

单光子激光通信测距一体化系统设计*

胡春源 林玉洁 朱简尊 吴梓豪
(北京理工大学信息与电子学院 北京 100081)

摘要: 超导单光子探测技术能够实现光子量级极微弱光接收,是深空探测的关键技术之一,然而光子概率分布产生的脉冲抖动效应造成通信、测距性能恶化。对此,设计了基于脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM)调制的单光子激光通信测距一体化系统。根据光子分布特性,提出了脉冲宽度压缩的 PPM 新波形,降低了脉冲抖动效应对通信可靠性、测距精度的影响。同时,研制了星载端与地面端原理样机,搭建了双向通信与同步转发测距试验验证平台。试验验证结果表明,同等接收功率(-53.2 dBm)条件下,采用 1/4 脉宽压缩比时,通信接收误码率从 4.7×10^{-4} 降至 5×10^{-10} ,测距精度从 23.61 cm 提高至 0.91 cm,实现了高可靠通信传输与高精度距离测量。

关键词: 激光通信测距一体化;单光子探测;脉冲位置调制

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.604

Design of single-photon laser communication and ranging integration system

Hu Chunyuan Lin Yujie Zhu Jianzun Wu Zihao
(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Superconducting single photon detection technology can achieve extremely weak light reception at the photon level, which is one of the key technologies for deep space detection to achieve ultra-long distance reception. However, the pulse jitter effect caused by photon probability distribution deteriorates communication and ranging performance. In this paper, we design a single photon laser communication ranging integrated system based on pulse position modulation (PPM) modulation. A novel PPM waveform with compressed pulse width is proposed based on the distribution characteristics of photons, which can reduce the impact of pulse jitter on communication reliability and ranging accuracy. Meanwhile, prototypes of satellite and ground terminals are developed, and a bidirectional communication and synchronous forwarding distance measurement verification platform is built. The experimental verification results demonstrate that under the same receiving power (-53.2 dBm) conditions, when using a 1/4 pulse width compression ratio, the communication reception error rate decreases from 4.7×10^{-4} to 5×10^{-10} , and the ranging accuracy increases from 23.61 cm to 0.91 cm, achieving highly reliable communication transmission and high-precision distance measurement.

Keywords: integration of laser communication and ranging; single-photon detection; PPM

0 引言

未来空间活动对数据传输速率要求急剧增加,数据传输速率、测定轨精度和安全性要求不断提高。相对于微波链路,同等条件下激光链路能够大幅度降低航天器测控终端的体积、重量和功耗,显著降低发射成本^[1-3],已成为美

国星链、中国星网等卫星星座建设的核心通信手段之一。2022年美国宇航局利用 TBIRD 卫星实现星地下行 100 Gbps 激光通信,并于次年完成 200 Gbps 通信试验^[4];星链新一代卫星平台搭载激光通信终端计划实现 100 Gbps 数据传输。2023 年我国发射了卫星互联网技术试验卫星,并开展在轨激光通信技术验证^[5];2024 年长光

收稿日期:2024-02-02

* 基金项目:国家重点研发计划(2023YFF0717400)、国家自然科学基金(62001030)项目资助

卫星通过“吉林一号”星座的 01、02 号星实现了星间 100 Gbps 数据传输。

激光通信不仅具备高速通信能力,还可实现高精度测距^[6-7],通过通信测距一体化技术满足深空探测任务对高速信息传输与高精度轨道测量的需求。美国林肯实验室在月球激光通信演示验证项目中实现了月地下行 622 Mbps 通信与 3 cm 的测距误差^[8],中国在北斗三号导航卫星平台上完成了星间激光通信测距一体化技术试验,并计划在星网星座卫星上使用一体化技术。

激光通信包含相干调制解调、强度调制/直接探测(intensity modulation/direct detection, IM/DD)。其中相干光通信对光载波在幅度、相位维度进行信息调制,接收解调受激光线宽引入的相噪^[9]以及高速相对运动带来的多普勒影响。IM/DD 仅对光载波进行幅度调制,不受相位噪声及多普勒影响,且单光子探测技术极大提升了直接探测的灵敏度,使得 IM/DD 通信技术在深空探测领域得到广泛应用^[10-12]。文献[13]分析了单光子探测器恢复时间对脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM)系统误码率的影响,文献[14]分析了脉冲展宽对深空激光通信的影响,但均未考虑光子分布特性造成的响应随机抖动。文献[15]采用双脉冲间隔调制实现了双向通信与距离测量,但均缺少对单光子探测接收的研究。

深空探测远距离传输场景中,航天器发射的下行信号经空间损耗后衰减至单光子量级,本文采用超导纳米线单光子探测器(superconducting nanowire single-photon detector, SNSPD)^[16]实现高灵敏度探测接收,研制了激光通信测距一体化验证系统,完成了空间通信测量试验,验证了基于 PPM 调制与 SNSPD 探测的激光通信测距一体化技术。

1 激光通信测距一体化设计

1.1 调制方式

IM/DD 通信技术中信号探测仅需检测光信号的有无,不受载波多普勒的影响。基于 IM/DD 的调制方式包括开关键控(on-off key, OOK)、脉冲位置调制以及脉冲间隔调制(pulse interval modulation, PIM)等。表 1 为 3 种调制方式的主要特性,PIM 符号长度不固定,接收解调困难;OOK 频谱效率最高,但能量效率最低;PPM 能量效率最高,且随调制阶数的提高而增大,适合应用于深空远距离传输场景。

PPM 信号为:

$$s_j(t) = \sqrt{\frac{2^N}{T}} \text{rect}\left(\frac{t - jT/2^N}{T/2^N}\right) \quad j = 0, \dots, 2^N - 1 \quad (1)$$

式中: T 表示 PPM 信号的符号周期; N 表示一个符号包含的比特数; j 表示符号内脉冲所在的时隙位置;即 N 比特二进制信息对应的十进制数值。 $\text{rect}(t)$ 为矩形函数,定义为:

表 1 非相干通信方式比较

Table 1 Comparison of various incoherent modulation methods

调制方式	OOK	PPM	PIM
通信容量	C_b	$\frac{N}{2^N}C_b$	$\frac{2N}{2^N + 3}C_b$
信号带宽	R_b	$\frac{2^N}{N}R_b$	$\frac{2^N + 3}{2N}R_b$
比特能量	P_s/bit	$\frac{P_s}{N}/\text{bit}$	$\frac{P_s}{N}/\text{bit}$
符号长度	固定为 1	固定为 2^N	不固定, 平均为 $\frac{2^N + 3}{2}$

$$\text{rect}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

1.2 同步转发测距

激光通信测距一体化技术中的测距方法主要包括异步应答与同步转发测距^[17-18],前者需要在两个测量终端间建立严格同步的时间系统,基于相同时刻进行信号发送,并通过双端测距信息的汇总处理实现测距;后者不依赖于同步时间系统,地面端发起测距,星载端接收到测距信号后进行转发,地面端接收到转发信息后计算信号传输时延从而得到测距结果。深空探测任务中终端间时间同步精度低,因此采用同步转发测距方式,其信号传输时间测量原理如图 1 所示。

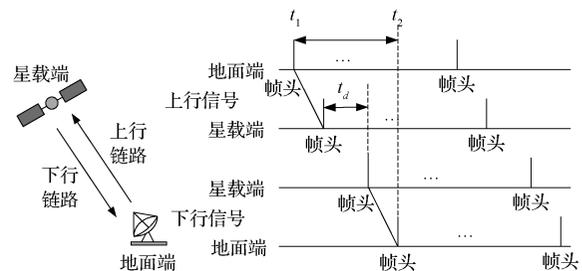


图 1 同步转发测距原理

Fig. 1 Principle of synchronous forwarding and ranging

令地面端到星载端链路为上行链路,星载端到地面端链路为下行链路。地面端通过上行链路发送测距帧数据至星载端,并使用本地时间系统记录测距帧帧头发送时刻 t_1 。星载端接收到上行测距帧信息后立即进行转发,转发时延 t_d 为恒定值通过系统校准消除,转发信号中携带与接收到的上行信号一致的动态信息,即可视上行测距信号在星载端反射回地面端。地面端使用本地时间系统记录下行信号中测距帧帧头达到时刻 t_2 ,从而得到测距帧经过上下行链路传输的时延,计算星载端与地面端的距离 d 为:

$$d = \frac{1}{2}c[(t_2 - t_1) - t_d] \quad (3)$$

式中： c 为光速， $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ 。

同步转发测距实现的难点在于星载端对上行信号的接收与精确转发，星载端信号接收与转发处理流程如图 2 所示，利用帧头的自相关特性对上行信号进行相关运算实现信号捕获，并使用超前滞后门与二阶环路实现信号跟踪与动态估计，得到上行信号的频率信息。根据计算得到的频率信息生成直接数字频率合成(direct digital frequency synthesis, DDS)芯片的频率控制字，从而产生与上行信号频率一致的时钟。基于 DDS 产生的动态恢复时钟，在捕获成功标志信号的触发下生成并发送下行信号，实现对上行信号的同频转发。

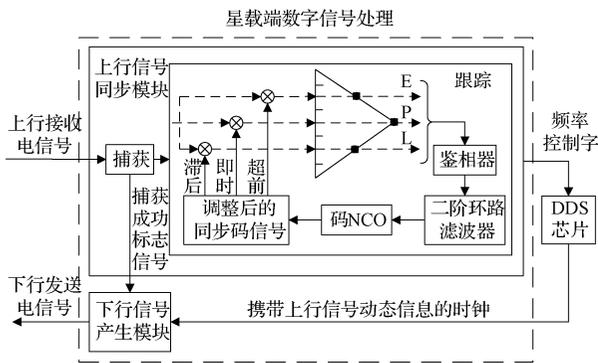


图 2 星载端信号接收与转发处理流程

Fig. 2 Spaceborne signal reception and forwarding process

由于 DDS 芯片生成的时钟精度影响信号转发的精度，进而影响地面端的测距精度。因此，若要实现厘米级测距精度，则转发精度应控制在毫米级。本文采用高性能 DDS 芯片 LMX2594，对时钟生成精度进行分析，其输入输出时钟之间的关系为：

$$\begin{cases} \frac{f_{wco}}{N + \frac{M}{2^{32} - 1}} = \frac{f_{in}}{k}, N \gg 1 \\ f_{out} = \frac{f_{wco}}{h} \end{cases} \quad (4)$$

式中： f_{in} 为输入参考时钟频率； k 为输入整数分频比； f_{wco} 为压控振荡器(voltage controlled oscillator, VCO)频率； N 为 VCO 整数分频比； M 为小数分频比分子； f_{out} 为 VCO 分频后输出时钟频率； h 为 f_{wco} 与 f_{out} 的整数分频比。输出时钟与输入时钟的频率关系为：

$$f_{out} = \frac{f_{in}}{kh} \left(N + \frac{M}{2^{32} - 1} \right) \quad (5)$$

故输出时钟频率的控制精度为：

$$f_{out} = \frac{f_{in}}{kh} \frac{1}{2^{32} - 1} \quad (6)$$

从而对应的速度动态转发控制精度为：

$$v = \frac{f_{out}}{f_{out}} c \approx \frac{c}{N(2^{32} - 1)} \quad (7)$$

通过分频比设计，使得 $N > 1\,000$ ，即 $v < 0.1\text{ mm/s}$ ，

满足转发精度需求。

2 针对光子分布特性的脉宽压缩方法

针对星载端发射功率受限的特点，下行光信号的探测转换采用 SNSPD，其在量子效率、探测灵敏度方面较光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)、盖革模式的雪崩光电二极管(Geiger-mode avalanche photodiode, GAPD)等光电探测器更具优势。PPM 调制 SNSPD 探测体制可以最大化信号能量效率，在发射功率一定时实现最远传输距离。

然而，当信号能量低至数光子时，由于光子在时隙时间内的概率分布，使单光子探测器探测输出响应脉冲的上升沿在符号内相对位置发生抖动，导致通信及测距性能下降。同时，单光子探测器本身的物理特性导致响应输出抖动，且存在响应死区时间问题^[19-21]。主要的单光子探测器典型参数如表 2 所示，可见 SNSPD 在抖动时间、死区时间及量子效率等方面具有显著优势，其响应波形如图 3 所示，呈现出快速上升缓慢下降的特点。器件本身引入的抖动时间相对死区时间可忽略不计，但光子随机分布于整个时隙范围内，造成的响应抖动最大为一个时隙周期，即响应脉冲可能出现在后一个时隙的位置，等同于误响应。这严重影响信号的定时恢复，需要尽可能减小光子随机分布造成的响应时间抖动。

表 2 单光子探测器典型参数

Table 2 Typical parameters of a single-photon detector

探测器类型	抖动时间 /ps	死区时间 /ns	通信速率 /MHz	量子效率 /%
PMT	0.3×10^3	数十	30	40
GAPD	50	100	10	65
SNSPD	50	10	100	95

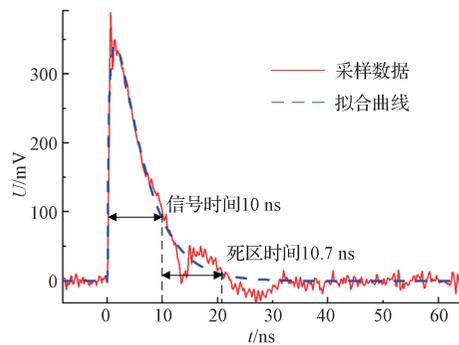


图 3 SNSPD 响应输出波形

Fig. 3 The SNSPD response output waveform

经远距离传输后信号能量衰减至单光子级别时，光子随机分布带来的探测响应时间随机抖动造成信号定时恢复困难，本文设计了基于脉冲宽度压缩的 PPM 调制激光通信测距一体化波形，在 PPM 信号生成时缩窄脉冲时隙

宽度,限制调制后光子可能出现的时间范围,进而缩小接收端响应信号的时间抖动,提高通信测距性能。PPM调制脉冲宽度压缩波形设计原理如式(8),结构示意图如图4所示。

$$s_j(t) = \frac{1}{\sqrt{2^N M_1}} \text{rect}\left(\frac{t - j \frac{T}{2^N}}{\frac{T M_2}{2^N M_1}}\right), M_2 \leq M_1 \quad (8)$$

式中: M_1 为信号发送时的过采样倍数,即 PPM 时隙可进一步划分的份数; M_2 为压缩后脉冲时隙中高电平所占份数,定义 M_2/M_1 为压缩比。

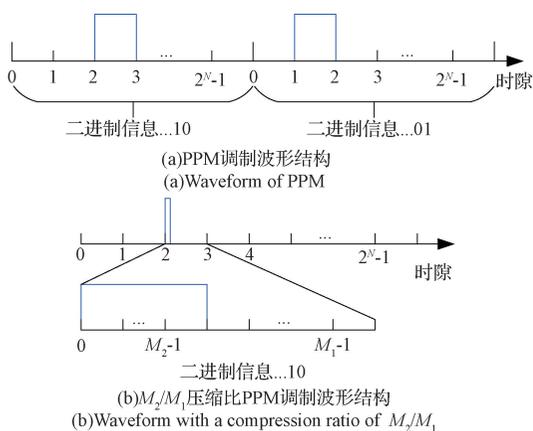


图4 PPM调制及脉冲宽度压缩波形结构

Fig. 4 Waveform of PPM and pulse-width compression-PPM

由图4可知,压缩后的脉冲宽度为压缩前的 M_2/M_1 ,根据强度调制原理,调制后仅在高电平区域存在光信号,即光子出现的时间范围为 $jT/2^N \sim jT/2^N + M_2/M_1 \cdot T/2^N$, M_2 越小,光子分布区间越小, SNSPD 探测响应脉冲的时间抖动越小,从而提高通信性能及测距精度。

3 仿真结果分析

通过以上分析可知采用脉冲宽度压缩算法设计 PPM 调制波形后,可减小因光子随机分布导致的系统性能损失。为定量分析脉冲宽度压缩比例对系统性能的影响,采用 16PPM 调制方式(即每符号包含 4 bit 信息,对应 $2^4 = 16$ 个时隙),时隙速率 100 Mslot/s,假设光子在时隙内均匀分布,对不同压缩比与信噪比 E_b/N_0 下的误码率及测距标准差进行蒙特卡洛仿真,不同压缩比下的误码率曲线仿真结果如图5所示、测距标准差曲线如图6所示。

由图5可以看出,信号功率衰减至单光子量级时,光子随机分布造成的探测响应抖动,导致误码率与测距标准差与 E_b/N_0 的曲线出现平台现象,造成系统性能的极大损失。采用脉冲宽度压缩算法后,压缩后脉宽占比越小,误码率越低,测距标准差越小。在误码率为 2×10^{-6} 时,压缩比 1/8 较压缩比 3/8 提升 1.8 dB,较压缩比 2/8 提升 0.5 dB。

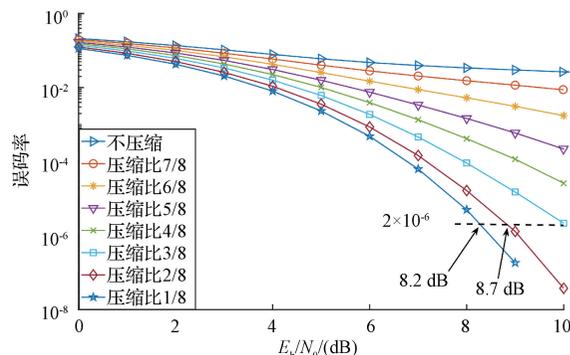


图5 16PPM调制不同压缩比下误码率曲线

Fig. 5 Bit error rate of 16-PPM with different compression ratios

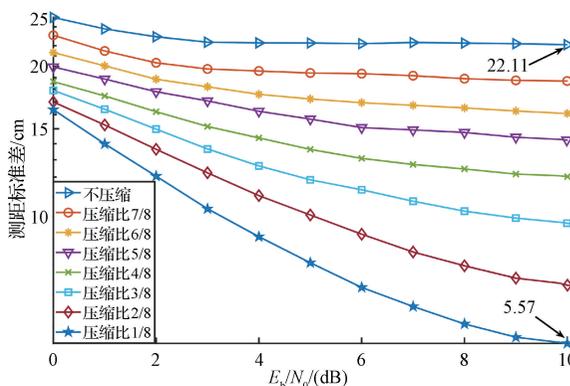


图6 16PPM调制不同压缩比下测距标准差曲线

Fig. 6 Ranging error of 16-PPM with different compression ratios

由图6可知,信噪比较低时,噪声对测距精度的影响大于光子随机分布的影响,随着信噪比的增大,光子随机分布的影响逐渐成为主导因素,在 $E_b/N_0 = 10$ dB 时,压缩比 1/8 的测距标准差相较于不压缩时的 22.11 cm 减小至 5.57 cm,减小了 16.54 cm,测距性能显著提升。

4 验证平台与实测结果

4.1 系统组成

为验证本文提出的激光通信测距一体化方案与脉冲宽度压缩方法,搭建了基于 PPM 调制单光子探测激光通信测距一体化平台如图7所示。系统由地面端及星载端原理样机组成,两个原理样机由基带与控制交互模块、激光调制探测模块以及光学天线模块组成。基带与控制交互模块包含基带信号处理板卡与主控计算机及显示器,完成 PPM 调制基带信号的产生发送与采样接收。激光调制探测模块实现基带信号对激光载波的 PPM 调制,受限于 SNSPD 的数量并考虑其体积重量无法满足星载轻量化要求,故星载端采用小型化 GAPD 进行光信号探测, SNSPD 配置于地面端。光学天线模块用于激光信号的发射与接收。

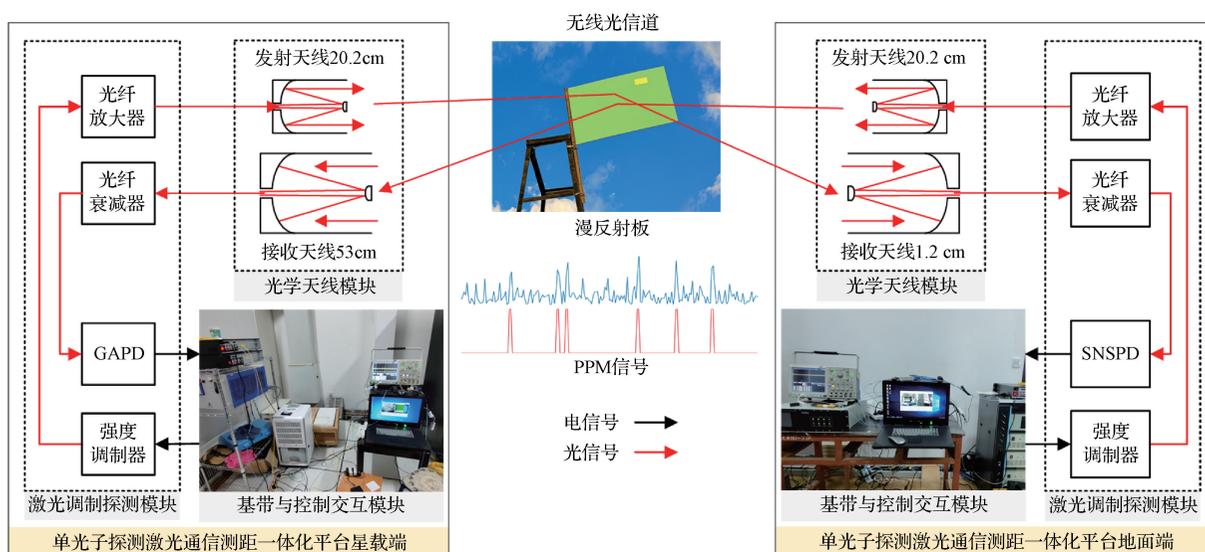


图7 基于PPM调制与单光子探测的激光通信测距一体化平台

Fig. 7 Integrated platform for laser communication ranging based on PPM and single-photon detection

系统采用收发天线分离结构,地面端星载端发射天线口径均为 20.2 cm,地面端接收天线口径为 1.2 m,星载端接收口径为 53 cm,激光波长为 1 550 nm。地面端星载端分别放置于相距约 140 m 的望远镜机房,通过在两机房间以三角形状放置漫反射板实现双向链路的建立。

使用人机交互软件控制基带信号的发送与接收,采用低密度奇偶校验码提升系统通信能力,PPM 信号通过现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)生成并通过数模转换器(digital to analog converter, DAC)实现数字信号转换为模拟信号,经激光强度调制器进行激光载波调制。为满足空间传输功率需求,使用光纤放大器将强度调制器输出的低功率调制信号进行放大,经发射望远镜发射。激光信号经过空间传输以及漫反射板反射后进入接收天线,通过耦合光路将空间光信号耦合进入光纤。调节光纤放大器输出功率控制接收端光纤功率满足探测需求,并使用光纤衰减器精确控制 GAPD、SNSPD 的输入功率。GAPD、SNSPD 探测输出的响应信号经基带与控制交互模块内的模数转换器(analog to digital converter, ADC)转换为数字信号,通过 FPGA 进行数字信号处理实现信号接收解调,以及误码率统计、距离测量功能,并通过人交互界面实现数据可视化。

星载端基带处理板卡硬件组成如图 8 所示,采用 ADI 公司 AD9211 ADC 芯片及 AD9726 DAC 芯片实现模拟信号与数字信号的相互转换,芯片与 Xilinx 的 FPGA XC7K325T 之间通过 LVDS 差分电平进行数字信号可靠传输。板卡的时钟系统包含板载晶振为 FPGA 提供自启动配置时钟、ADF4355 时钟分配芯片进行时钟分发、DDS 芯片 LMX2594 根据 FPGA 接收算法得到的频率控制字生成转发算法工作时钟及 DAC 的采样时钟。

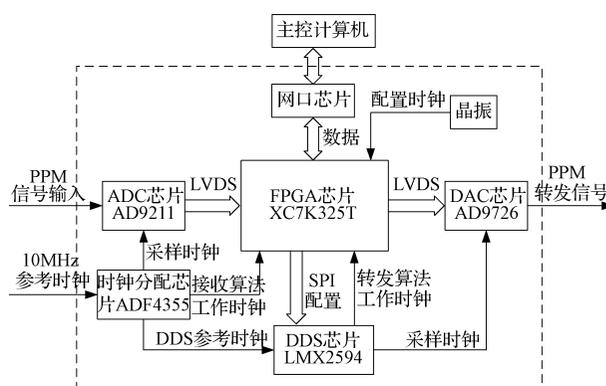


图8 星载端基带处理板卡硬件组成

Fig. 8 Spaceborne processing hardware for baseband

4.2 测试结果

经测试,发射功率为 1 W 时接收端经接收天线后即可接收到足够的光功率,通过光纤衰减器对单光子探测器的输入信号功率进行衰减,探测输出信号如图 9 所示。考虑第 3 节中不同脉冲宽度压缩比的误码率及测距精度表现,并结合基带与控制模块中 DAC 硬件采样率限制,星载端兼容不压缩与 1/4 压缩比。

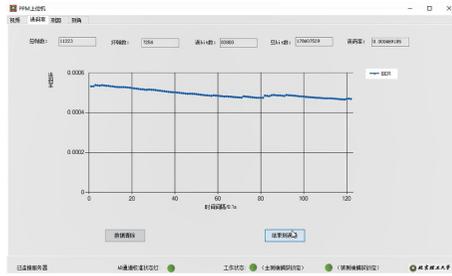


图9 单光子探测器探测输出信号

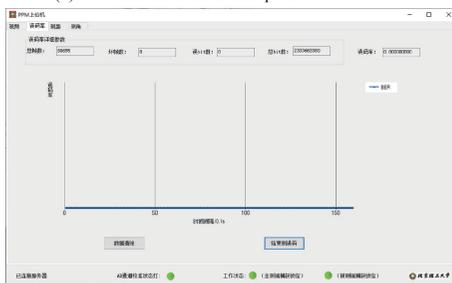
Fig. 9 The output waveform of single-photon detector

地面端探测功率调节为 -53.2 dBm,星载端发送信号脉冲宽度不压缩时,地面端在统计时间段内得到接收误

码率测量结果为 4.7×10^{-4} , 如图 10(a) 所示, 100 s 内的测距标准差为 23.61 cm, 如图 11(a) 所示; 星载端发送信号脉冲宽度切换至 1/4 压缩比, 地面端在统计时间内未出现误码, 误码率优于 5×10^{-10} , 如图 10(b) 所示, 统计 100 s 内的测距标准差为 0.91 cm, 如图 11(b) 所示。



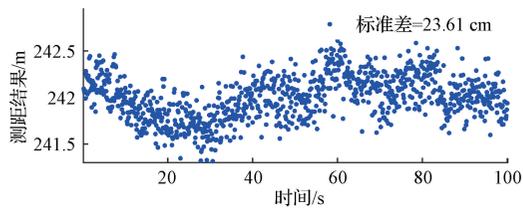
(a) 脉冲宽度不压缩
(a) Bit error rate with uncompressed modulation



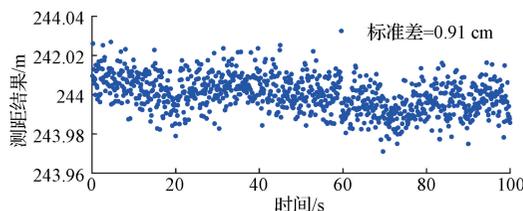
(b) 脉冲宽度压缩比为 1/4
(b) Bit error rate with a compression ratio of 1/4

图 10 接收误码率测试结果对比

Fig. 10 Comparison of bit error rate results at the receiver



(a) 脉冲宽度不压缩
(a) Ranging error with uncompressed modulation



(b) 脉冲宽度压缩比为 1/4
(b) Ranging error with a compression ratio of 1/4

图 11 测距结果对比

Fig. 11 Comparison of ranging results

表 3 为本文脉宽压缩前后的测距误差统计结果, 以及文献[10, 12, 15, 18]的测试结果, 可以看到光子随机分布导致了较大的测距误差, 经脉宽压缩后测距性能提升到与文献[12, 18]相同水平, 优于文献[10, 15]。

表 3 测距误差对比

Table 3 Comparison of ranging error

方法	测距误差/cm
本文(脉宽不压缩)	23.61
本文(压缩比 1/4)	0.91
文献[10]	3
文献[12]	0.91
文献[15]	2.16
文献[18]	0.62

以上测试及对比结果表明, 基于 PPM 调制与单光子探测的激光通信测距一体化平台采用同步转发原理成功实现了数据通信与距离测量的一体结合, 验证了使用 SNSPD 进行单光子量级信号探测接收时, 脉冲宽度压缩后有效的提高了平台的通信与测距性能。

5 结论

随着空间探索活动、高速数据传输需求的日益增长, 激光通信测距一体化技术在通信速率、能量效率、体积重量、测定轨精度方面的突出优势使其极具研究与应用价值。本文研究了 IM/DD 体制下基于 PPM 调制与 SNSPD 探测接收的同步转发激光通信测距一体化技术, 并针对光子随机分布造成的信号抖动问题, 提出了基于脉冲宽度压缩的 PPM 调制激光通信测距一体化波形设计方法, 搭建了激光通信测距一体化平台, 完成了地面漫反射双向通信测距试验, 为单光子探测技术与激光通信测距一体化技术的结合应用提供技术基础。成果可应用于月球探测、火星探测等深空应用, 进而实现高数据传输速率、高测距精度、高时频传递精度、高安全性的深空激光统一测控。

参考文献

- [1] 张家铭. 卫星激光通信网络研究进展[J]. 光通信技术, 2023, 47(5): 37-44.
ZHANG J M. Research progress of satellite laser communication network[J]. Optical Communication Technology, 2023, 47(5): 37-44.
- [2] 李锐, 林宝军, 刘迎春, 等. 激光星间链路发展综述: 现状、趋势、展望[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(3): 125-139.
LI R, LIN B J, LIU Y CH, et al. Review on laser intersatellite link: Current status, trends, and prospects[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(3): 20220393.
- [3] CHEN J, HUANG Y, CAI R, et al. Free-space communication turbulence compensation by optical phase conjugation[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(5): 1-11.

- [4] SCHIELER C M, BILYEU B C, CHANG J S, et al. Recent on-orbit results and ARQ performance analysis for the TBIRD 200 Gbps mission [C]. IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, 2023.
- [5] 李锐, 林宝军, 刘迎春, 等. 激光星间链路发展综述: 现状、趋势、展望[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(3): 133-147.
- LI R, LIN B J, LIU Y CH, et al. Review on laser intersatellite link: Current status, trends, and prospects[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(3): 133-147.
- [6] BOROSON D M, ROBINSON B S, MURPHY D V, et al. Overview and results of the lunar laser communication demonstration[C]. Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI, 2014.
- [7] 黄龙安, 陈荣. 无线光通信中组合脉冲位置调制的差错性能分析[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(12): 40-43.
- HUANG L A, CHEN R. Analysis of error performance for FCPM in optical wireless communication[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(12): 40-43.
- [8] 刘小虎, 彭天亮. 大气湍流信道激光通信系统传输性能研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(3): 40-44.
- LIU X H, PENG T L. Study on transmission performance of laser communication system in atmospheric turbulent channel[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(3): 40-44.
- [9] 郑贤, 周帅, 时慧. 小型化低成本频率合成器设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(6): 82-86.
- ZHENG X, ZHOU SH, SHI H. Design of miniaturized low-cost frequency synthesizer [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(6): 82-86.
- [10] 陶坤宇, 付森, 杨奇, 等. 基于 IM/DD 体制的星间激光通信测距技术[J]. 遥测遥控, 2022, 43(4): 113-118.
- TAO K Y, FU S, YANG Q, et al. Research on laser communication and ranging based on IM/DD mode[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(4): 113-118.
- [11] 李晓亮, 刘荣科, 王建军, 等. 基于单光子探测器的深空激光通信阵列[J]. 光学精密工程, 2022, 30(13): 1534-1541.
- LI X L, LIU R K, WANG J J, et al. Deep-space laser communications telescope array based on single photon detector [J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(13): 1534-1541.
- [12] 汪逸群, 汪精华, 王阔. 基于 OOK 体制空间光非相干测距通信系统设计与实现[J]. 微电子学与计算机, 2023, 40(8): 64-72.
- WANG Y Q, WANG J H, WANG K. Design and implementation of OOK-based spatial optical incoherent ranging communication system [J]. Microelectronics & Computer, 2023, 40(8): 64-72.
- [13] 李晓亮, 刘荣科, 王岩, 等. 基于单光子探测器恢复时间的误码率分析[J]. 遥测遥控, 2023, 44(1): 15-21.
- LI X L, LIU R K, WANG Y, et al. Analysis of BER model of single-photon detector recovery time [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(1): 15-21.
- [14] 赵卓, 刘向南, 王建军, 等. 脉冲展宽对深空激光通信的影响与补偿研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(4): 56-61.
- ZHAO ZH, LIU X N, WANG J J, et al. Analysis of pulse broadening effect and compensation on deep space laser communication system [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(4): 56-61.
- [15] TAO M, GUAN J, PENG T, et al. Simultaneous realization of laser ranging and communication based on dual-pulse interval modulation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-10.
- [16] 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): 312-319.
- 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.
- [17] 李梦思, 湛明, 张靓, 等. 基于码元同步环路的激光测距通信一体化算法优化研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(3): 103-108.
- LI S M, CHEN M, ZHANG L, et al. Research on the optimization of the integrated algorithm of laser ranging and communication based on the symbol synchronization loop [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(3): 103-108.
- [18] 朱宏权, 邢强林, 傅一文, 等. 基于 OOK 体制的激光统一测控系统设计与实现[J]. 北京理工大学学报, 2022, 43(3): 103-108.

- 2020, 40(11): 1203-1206.
- ZHU H Q, XING Q L, FU Y W, et al. Design and realization of OOK-based unified laser TT&C system[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(11): 1203-1206.
- [19] KOSMAN J, MOORE K, HAAS H, et al. Distortion losses of high-speed single-photon avalanche diode optical receivers approaching quantum sensitivity [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2020, 378(2169): 20190194.
- [20] MENG X, CUNNINGHAM D G, WHITE I H, et al. Spad-array contention signal and noise model suitable for multilevel modulation schemes with signal processing[J]. IEEE Access, 2021, 9: 48483-48500.
- [21] LI B, LIU Y, TONG S, et al. BER analysis of a deep space optical communication system based on SNSPD over double generalized gamma channel[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(5): 1-7.

作者简介

胡春源, 博士研究生, 主要研究方向为激光通信、数字信号处理、高速调制解调等。

E-mail: chunyuanyuan@bit.edu.cn

林玉洁(通信作者), 博士, 实验师, 主要研究方向为激光通信、扩频通信、通信测距一体化等。

E-mail: linyujie@bit.edu.cn

朱简尊, 硕士研究生, 主要研究方向为卫星通信信号处理。

E-mail: zhujianzun@bit.edu.cn

吴梓豪, 硕士研究生, 主要研究方向为激光通信、测距等。

E-mail: wuzihao@bit.edu.cn