

四象限探测器在通信与跟踪复用模式下的性能研究

谷 野¹ 佟首峰^{1,2} 宋延嵩^{1,2} 张 雷^{1,2} 于笑楠^{1,2} 孔 伟¹ 肖俊伦³

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

³ 北京航空航天大学自动化科学与电气工学院, 北京 100191

摘要 针对星间链路中测距与通信统一系统的需求,提出了一种使用四象限探测器作为跟踪探测器,同时兼顾激光载波通信的方案,使光通信端机在单探测器条件下就能完成通信与跟踪的任务。在室内条件下建立了相应的通信与跟踪复用的测试实验,对四象限探测器在通信模式下的通信速率、极限灵敏度、探测器响应能力等探测性能进行测试。利用曼彻斯特编码特点,采用低通滤波电路对调制光信号进行处理,实现对信号光脱靶量的标定与提取。在光斑不能完全覆盖探测器所有象限时,对探测器输出的通信信号进行优化选取,提高信号信噪比。实验结果表明,采用光敏面直径 1 mm 的 PIN 型 InGaAs 四象限探测器,在曼彻斯特编码条件下,通信速率可以达到 10 Mbps,探测极限灵敏度为 -33 dBm,误码率为 10^{-7} 。初步确定了四象限探测器用于通信与跟踪复用模式的可行性,为未来星间激光测距光端机小型化奠定基础。

关键词 光通信;复合通信测距;四象限探测器;信噪比;极限灵敏度

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201542.s114002

Performance Research on Four-Quadrant Detector in Communications and Tracking Compound Mode

Gu Ye¹ Tong Shoufeng^{1,2} Song Yansong^{1,2} Zhang Lei^{1,2} Yu Xiaonan^{1,2}
Kong Wei¹ Xiao Junlun³

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

³ School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract Aiming at the communications requirement of inter-satellite links laser ranging, a scheme of using four-quadrant detector as the communications detector and simultaneous tracking for the communications laser is proposed. The system can complete the communications and tracking missions in the condition of single detector. The corresponding communications and tracking compound mode experiment is established in laboratory and the detection performance which includes communications rate, limiting sensibility, photoresponse ability is tested. The calibration and extraction of communications laser miss distance is using low pass filter to deal with the modulate signal by the characters of Manchester code. When the laser spot could not cover all quadrants of the detector, the output communications signal is optimized and selected to improve the signal-to-noise ratio(SNR). The experimental results show that by using the PIN type InGaAs four-quadrant detector which photosensitive surface diameter is 1mm, the communication rate can achieve 10Mbps, the detection limiting sensitivity is -33 dBm and the SNR is 10^{-7} . Initially the feasibility of four-quadrant detector in communications and tracking compound mode is confirmed and will

收稿日期: 2015-01-22; 收到修改稿日期: 2015-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(60907020)

作者简介: 谷 野(1989—),男,硕士研究生,主要从事空间激光通信系统中光电检测及跟踪方面的研究。E-mail: jllsguye@163.com

导师简介: 佟首峰(1972—),男,博士,教授,主要从事航天遥感、卫星激光通信方面的研究。E-mail: tsf1998@163.com (通信联系人)

lay the foundations for satellite miniaturization in future.

Key words optical communications; communications and tracking compound; four-quadrant detector; signal-to-noise ratio; limiting sensibility

OCIS codes 280.3420; 230.2090; 200.2605

1 引 言

星间链路激光测距技术相对于传统的微波测距技术,由于激光载波具有高频率、窄脉宽以及高时间分辨率的特点,因此能够获得更精确的测量精度。目前星间链路测距采用 Ka 波段,测距精度为 0.1 m,最大通信速率只有 100kbps。而激光测距系统可以很容易做到厘米甚至毫米量级,同时激光具有的宽频带、信息容量大特点可以使通信速率远远超过射频通信。因此星间激光链路的高精度测距兼容大数据传输已成为未来发展的重要趋势。包括俄罗斯(GLONASS 项目)、美国(LLCD 项目)以及德国(LISA)均做出了相关的验证与演示^[1-2]。

但是由于天基终端的平台振动、姿态变换以及相对运动等扰动因素,激光测距与通信系统需要极强的捕获跟踪对准能力,同时又由于卫星平台对载荷的苛刻要求,因此轻小型化,低功耗成为衡量系统性能的重要指标^[3-5]。基于以上原因,提出采用四象限探测器同时兼顾通信与跟踪的方案,对四象限探测器在通信与跟踪复用模式下的性能进行分析测试。相比与以往的激光测距通信系统,采用四象限探测器复用的方式可以减少一路通信接收探测器及其相应的光学机械结构,因此对载荷轻小型化具有重要意义,同时提高了跟踪探测视轴与通信接收视轴一致性,减小装调误差所带来的影响^[6-7]。

2 四象限探测器的通信与跟踪复用原理

四象限探测器对光斑的跟踪是通过检测光斑在光敏面上的能量变化实现的。四象限探测器的几何坐标与光学系统的坐标平行,以探测器中心为坐标原点。当光斑照射在四象限探测器上,光斑被四象限探测器分割为四个部分,各个部分在探测器上的面积分别为 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 及 S_{IV} 。如果光斑的能量服从均匀分布,则各象限上的光功率与其象限上的分布面积成正比。因此,当光斑的中心 O' 相对于探测器中心 O 产生偏移时,其偏移量 Δx 、 Δy 可以近似为:

$$\Delta x = K_x \frac{(S_I + S_{IV}) - (S_{II} + S_{III})}{S_I + S_{II} + S_{III} + S_{IV}} = K_x \frac{(P_I + P_{IV}) - (P_{II} + P_{III})}{P_I + P_{II} + P_{III} + P_{IV}} = K_x \frac{(I_I + I_{IV}) - (I_{II} + I_{III})}{I_I + I_{II} + I_{III} + I_{IV}}, \quad (1)$$

$$\Delta y = K_y \frac{(S_I + S_{II}) - (S_{III} + S_{IV})}{S_I + S_{II} + S_{III} + S_{IV}} = K_y \frac{(P_I + P_{II}) - (P_{III} + P_{IV})}{P_I + P_{II} + P_{III} + P_{IV}} = K_y \frac{(I_I + I_{II}) - (I_{III} + I_{IV})}{I_I + I_{II} + I_{III} + I_{IV}}, \quad (2)$$

式中 S 为各象限上的面积, P 为各象限上的光功率, I 为各象限上产生的光生电流。 K 为 x 、 y 轴方向上的检测灵敏度,由光斑在沿轴方向偏移量与输出电流的比值获得。当光束的入射角与 z 轴成 $\Delta\theta$ 入射时,光束经过光学系统后,聚焦在点 O' 上,相对于原点 O 产生偏移量 Δx 和 Δy 。由几何关系可知,当光学系统的焦距为 f' 时, $\Delta\theta$ 以及 $\Delta\theta$ 在 XOZ 平面上的角分量 $\Delta\theta_x$ 和在 YOZ 面上的角分量 $\Delta\theta_y$ 如(3)~(5)式所示。利用解算后得到的角分量转换为 D/A 信号(数字信号转换为模拟信号)驱动快速倾斜振镜,使其对信号光的俯仰与方位偏转角度进行控制,从而实现对光斑的跟踪,如图 1 所示。

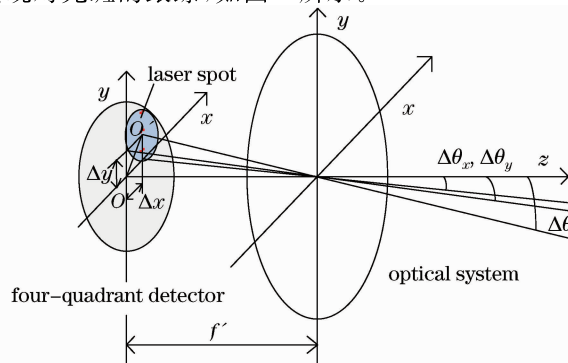


图 1 光束偏转角度与脱靶量的关系

Fig.1 Relationship between the deflection of light beam and miss distance

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

$$\Delta\theta_x = \arctan \frac{\Delta x}{f}, \quad (4)$$

$$\Delta\theta_y = \arctan \frac{\Delta y}{f}. \quad (5)$$

四象限探测器的通信功能是基于其光电二极管阵列的本质实现的。将四象限探测器检测到的四个通道信号求和后,就可以还原出完整的通信光信号。经过数据时钟恢复电路后,实现通信数据与时钟信号的恢复,从而对通信光所携带的信息进行解调。但是与单一光电探测器不同,由于四象限探测器光敏面的增加会导致PN结电容的增加,而结电容会对光电二极管的上升时间和带宽产生影响,降低通信带宽,因此四象限探测器对于高速率通信有其局限性的一面,但是对于测距伪随机码的小容量、低速率通信,四象限探测器的带宽能够满足要求。(6)式描述了结电容 C_d 与探测器带宽 f 之间的关系,其中 R_L 为负载电阻。

$$f = \frac{1}{2\pi R_L C_d}. \quad (6)$$

3 四象限探测器的通信与跟踪复用实验系统

为了验证四象限探测器的特性参数以及光前置电路的功能,同时针对星间链路中的弱湍流环境,对检测系统在实验室内进行测试。实验系统包括可调制激光器、数据信号发生器、光纤聚焦透镜、光功率衰减器、电磁偏转振镜、四象限探测器及检测数据时钟恢复电路、高灵敏度 InGaAs 短波红外相机、六自由度调整台、示波器以及光功率计等。系统方案如图 2 所示。

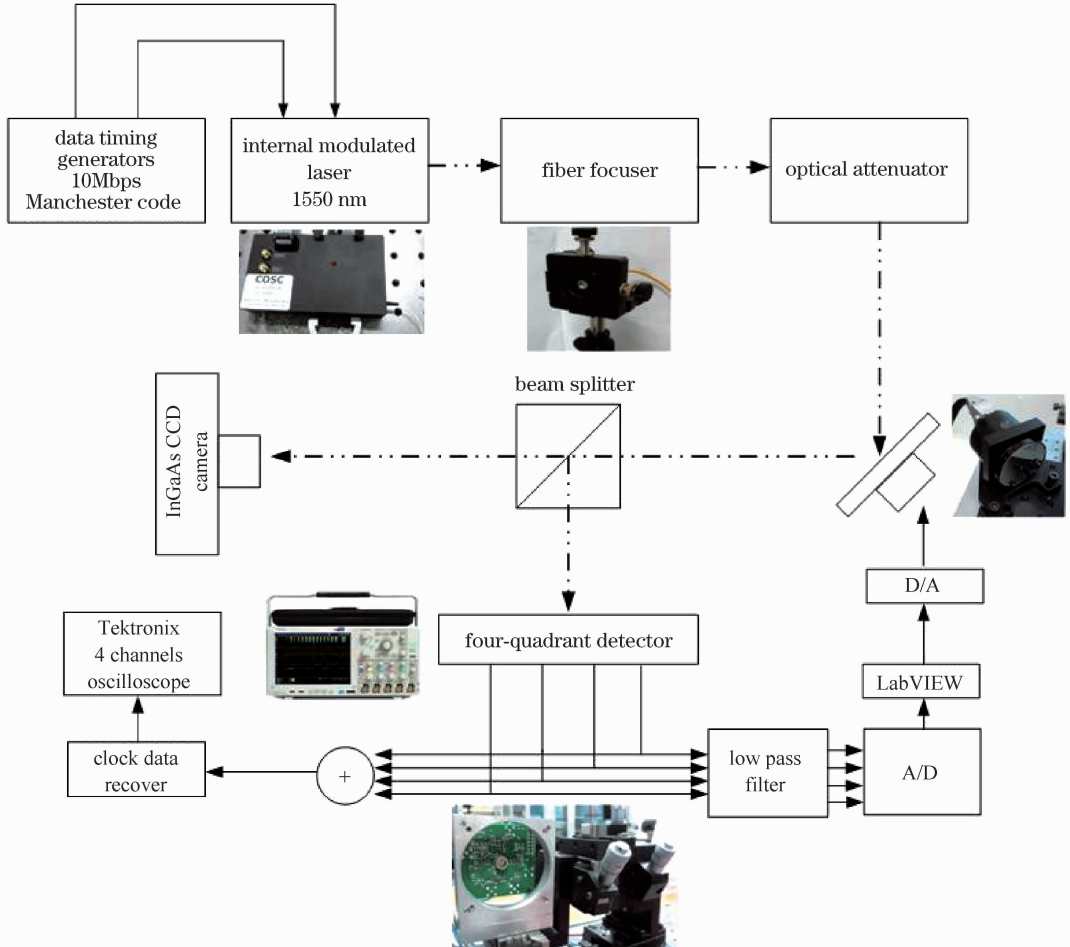


图 2 通信与跟踪复用方案

Fig. 2 Scheme of communications and tracking compound mode

可调制激光器波长为 1550 nm,最大输出功率为 1 mW,通过数据信号发生器调制后产生速率为 10 Mbps 的伪随机信号序列。调制光经过光纤输出后与 OZ Optics 光纤聚焦透镜耦合,汇聚后光斑在工作距为 29.4 mm 处的尺寸为 100 μm 。汇聚后的输出光束照射在电磁偏转振镜上,通过 D/A(数模转换)输出控制振镜的偏转角度,进而实现对光路的控制。折转后的光束通过 50/50 分束透镜后分为两条光路。其中一条光路经过光学系统最终照射在焦平面上的四象限探测器上,探测器接收后把信号分为两个支路,分别用于通信光的解调以及跟踪。另外一条光路的光束照射在 InGaAs 短波红外相机上用于对光斑的位置移动量进行标校。

实验中的探测器采用 EOS 公司的 IGA-010 型 PIN 四象限探测器,其光敏面直径为 1 mm,在 1550 nm 波段的响应度为 0.85 A/W,沟道间隔小于 35 μm ,结电容为 40 pF,取负载电阻为 50 Ω ,由(6)式可得探测器的带宽约为 80 MHz。四象限探测器的光敏面检测到信号后,每个象限的输出信号首先要送入到第一级互阻放大器(TIA)中,同时 TIA 的位置要靠近四个输出信号引脚,从而使寄生电容最小化。TIA 放大器采用 Maxim 公司的 MAX3806 互阻放大器,通过芯片引脚设置 TIA 带宽,当增益为 95 dB 时可以达到 49 MHz 的典型带宽,相对于分立元件搭建的互阻放大器,其具有低噪声、高增益以及宽带的优势。光生电流信号经过 TIA 放大转换为电压信号后分为两路信号,其中一路信号作为数据信号,用于对调制信号的解调,另外一路信号作为光斑位置检测信号。其中数据信号中的每个象限信号经过由 OPA657 构成的增益为 20 dB 的二级放大后再通过增益为 2 dB 的加法器进行信号求和。其中 OPA657 增益为 20 dB 时的带宽为 90MHz。能够满足整个系统带宽设计要求。求和后的信号最后通过单端转差分电路进入 ADN2816 数据时钟恢复芯片,对调制信号实现数据时钟恢复,同时使用带宽为 1G 的示波器对数据及时钟信号进行监测。位置信号中的每个独立象限信号经过 10 倍缓冲放大后,再通过增益为 20 dB 的放大器进行二次信号放大。由于信号在调制时采用曼彻斯特编码的方式,此类编码方式具有“0”和“1”数据量相同的特点,因此经过调制后的信号占空比几乎为 50%,可以采取低通滤波的方式得到平均电压作为位置检测电压。与采用高速率 A/D(数模转换)的方案相比,利用这种方式可以简化调试难度,降低设计成本并且对高频噪声的干扰具有一定抑制作用。

4 实验数据分析

当光束经过光学系统照射到探测器表面上时,会出现某些象限没有被通信光覆盖的情况.图 3,4,5 分别表示光斑照射在探测器不同位置时,伴随着光能量变化,各象限的电压输出情况。可以发现,当信号光斑不能完全覆盖探测器所有象限时,未被覆盖的象限输出虽然能够随着通信杂散光能量的影响而变化,但输出信号主要贡献为噪声,在这种状态下如果直接选取四个象限信号加和作为通信信号将会直接影响信噪比,因此需要对通信信号进行优化选取。

利用示波器对四路象限信号进行监测,分别记录探测器被照射及被遮挡时信号幅度的均方根值,当象限信号幅值小于最大象限信号幅值的 1/5 时,便认为其贡献为噪声信号,对信号采取抛弃处理。表 1 所示为接收功率为 0.8 μW 时,入射光斑在不同探测器表面位置时,采用不同求和方式时求得的信噪比。通过对比可以得知,采用优化策略之后,可以将通信信号的信噪比提高 3 dB~4 dB。

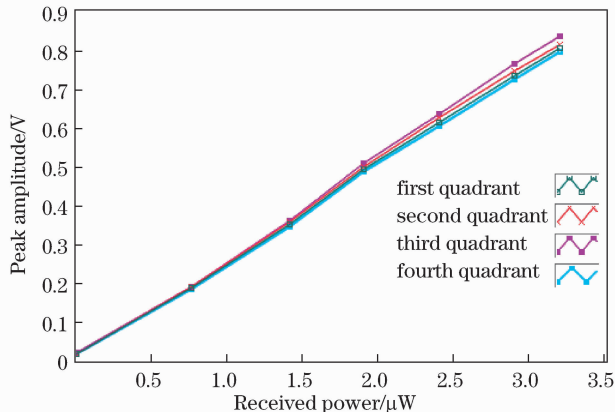


图 3 光斑位于探测器中心

Fig. 3 Laser spot centered on detector center

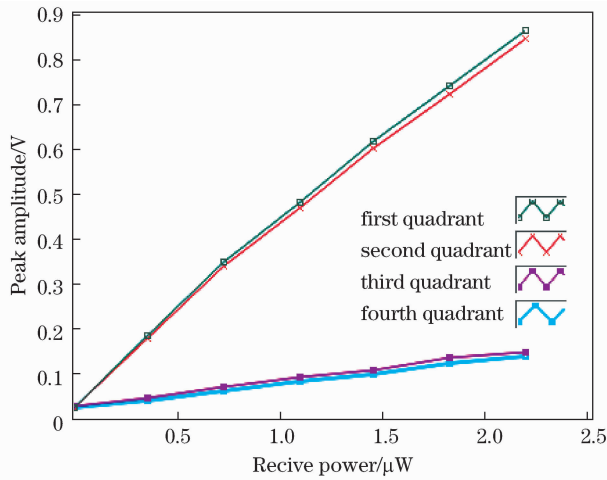


图 4 光斑位于探测器两象限之间

Fig. 4 Laser spot centered on two quadrant of the detector

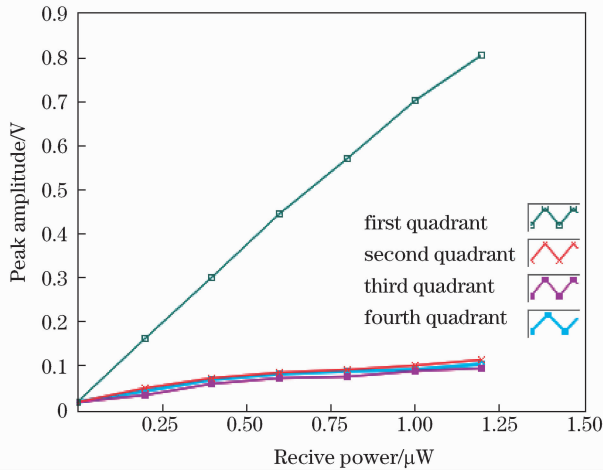


图 5 光斑位于探测器一个象限内

Fig. 5 Laser spot centered on one quadrant of the detector

表 1 不同求和策略的信噪比(SNR)对比

Table 1 SNR comparison of different sum strategies

Position of laser spot	SNR before optimizing/dB	SNR after optimizing/dB
Centere on two quadrant	19.43	23.72
Center on one quadrant	24.77	28.28

极限探测灵敏度是评价接收机系统的重要指标之一。当信号发生器的伪随机码速率为 10 Mbps 时,调整 6 轴精密平移台,使光斑移动到探测器光敏面两象限之间,连续调节光功率衰减器,使入射光强度逐渐减弱,光信号的功率信噪比随着入射光功率增强而增加,利用误码仪检测不同光功率条件下经过数据时钟恢复后误码率,可以观察到误码率相对于光功率的变化呈现非线性的降低^[8-9]。如图 6 所示,在输入光功率为 0.45 μW (约为 -34.6 dBm)时,在曲线上呈现一个拐点,此时经过优化选取通信信号后的功率信噪比为 16.48 dB。当光功率小于拐点功率时,误码率随着光功率的增加缓慢降低,当光功率大于拐点功率时,误码率随着光功率的增加急剧下降。对于星间链路通信系统,误码率要求较高,需要达到 10^{-7} ,此时的探测器接收功率为 0.53 μW (约为 -33 dBm)。图 7 为在极限探测灵敏度下的眼图。

5 结 论

针对星间链路通信测距系统,提出一种使用四象限探测器作为光斑位移检测器件的同时复用激光通信

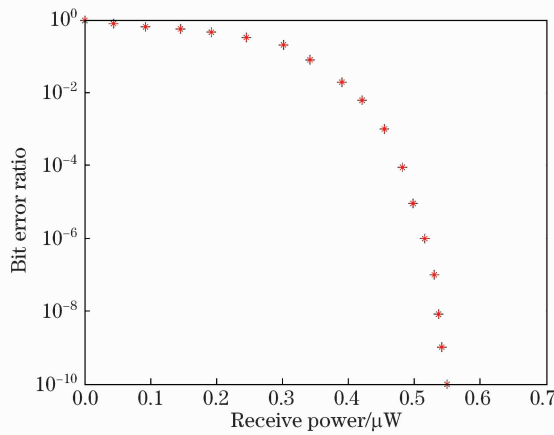


图 6 误码率与接收光功率的关系

Fig. 6 Relationship between SNR and receive power



图 7 极限灵敏度条件下的眼图

Fig. 7 Eye diagram in the condition of limiting sensitivity

功能的方案。相对于传统激光通信光端机系统,此方案可以节省一路通信光接收探测器及其相应的光学系统,使跟踪视轴与通信视轴合并,消除了传统通信端机两视轴误差对通信带来的影响,降低了系统的装调难度,使系统小型化。同时对四象限探测器在通信与跟踪复用模式下的性能进行了测试,实验结果表明当使用 PIN 型 InGaAs 四象限探测器时,对通信信号采用优化策略后,可以将信噪比提高 3 dB~4 dB。当入射光功率连续下降时,接收信号的误码率随着入射光功率下降而非线性下降,当入射光功率为 -33 dBm 时,接收信号的误码率为 10^{-7} ,通信速率为 10Mbps。可以满足于星间弱湍流、远距离环境的测距通信应用。同时四象限探测器通过对光斑位置检测,对光斑的偏移进行抑制。为了进一步提高通信速率及检测灵敏度,未来考虑使用灵敏度更高的雪崩光电二极管四象限探测器,因此,降低噪声,提高信噪比以及提高位置检测线性度将成为下一步考虑的问题^[10-11]。

参 考 文 献

- Li Wei. Research on the trend of laser communication and ranging technique[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(8): 864-866.
李 玮. 激光通信测距技术发展现状及趋势研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(8): 864-866.
- Li Wei. Research on integration technique of laser ranging and communication[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(12): 1345-1347.
李 玮. 激光通信/测距一体化技术研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(12): 1345-1347.
- 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 鑫, 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.
- Zhao Xin, Tong Shoufeng, Jiang Huilin. Experimental testing on characteristics of four-quadrant detector [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(10): 2164-2170.
赵 鑫, 佟首峰, 姜会林. 四象限探测器的特性测试[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2164-2170.

- 5 Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin, *et al.*. Study four-quadrant detector in the free space 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.
- 6 Liu Shihui. Research of Military Laser Communications System Based on QD for Simultaneous Communications and Tracking[D]. Chang Chun: 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.
- 7 Yu Xiaonan, Tong Shoufeng, Zhao Xin, *et al.*. Simulation system of the beacon pointing and acquisition process in the satellite laser communication [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805007.
于笑楠, 佟首峰, 赵 鑫, 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.
- 8 Jiang Huilin, Tong Shoufeng, Zhan Lizhong, *et al.*. The Technologies and System of Space Laser Communication [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010: 208–214.
姜会林, 佟首峰, 张立中, 等. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 208–214.
- 9 Ding Tao, Xu Guoliang, Zhang Xuping, *et al.*. Control of bit error rate introduced by platform vibration for free space optical communication [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(4): 499–502.
丁 涛, 许国良, 张旭苹, 等. 空间光通信中平台振动对误码率影响的抑制[J]. 中国激光, 2007, 34(4): 499–502.
- 10 Ferraro M S, Burris H R, Mahon R, *et al.*. Characterization of InGaAs avalanche photodiode arrays with varying geometries for free-space optical communication [C] SPIE, 2012, 8380: 83800A.
- 11 Ferraro M S, Mahon R, Rabinovich W S. InGaAs avalanche photodiode arrays for simultaneous communications and tracking[C]. SPIE, 2011, 8162: 81620D.

栏目编辑: 刘丰瑞