

四象限探测器的跟踪与通信复合探测技术

范新坤^{1,2}, 张 磊¹, 宋延嵩¹, 江 伦¹, 吴 凯^{1,2}

¹ 长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022;

² 长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

摘要 针对空间激光通信系统小型化设计的需求,提出了使用雪崩二极管(APD)型四象限探测器实现跟踪与通信复用的方案,用以降低通信系统的体积和功耗,提高光能量的利用率。简述了系统总体方案的组成与工作原理,在室内搭建测试平台,对跟踪与通信复用模式下的数据采集、通信速率、极限灵敏度、跟踪精度等探测性能进行测试。结果表明:采用靶面直径为 4 mm 的 APD 型 InGaAs 四象限探测器,在曼彻斯特编码、强度调制/直接探测条件下,通信速率可达 10 Mb/s,探测灵敏度为 -35.4 dBm,误码率为 10^{-6} 。当光斑直径为四象限探测器光敏面直径的一半左右时,光斑位置检测的最小分辨率为 $2 \mu\text{m}$,探测范围可达 0.8 mm,角分辨率为 $0.8 \mu\text{rad}$ 。初步验证了使用 APD 型四象限探测器用于跟踪与通信复合探测技术的可行性,为空间激光通信系统小型化设计提供技术支持。

关键词 光通信; 四象限探测器; 跟踪与通信复合; 信噪比

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0906009

Simultaneous Detection Technology of Tracking and Communication Based on Four-Quadrant Detector

Fan Xinkun^{1,2}, Zhang Lei¹, Song Yansong¹, Jiang Lun¹, Wu Kai^{1,2}

¹ Institute of Space Optoelectronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² Defence Key Subject Laboratory of Aero and Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Aiming at the space laser communication system requirement of miniaturization, a scheme of using the avalanche photo diode (APD) type four-quadrant detector to complete the tracking and communication is proposed. This communication system could effectively reduce the volume and power consumption and improve the light energy utilization. The overall scheme of composition and working principle are introduced, the experiment is established in laboratory, and the detection performance which includes data collection, communications rate, limiting sensibility, tracking accuracy is tested. Experimental results show that by use of the APD type InGaAs four-quadrant detector with photosensitive surface diameter of 4 mm, the communication rate is 10 Mb/s, the detection sensitivity is -35.4 dBm and the bit error rate is 10^{-6} under conditions of Manchester code, intensity modulation/direct detection. The minimum position resolution of the spot position detection is $2 \mu\text{m}$, the detecting range of QD is about 0.8 mm, and the angular resolution is $0.8 \mu\text{rad}$ while the diameter of light spot is about half of the diameter of the photosensitive surface. The feasibility of using the APD type four-quadrant detector for simultaneous tracking and communication is demonstrated, which provides technical support for design of the whole space laser communication system requirement of miniaturization.

Key words optical communications; four-quadrant detector; simultaneous tracking and communication; signal noise ratio

OCIS codes 060.4510; 060.2605

收稿日期: 2017-04-17; **收到修改稿日期:** 2017-05-31

作者简介: 范新坤(1990—),男,硕士研究生,主要从事空间激光通信系统高精度激光光斑识别与检测技术方面的研究。

E-mail: fxxk0823@163.com

导师简介: 张 磊(1982—),男,博士,讲师,硕士生导师,主要从事复杂条件下目标识别与检测技术方面的研究。

E-mail: zhanglei004171@163.com(通信联系人)

1 引 言

空间激光通信是以激光为载体进行数据传输的,具有体积小、功耗低、保密性好、通信速率快等优点,广泛应用于星间和星地等链路中^[1-2]。典型空间激光通信系统在建立通信链路前,需要控制光端机完成信标光的捕获、瞄准和跟踪(APT)任务^[3-4]。在整个系统设计中分别需要跟踪与通信探测器来完成以上任务,增加了通信系统的体积和功耗。因此,跟踪与通信复合探测技术是小型化激光通信系统发展的必然趋势。刘仕辉^[5]通过分析复合探测技术的要求,设计并验证了采用PIN型四象限探测器(QD)用于跟踪与通信复合探测的可行性。谷野等^[6]论述了跟踪与通信复合探测中期实验情况,主要讨论了系统的总体设计,通过优化选取通信信号提高了系统信噪比(SNR)。

本文在总结和分析这些实验进展的基础上,通过优化复合探测技术的方案,采用雪崩二极管(APD)型InGaAs四象限探测器,对系统的设计与参数进行了详细的分析;最后通过室内实验,在曼彻斯特编码、强度调制/直接探测(IM/DD)条件下,得到了通信速率为10 Mb/s,探测灵敏度为-35.4 dBm,误码率(BER)为 10^{-6} 的技术指标,初步验证了四象限探测器在低速率通信条件下跟踪与通信复合探测技术的可行性,为空间激光通信系统小型化和低功耗设计提供了技术支持。

2 四象限探测器跟踪与通信复合探测原理

2.1 四象限探测器的跟踪原理

四象限探测器的本质是四个独立且性能几乎完全一样的光电二极管按照平面直角坐标系排列而成,通过检测光电流的大小,解算出光斑的坐标信息,为伺服单元提供脱靶量^[7]。如图1所示,假设光斑在QD上的形状为圆形,能量分布服从均匀分布,且光斑覆盖四个象限。根据各象限中的光功率与该象限中光斑面积成正比,得到光斑在QD光敏面上的相对偏移量 $\Delta x, \Delta y$,即

$$\Delta x = K_x \frac{(S_A + S_D) - (S_B + S_C)}{S_A + S_B + S_C + S_D} = K_x \frac{(P_A + P_D) - (P_B + P_C)}{P_A + P_B + P_C + P_D} = K_x \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D}, \quad (1)$$

$$\Delta y = K_y \frac{(S_A + S_B) - (S_C + S_D)}{S_A + S_B + S_C + S_D} = K_y \frac{(P_A + P_B) - (P_C + P_D)}{P_A + P_B + P_C + P_D} = K_y \frac{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D}, \quad (2)$$

式中 S_A, S_B, S_C, S_D 分别表示光斑分布在四个光敏面上的面积; P_A, P_B, P_C, P_D 分别表示光斑在四个光敏面上所接收到的光功率, I_A, I_B, I_C, I_D 分别表示四个光敏面上产生的响应电流, K_x 和 K_y 分别为QD在 x 轴和 y 轴方向上的检测灵敏度。信号光以 $\Delta\theta$ 沿 z 轴入射,经焦距为 f' 的光学系统会聚到QD光敏面上形成光斑,光斑中心 o' 相对于QD中心 o 的偏移量为 Δx 和 Δy 。 $\Delta\theta_x$ 为通信光束在 xoz 平面的角度分量, $\Delta\theta_y$ 为通信光束在 $yo z$ 平面的角度分量。其中 $\Delta\theta, \Delta\theta_x, \Delta\theta_y$ 可表示为

$$\Delta\theta = \arctan(\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} / f'), \quad (3)$$

$$\Delta\theta_x = \arctan(\Delta x / f'), \quad (4)$$

$$\Delta\theta_y = \arctan(\Delta y / f'). \quad (5)$$

根据解算后的光束的偏转方位角和俯仰角,控制振镜偏转相应的角度,实现光斑的闭环跟踪。

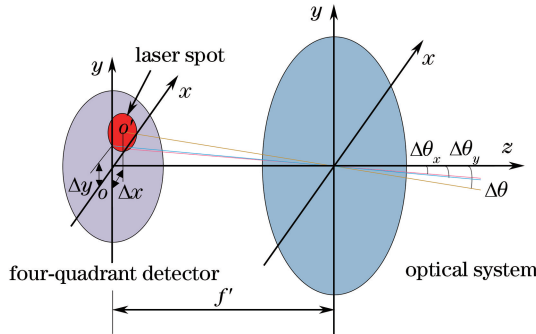


图1 光束偏转角度与偏移量的关系

Fig. 1 Relationship between the deflection of light beam and position offset

2.2 四象限探测器的通信原理

四象限探测器根据信号光在每个光敏面上的光功率,输出相应光电流,经跨阻放大器(TIA)转换成电压信号。将四通道电压合并进入加法求和电路得到模拟电压总和,再经过单端转差分电路进入时钟与数据恢复(CDR)电路把时钟和数据恢复出来,完成信号的解调。

图2为四象限探测器的通信原理示意图。空间激光通信在传输过程中,受大气湍流、吸收、散射等因素的影响,使激光束能量衰减,接收信噪比下降,严重影响系统通信性能。为了减小能量损耗,降低噪声对通信系统的影响,采用分集接收技术,有效提高接收信号的能量,改善通信系统的性能。

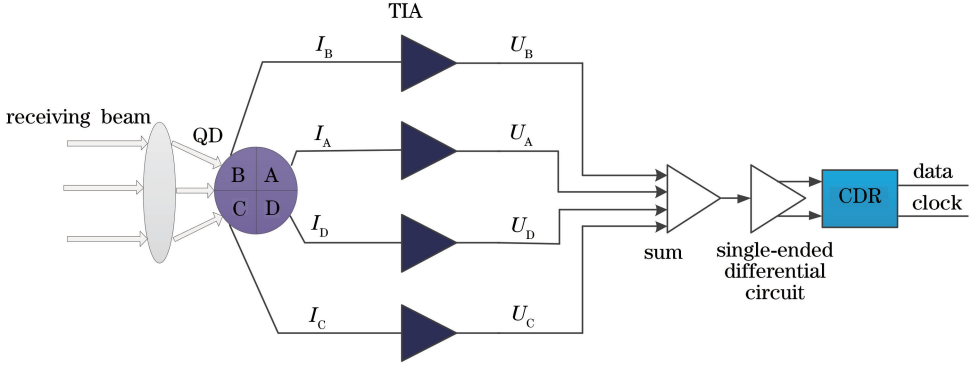


图2 QD的通信原理

Fig. 2 Communication principle of QD

目前,应用在探测器的分集接收合并技术主要有:选择式合并分集接收(SC)、最大比值合并分集接收(MRC)、等增益合并分集接收(EGC),三种分集接收合并方式在提高通信系统性能方面各有优缺点。SC比较四个象限的信号,选择一条信噪比最高的信号作为输出,忽略了其他象限的信号,造成接收信号的能量较弱,该方法主要应用在光斑偏离光敏面中心,只落在某一象限或某两个象限之间的情况。MRC根据接收到的四路信号的信噪比,选择不同的加权因子实现最佳合并,该技术对信号的改善效果最明显,但是算法相对复杂,在硬件上较难实现,不适合空间激光通信系统。EGC要求光斑均匀落在四个象限上,采用相同增益系数对四条支路分别进行处理,获得最大的信号能量,提高接收信噪比,其改善效果仅次于MRC。

针对三种分集合并方式对信噪比提高的程度,利用Matlab仿真分析了四象限探测器分集数量与信噪比关系,如图3所示。从图3可以看出,相较于无分集接收,三种分集接收合并技术都在一定程度上提高了信噪比,MRC对信噪比的改善能力最为显著,SC效果最差。当光斑落在四个象限即分集数 N 为4时,SC、EGC和MRC对信噪比的提高能力分别为3.19 dB、5.26 dB和6.02 dB,即通信系统采用分集技术,SC对信号的能量提高了8%,EGC提高了35%,MRC提高了99.9%。

图4为分集数 N 为2和4时三种分集合并方式及无分集(NC)时的信噪比与误码率的关系曲线图。可以看出,在信噪比一定的情况下,光斑分布在两个象限即 $N=2$ 时,无分集时的误码率最大,MRC误码率最

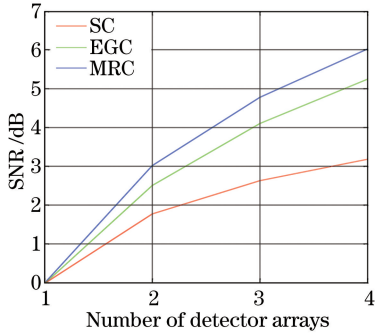


图3 三种合并方法的性能对比

Fig. 3 Performance comparison of three consolidation methods

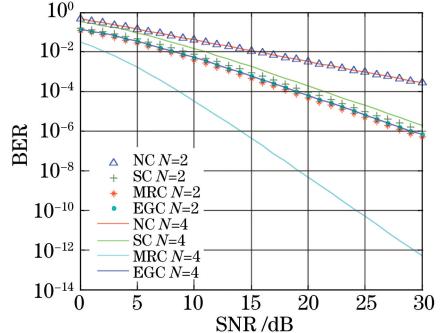


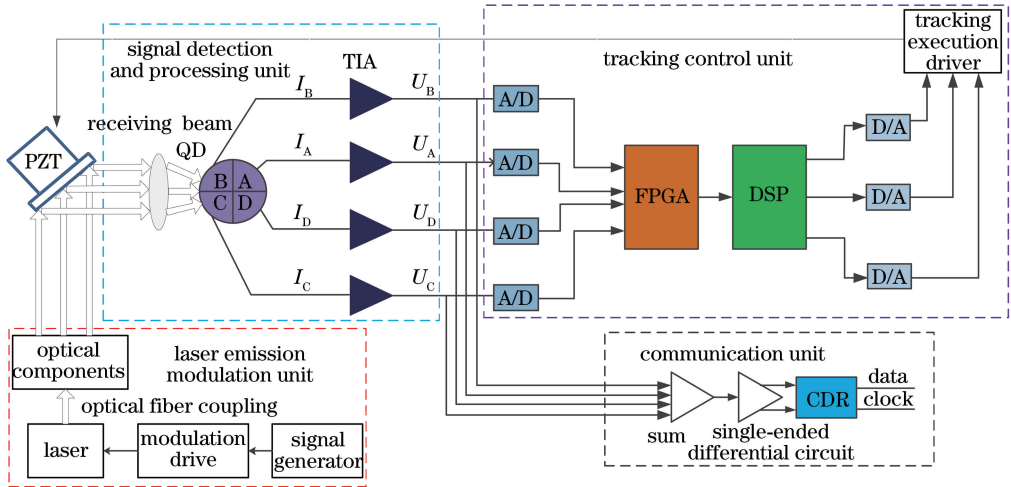
图4 不同分集数下信噪比与误码率的关系

Fig. 4 Relationship between signal noise ratio and bit error rate under different diversities

小;光斑分布在四个象限即 $N=4$ 时, MRC 相比于 $N=2$ 时的曲线下落速度最快, 表明 MRC 对提高信噪比和改善通信性能方面最有效。分析图 3、4 发现, MRC 对信噪比的提高和通信系统误码率的降低, 都优于 SC 和 EGC, 综合考虑空间激光通信对误码率和算法实现的难易程度, 选择较易于实现的 EGC 也可得到通信的要求。

2.3 四象限探测器的跟踪与通信复合原理

四象限探测器的跟踪与通信复合探测原理如图 5 所示, 由激光调制发射单元、光电转换探测及前端放大处理单元、跟踪控制单元和通信单元四部分组成。激光器经数据信号发生器调制后产生已调光信号, 经光纤耦合至光纤准直镜发出, 在整形透镜(变成近似的平行光)、光衰减片、光阑、窄带滤光片等光学组件作用下使信号光照射在压电陶瓷(PZT)振镜, 激光光束经 45° 反射后被接收光学天线接收, 经透镜会聚在探测器的光敏面上。QD 探测器根据各象限接收到的光能量产生相应的光电流, 在放大处理单元作用下输出电压信号。为了实现跟踪与通信的复合, 将放大后的信号分为两路, 分别送入跟踪单元和通信单元。跟踪单元主要实现光斑在 x 轴和 y 轴偏移量的解算和驱动振镜偏转, 进行闭环跟踪控制, 完成对光斑的实时跟踪^[8-9]。通信单元将四个象限的电压信号经过模拟加法求和得到信噪比增强的通信信号, 经过单端转差分电路进入时钟数据恢复(CDR)芯片后实现数据和时钟恢复。采用曼彻斯特编码, 不会造成光功率的变化, 可以同时实现跟踪与通信的复合探测。



DSP: digital signal processing; A/D: analog to digital conversion; D/A: digital to analog conversion; FPGA: field programmable gate array

图 5 跟踪与通信复合探测工作原理

Fig. 5 Working principle of simultaneous tracking and communication

3 测试系统组成

为了验证利用 QD 探测器实现跟踪与通信复合探测的可行性, 在实验室内搭建相关实验平台, 采用 800 nm 通信光在曼彻斯特编码、强度调制/直接探测条件下, 分别对跟踪和通信单元进行测试, 图 6 为跟踪与通信复合探测系统方案。

实验中探测器选用 QA4000-10 型 APD 四象限探测器(First Sensor 公司), 其靶面直径为 4 mm, 在波长 800 nm 处的光谱响应度为 52 A/W, 探测器的 -3 dB 带宽为 70 MHz。探测器的反向偏压由 MOD501385 模块提供, 控制输出电压为 225 V, 此时探测器倍增因子 M 可达到 100。QD 探测器接收到的光信号十分微弱, 输出响应光电流较小, 不利于后续电路处理。根据带宽和增益要求, 采用跨阻放大器对每个象限的电流信号进行放大。跨阻放大器选用 MAX3806GTC+(Maxim 公司), 电流线性范围为 42 nA~40 μ A, 动态范围可达 59 dB。通过芯片 GAIN 引脚设置跨阻增益为 60 k Ω , 得到放大电路的输出电压范围 2.5 mV~2.4 V, 满足时钟数据恢复芯片 ADN2817 输入电压的要求。光电流经跨阻放大后的电压信号分为两条支路。一路信号利用电压值通过(1)、(2)式计算光斑偏移量, 再经过(3)~(5)式计算光斑在方位、俯仰方向上的脱靶量, 然后通过解算得到的驱动电压值, 控制振镜偏转, 实现跟踪的目的; 另外一路信号经 OPA656 加

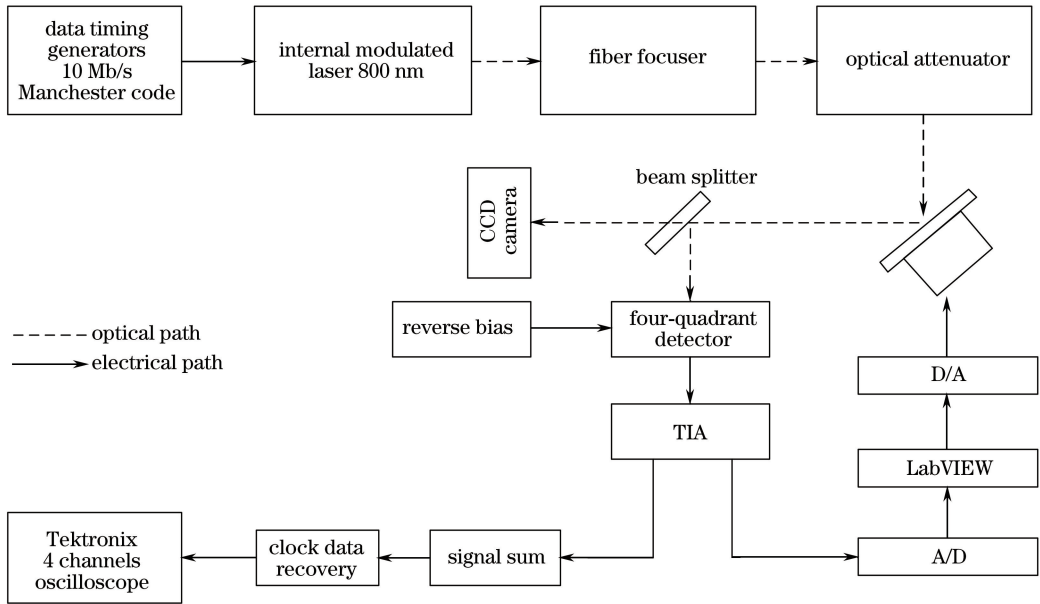


图 6 跟踪与通信复合探测系统

Fig. 6 Simultaneous tracking and communication system

法器对每个象限的信号求和,通过单端转差分电路输入到 ADN2817 时钟数据恢复芯片,提取接收位同步时钟,并对数据信号重新采样,抑制抖动和噪声,恢复规范波形的原数据信号。激光器的调制速率为 10 Mb/s,采用曼彻斯特编码方式,实验中用示波器对信号进行采集,主控计算机通过 USB 接口与示波器连接,利用 LabVIEW 软件采集四路波形数据,进行光斑质心计算,显示光斑的位置^[10]。

4 实验数据分析

本实验在室内进行,忽略大气信道和背景光的影响,保证入射光斑均匀分布在四个象限中,防止出现某些象限没有光斑的情况^[11]。利用示波器分别记录四个象限单独照射时的信号幅值,当检测到的信号幅值小于最大值的 1/5 时,认为噪声已经远大于信号。此时,如果继续利用该数值作为通信信号,将严重影响光斑检测精度,降低系统信噪比。因此,要严密监控光斑在 QD 探测器中的位置,优化选取通信信号。根据对跟踪单元和通信单元测试得到的最终参数,验证了该系统的可行性。

4.1 跟踪单元测试

通过调整光阑,控制光斑大小为 QD 光敏面尺寸的 1/2,即光斑直径 $D=2\text{ mm}$ 。驱动振镜以 $10\ \mu\text{rad}$ 步长进行连续偏转,照射到 QD 的光束偏转角度步长为 $20\ \mu\text{rad}$,光学成像系统的焦距为 100 mm,此时光斑在 QD 光敏面上的位置偏移量为 $2\ \mu\text{m}$ 。图 7 为归一化后 QD 的细分能力曲线。在振镜连续偏转中,归一化后最小输出为 0.005 左右,从细分能力角度看,整个探测区域实现 400 细分,可测量范围为 0.8 mm。在空间激

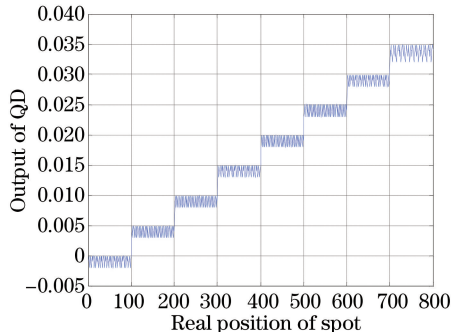


图 7 细分能力测试曲线

Fig. 7 Test curve of subdividing ability

光通信系统中,一般要求光斑检测精度优于 $1 \mu\text{rad}$,如果使用焦距是 2 m 的卡塞格林望远系统,则角度分辨率为 $0.8 \mu\text{rad}$,完全满足通信系统的要求^[12-13]。

4.2 通信单元测试

利用带宽为 1 GHz 的示波器作为 A/D 采集四路跨阻放大器的输出,监测并完成对数据信号的采集,阻抗匹配为 50Ω ,经内部 20 MHz 的低通滤波后采集到的波形如图 8 所示。

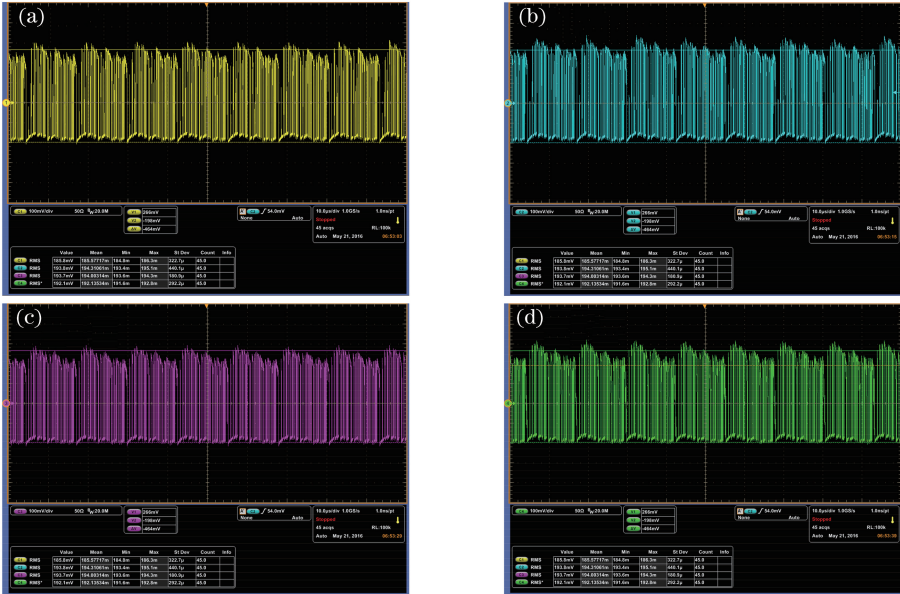


图 8 示波器采集波形。(a)(b)(c)(d) A、B、C、D 象限数据采集

Fig. 8 Oscilloscope waveform. (a)(b)(c)(d) A、B、C、D quadrant data collection

图 9 为通信解调部分的实验测试图,时钟数据恢复电路输出端与示波器相连,完成时钟和数据信号的解调。从时钟波形得到时钟周期为 100 ns ,对应 10 MHz 。数据波形比解调前噪声明显减少。

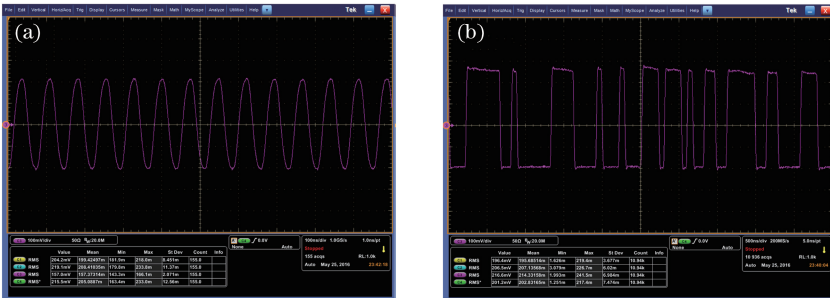


图 9 信号恢复测试。(a)时钟提取;(b)数据恢复

Fig. 9 Signal recovery test. (a) Clock extraction; (b) data recovery

对于星地激光通信系统,误码率需要达到 10^{-6} ,此时探测器接收到的最小光功率为 $0.29 \mu\text{W}$,约为 -35.4 dBm ,对应的功率信噪比为 19.6 dB ,误码率为 10^{-6} ,满足通信系统的要求。图 10 为在极限探测灵敏度下,用示波器观察到的眼图,从眼图中可以得到系统的通信速率为 10 MHz 。

5 结 论

针对空间激光通信系统小型化设计,提出采用 APD 型四象限探测器实现跟踪与通信复合探测的方案,对系统的原理进行详细分析,设计实验方案并进行了实验验证。测试结果表明,在实验室静态下用 APD 型四象限探测器在跟踪时光斑最小位置分辨率为 $2 \mu\text{m}$,探测范围为 0.8 mm ,角分辨率为 $0.8 \mu\text{rad}$ 。当入射光功率为 -35.4 dBm 时,误码率为 10^{-6} ,通信速率为 10 Mb/s ,虽然没有进行动态跟踪及通信性能实验,但初步验证了该方案的可行性。

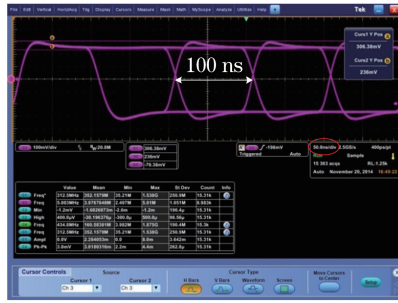


图 10 极限灵敏度条件下的眼图

Fig. 10 Eye diagram under the condition of limiting sensitivity

参 考 文 献

- [1] Song Yansong, Chang Shuai, Tong Shoufeng, *et al.* The feature analysis of the airborne laser communication system and airborne laser communication experiment[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(12): 1206004.
宋延嵩, 常 帅, 佟首峰, 等. 航空激光通信系统的特性分析及机载激光通信实验[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1206004.
- [2] Fan Xinkun, Zhang Lei, Tong Shoufeng, *et al.* Influence of sky background light on space laser communication system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070601.
范新坤, 张 磊, 佟首峰, 等. 天空背景光对空间激光通信系统的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070601.
- [3] Zhao Xin, Song Yansong, Tong Shoufeng, *et al.* Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305005.
赵 馨, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305005.
- [4] Qian Feng, Jia Jianjun, Zhang Liang, *et al.* Positioning accuracy of spot-detecting camera in acquisition, tracking, pointing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205007.
钱 锋, 贾建军, 张 亮, 等. 捕获、跟踪、瞄准系统中光斑探测相机的定位精度[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205007.
- [5] Liu Shihui. Research of military laser communication system based on QD for simultaneous communication and tracking [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 26-28.
刘仕辉. 基于 QD 的通信与跟踪复合式军用激光通信系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 26-28.
- [6] Gu Ye, Tong Shoufeng, Song Yansong, *et al.* Performance research on four-quadrant detector in communication and tracking compound mode[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(s1): s114002.
谷 野, 佟首峰, 宋延嵩, 等. 四象限探测器在通信与跟踪复用模式下的性能研究[J]. 中国激光, 2015, 42(s1): s114002.
- [7] Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin, *et al.* Study four-quadrant detector in the space laser communication[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(8): 2030-2034.
韩 成, 白宝兴, 杨华民, 等. 自由空间激光通信四象限探测器性能研究[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 2030-2034.
- [8] Zhang Hui, Chen Yunshan, Geng Tianwen, *et al.* Study on main factors affecting position detection accuracy of four-quadrant detector[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1217002.
张 辉, 陈云善, 耿天文, 等. 四象限探测器位置检测精度的主要影响因素研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1217002.
- [9] Ferraro M S, Mahon R, Rabinovich W S, *et al.* InGaAs avalanche photodiode arrays for simultaneous communications and tracking[C]. SPIE, 2011, 8162: 81620D.
- [10] Yu Xiaonan, Tong Shoufeng, Zhao Xin, *et al.* The simulation system of the beacon pointing and acquisition process of the satellite laser communication[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805007.
于笑楠, 佟首峰, 赵 馨, 等. 基于合作信标的卫星激光通信瞄准捕获仿真系统[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805007.
- [11] Chen Yunshan. Position resolution of quadrant detector for uniform spot[J]. Optics and Precision Engineering, 2015,

23(10): 113-119.

陈云善. 四象限探测器的均匀光斑位置分辨率[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(10): 113-119.

- [12] Jiang Huilin. The technologies and systems of space laser communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 81-91.

姜会林. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 81-91.

- [13] Zhao Xin, Tong Shoufeng, Liu Yunqing, *et al.* Application research on four-quadrant detector in space laser communication system[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2010, 21(1): 46-49.

赵 馨, 佟首峰, 刘云清, 等. 四象限探测器在空间激光通信中应用研究[J]. 光电子 • 激光, 2010, 21(1): 46-49.