequency agile, self-adaptive serial link on Xilinx FPGAs[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2015, 62(3): 955-962.
- [28] 闫夏超, 朱江, 张蜡宝, 等. 基于超导纳米线单光子探测器深空激光通信模型及误码率研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(19): 198501.
YAN X CH, ZHU J, ZHANG L B, *et al.*. Model of bit error rate for laser communication based on superconducting nanowire single photon detector[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(19): 198501. (in Chinese).

作者简介:



高子怡(1999—), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 2021年于长春理工大学获得学士学位, 现就读于长春理工大学攻读光学工程学术硕士学位, 主要从事激光通信方面的研究。E-mail: 1012480701@qq.com



董科研(1980—), 男, 博士, 教授, 2006年、2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士、博士学位, 主要研究方向为空间激光通信、计算光学、计算多光谱、新型成像探测系统设计等。E-mail: dongkeyan@cust.edu.cn