

激光与光电子学进展

高灵敏度光束位置信号提取的激光通信
跟瞄一体化(特邀)陈欣予^{1,2}, 鲁绍文^{1,*}, 朱福南¹, 樊永波¹, 胡琼¹, 夏浩伟¹, 孙建锋^{1,2}, 朱韧¹, 侯霞^{1,2,**}, 陈卫标^{1,2}¹中国科学院上海光学精密机械研究所航天激光工程部, 上海 201800;²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 提出一种基于四象限探测器跟瞄和通信复用的强度调制直接探测的空间光通信系统,以超声波电机驱动的双光楔为光束偏转执行单元形成光束位置跟踪的闭环系统。驱动电机转动周期为 15 ms,位置分辨率为 0.83 μrad 。经理论分析和实验验证,该系统的位置闭环跟踪 -3 dB 带宽约为 4 Hz。当位置探测误差小于 10% 时,即光束探测精度小于 12 μrad ,对应的探测灵敏度为 -45.2 dBm。在 10 Mbit/s 的通信速率和无信号编码下,误码率为 1×10^{-3} 时对应的通信灵敏度为 -44 dBm。验证了利用四象限探测器作为跟踪与通信复用探测器的可行性,可应用于小型化、轻量化的星间激光通信终端。

关键词 自由空间光通信; 四象限探测器; 位置分辨率; 跟踪带宽; 通信灵敏度

中图分类号 TN929.13

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232772

Integration of Laser Communication and Aiming Based on High
Sensitivity Beam Position Signal Extraction (Invited)Chen Xinyu^{1,2}, Lu Shaowen^{1,*}, Zhu Funan¹, Fan Yongbo¹, Hu Qiong¹, Xia Haowei¹,
Sun Jianfeng^{1,2}, Zhu Ren¹, Hou Xia^{1,2,**}, Chen Weibiao^{1,2}¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and
Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China

Abstract A space optical communication system with intensity modulation direct detection based on four quadrant detector tracking and communication multiplexing has been reported, which uses the dual optical wedge driven by ultrasonic motor as the beam deflection execution unit to form a closed-loop system for beam position tracking. The rotation period of the driving motor is 15 ms, and the position resolution is 0.83 μrad . Through theoretical analysis and experimental verification, the position closed-loop tracking -3 dB bandwidth of this system is about 4 Hz. When the position detection error is less than 10%, that is, the beam detection accuracy is less than 12 μrad , and the corresponding detection sensitivity is -45.2 dBm. At a communication rate of 10 Mbit/s and without signal encoding, the corresponding communication sensitivity is -44 dBm when the bit error rate is 1×10^{-3} . It has been verified that it is feasible to use the four-quadrant detector as a tracking and communication multiplexing detector, which can be applied to small and lightweight interstellar laser communication terminals.

Key words free-space optical communication; four-quadrant detector; position resolution; tracking bandwidth; communication sensitivity

1 引言

自由空间光通信具有通信速率高、功耗低、保密性好等优势而成为星间远距离通信的首选方式,一体化

和小型化成为当前空间激光通信的发展趋势之一^[1-3]。

为了保证通信链路的稳定性和可靠性,需要通信终端对接收光束具有高精度的捕获跟踪机构^[4-5]。现有的空间激光通信系统主要采用粗跟踪和精跟踪协作

收稿日期: 2023-12-28; 修回日期: 2024-02-04; 录用日期: 2024-02-22; 网络首发日期: 2024-02-28

通信作者: *lushaowen@siom.ac.cn; **hou_xia@siom.ac.cn

的复合轴跟踪系统,利用粗跟踪单元作为瞄准和粗跟踪机构,其运动范围大、带宽低、精度有限;精跟踪单元用于补偿粗跟踪的残差,具有精度高、带宽大的特点^[6]。欧洲航天局(ESA)在 2002 年成功实现了地球同步轨道卫星(ARTEMIS)与低轨卫星(SPOT4)之间的双向通信,粗跟踪和精跟踪光束位置传感器均为电荷耦合器件(CCD),粗跟踪以步进电机为执行机构,精跟踪以电磁驱动器驱动的两轴反射镜作为执行机构,以单独的雪崩式光电探测器为通信探测器^[7]。2008 年,德国低轨卫星 TerraSAR-X 与美国的 NFIRE 卫星实现了速率为 5.6 Gbit/s 低轨卫星间双向相干激光通信,在该实验中采用了无独立信标捕获跟踪的方案,通过优化复合轴捕获跟踪算法大大减少了星间激光通信链路建立的时间^[8-9]。欧洲数据中继系统采用无信标光的方式,至今已成功建链超 75000 次,星间建链时间小于 3 s,经指向优化后单轴跟踪性能降至 16~75 nrad^[10-11]。

国内对于激光通信的复合轴跟踪捕获也做了大量研究。2015 年,姜会林等^[12]研究了一点对多点的激光通信跟瞄技术,探测端采用质心算法实现粗跟踪精度可达 50 μ rad,精跟踪精度可达 3 μ rad。2022 年,重庆星网网络系统研究院有限公司提出了满足商业航天的低轨卫星无信标光的捕获跟踪方案,定量分析了粗精扫描机构的控制带宽,有效提升了扫描捕获效率^[13]。2023 年,刘金标等^[14]研究了舰载激光通信的跟踪捕获方案,粗跟踪采用多闭环控制系统,精跟踪采用二维振镜和高精度四象限探测器及卡尔曼滤波结合的方式,有效抑制了舰船平台的多维运动、振动等对通信稳定性的影响。

为了减小激光通信终端的体积、功耗以及质量,本

文采用无信标光捕获跟踪的方案,将捕获跟踪和通信探测子系统合并在一起,采用强度调制直接探测的通信方式,通过单个四象限探测器实现对光束位置信息的提取和通信信号的解调,并以超声波电机驱动的双光楔为光束的指向偏转机构形成光束位置闭环跟踪。经过相应的位置信息提取算法,提高了位置解算的精度和灵敏度。同时,将四象限探测器输出的四路信号进行叠加,进而解算出通信信号。测试了杂散光对系统跟瞄和通信性能的影响。

2 基本原理

2.1 实验装置

通信跟瞄一体化测试装置如图 1 所示,地面测试系统将速率为 10 Mbit/s 的通信信号加载到直调激光器的光强度上,调制后的光信号经快反镜反射后由 4 m 透镜准直输出,快反镜用于对输入光束进行指向偏转,模拟星间光通信下卫星平台的抖动。准直后的光信号被通信跟瞄一体化终端所接收。一体化终端以超声波电机驱动的双光楔为光束偏转执行单元,所用编码器位宽为 23 位,对应的分辨率为 0.83 μ rad。指向调整后的光束经收发透镜聚焦后,由 45°放置的中孔反射镜反射到离焦放置的四象限探测器上,将光信号转换为对应的电信号并经过模拟数字转换器(ADC)转换成数字信号,所用的 ADC 的采样率为 100 MHz。位置解算单元根据四路数字信号解算出入射光束的位置信息并由比例-积分-微分(proportional-integral-derivative)算法控制双光楔进行光束位置的闭环跟踪。信号解调单元对该四路数字信号在数字域相加并进行时钟数据恢复(CDR),进而解调出对应的通信信号。

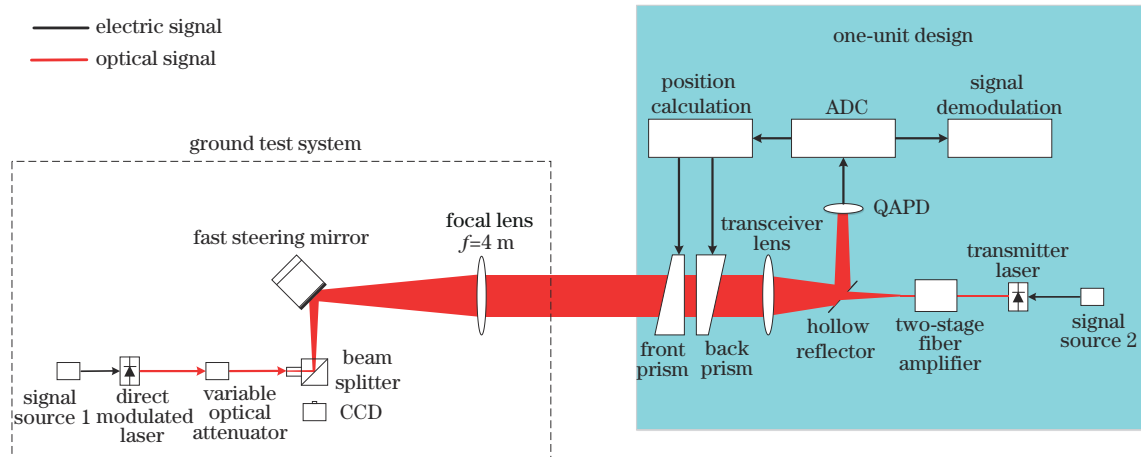


图 1 通信跟瞄一体化测试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of communication and tracking one-unit design

通信跟瞄一体化终端将通信信号加载到直调激光器上,调制后的光信号经两级光纤放大后从 45°中孔反射镜的中间部分透射到收发透镜进行准直输出,准直后的光信号经双光楔进行指向调整后入射到地面测试系统中,放置在地面测试系统焦平面处的 CCD 用于接

收终端出射的光信号。

2.2 光束位置提取及通信性能

四象限雪崩光电二极管(QAPD)对入射光束位置的解算是通过检测光斑在光敏面上能量的变化,当光斑的能量服从均匀分布时,输出的四个象限信号

$V_A(t)$ 、 $V_B(t)$ 、 $V_C(t)$ 、 $V_D(t)$ 和光斑在各象限上分布的面积 $S_A(t)$ 、 $S_B(t)$ 、 $S_C(t)$ 、 $S_D(t)$ 成正比。图 2 是所用 QAPD 的工作模型,所用 QAPD 的光敏面直径为 1 mm。在以探测器自身中心为原点的坐标系 XOY 中,光斑位置脱靶量 $(\sigma_x(t), \sigma_y(t))^{[15-17]}$ 与环形光斑的质心 $(\Delta x(t), \Delta y(t))$ 之间的对应关系为

$$\sigma_x(t) = \frac{1}{\pi(R^2 - r^2)} \left\{ 2R^2 \arcsin \left[\frac{\Delta x(t)}{R} \right] + 2\Delta x(t) \sqrt{R^2 - \Delta x(t)^2} - 2r^2 \arcsin \left[\frac{\Delta x(t)}{r} \right] - 2\Delta x(t) \sqrt{r^2 - \Delta x(t)^2} \right\}, \quad (1)$$

$$\sigma_y(t) = \frac{1}{\pi(R^2 - r^2)} \left\{ 2R^2 \arcsin \left[\frac{\Delta y(t)}{R} \right] + 2\Delta y(t) \sqrt{R^2 - \Delta y(t)^2} - 2r^2 \arcsin \left[\frac{\Delta y(t)}{r} \right] - 2\Delta y(t) \sqrt{r^2 - \Delta y(t)^2} \right\}, \quad (2)$$

式中: R 、 r 分别表示环形光斑的外环半径和内环半径。在本文中, $R = 2r$, 同时 $R = 0.25 \text{ mm}$ 。

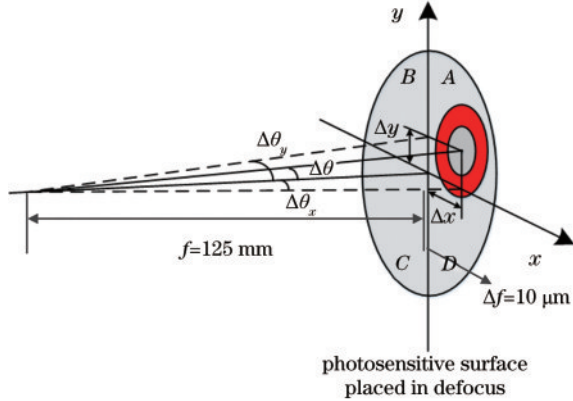


图 2 QAPD 等效工作模型
Fig. 2 QAPD equivalent working model

为了从通信信号中解调出光斑位置脱靶量信息,位置解算单元对四象限探测器输出的四路数字化的电信号进行极性处理:

$$x_k[n] = \begin{cases} V_k[n], & V_k[n] \geq 0 \\ -V_k[n], & V_k[n] < 0 \end{cases}, k = A, B, C, D. \quad (3)$$

对极性处理后的四象限信号进行 N 点的平均:

$$\bar{X}_k[n] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_k[n+i], \quad k = A, B, C, D. \quad (4)$$

平均后的四象限电压值 $\bar{X}_A[n]$ 、 $\bar{X}_B[n]$ 、 $\bar{X}_C[n]$ 和 $\bar{X}_D[n]$ 与对应的入射光功率成正比。光斑位置脱靶量 $(\sigma_x(t), \sigma_y(t))^{[18-19]}$ 与平均后的四象限电压值之间的对应关系为

$$\sigma_x(t) = \frac{\bar{X}_A[n] + \bar{X}_D[n] - \bar{X}_B[n] - \bar{X}_C[n]}{\bar{X}_A[n] + \bar{X}_B[n] + \bar{X}_C[n] + \bar{X}_D[n]}, \quad (5)$$

$$\sigma_y(t) = \frac{\bar{X}_A[n] + \bar{X}_B[n] - \bar{X}_C[n] - \bar{X}_D[n]}{\bar{X}_A[n] + \bar{X}_B[n] + \bar{X}_C[n] + \bar{X}_D[n]}. \quad (6)$$

将光斑位置脱靶量值代入式(1)~(2),得到相应光斑的质心位置 $(\Delta x(t), \Delta y(t))$ 。由 $\Delta\theta_x(t) = \arctan \frac{\Delta x(t)}{f}$ 和 $\Delta\theta_y(t) = \arctan \frac{\Delta y(t)}{f}$ 可以得到入射光束在 X 轴和 Y 轴方向上的角度误差 $\Delta\theta_x(t)$ 和 $\Delta\theta_y(t)$ 。其中, f 表示光学系统的等效焦距, Δf 表示光学系统的离焦量。

系统的误码率(BER)计算公式为

$$R_{\text{BER}} = \frac{1}{4} \left[\text{erfc} \left(\frac{RP_s}{2\sqrt{2}\sigma_0} \right) + \text{erfc} \left(\frac{RP_s}{2\sqrt{2}\sigma_1} \right) \right], \quad (7)$$

式中: P_s 代表入射信号光功率; R 表示探测器的响应度; σ_0 和 σ_1 表示信号为“0”和“1”时,对应的噪声电流方差; $\text{erfc}(x)$ 代表高斯误差函数,并有 $\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2) dt$ 。

实验中的主要参数见表 1。

表 1 实验的主要参数
Table 1 Main parameters of the experiment

Parameter	Symbol	Value
Boltzmann constant / (J/K)	k	1.38×10^{-23}
Temperature / K	T	308
Electron / C	e	1.6×10^{-19}
Responsivity / (A/W)	$R = \frac{\eta e}{h\nu} M$	9.5
Gain coefficient	M	10
Noise figure	α	3
Bandwidth / MHz	B	10
Dark current / nA	I_d	100

3 实验结果

采样率为 500 MSa/s 的 ADC 将 QAPD 输出的四路模拟电信号转换为对应的数字信号。为了提高位置解算的灵敏度,位置解算单元对该四路数字信号首先进行极性判断,将负信号转换为对应的正信号。

$$x_k[n] = \begin{cases} V_k[n], & V_k[n] \geq 0 \\ -V_k[n], & V_k[n] < 0 \end{cases}, k = A, B, C, D, \quad (8)$$

式中: $V_k[n]$ 代表 QAPD 对应的四路数字信号; $x_k[n]$ 表示经过极性判断后的四路数字信号。将经过极性判断后的四路数字信号经过 N 点的滑动平均,设 $\bar{X}_k[n]$ 为经过 N 点平均后的信号。

$$\bar{X}_k[n] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_k[n-i], \quad k = A, B, C, D. \quad (9)$$

图 3 是对 QAPD 采样数据经过极性判断后的四路

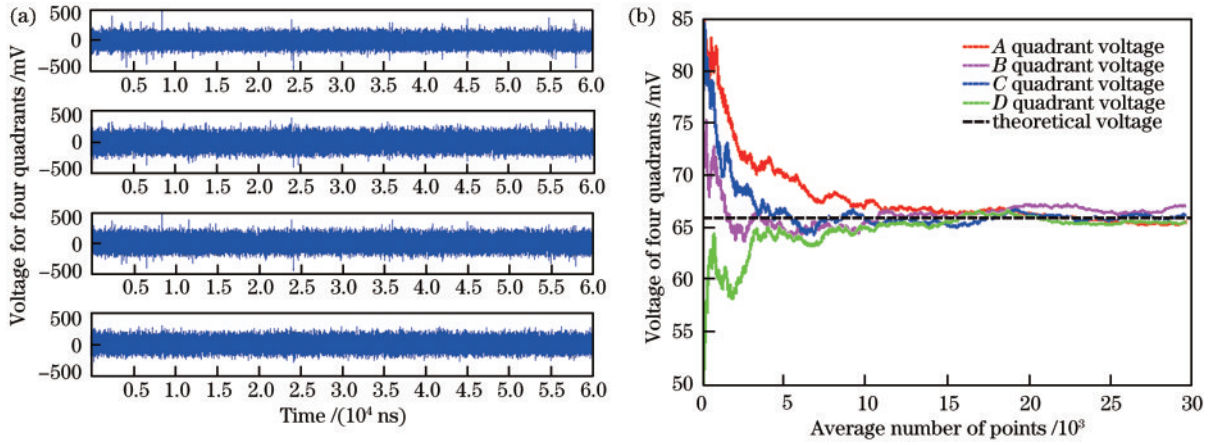


图 3 平均点数和信号之间的关系

Fig. 3 Relationship between the average number of points and the signal

数字信号经 N 点的滑动平均后进行离线处理的结果。随着平均点数的增加,各象限得到的电压平均值收敛于理论计算值。当平均点数 N 高于 20000 点时,位置解算误差小于 1%。

图 4 为在平均点数 N 为 30000 时,四个象限的平均电压值与入射光功率之间的关系。入射光功率大于 20 nW (-47 dBm) 时,四个象限的曲线是线性的,符合光电效应,并且具有相同斜率,表明四个象限的响应度一致,可以保证位置解算的精度,对应位置解算的误差小于 10%,本实验的终端发散角为 120 μ rad,对应的位置解算误差小于 12 μ rad。图中,四个象限没有重合是由于入射光束没有对准探测器的中心。

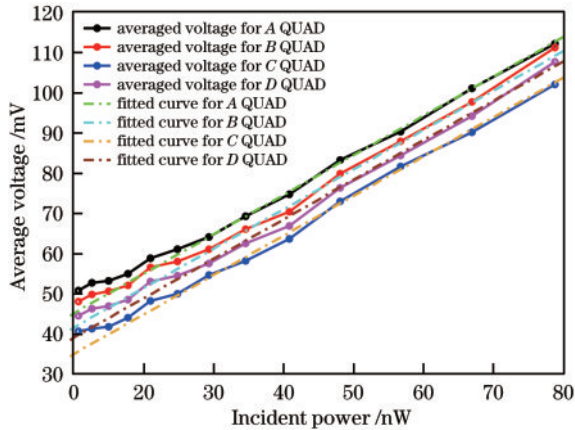


图 4 平均电压与入射光功率的关系

Fig. 4 Relationship between average voltage and incident power

图 5(a) 为通信跟瞄一体化终端的实物照片,为了测试跟踪和通信性能,搭建了如图 5(b) 所示的测试系统,快反镜对入射光束进行偏转,用于产生不同频率和不同幅值的扰动。

激光通信载荷安装在卫星平台上,卫星平台由于自身活动期间或者在轨外部环境的影响,会产生不同频率的抖动,对于较窄的光束发散角而言,这种抖动会

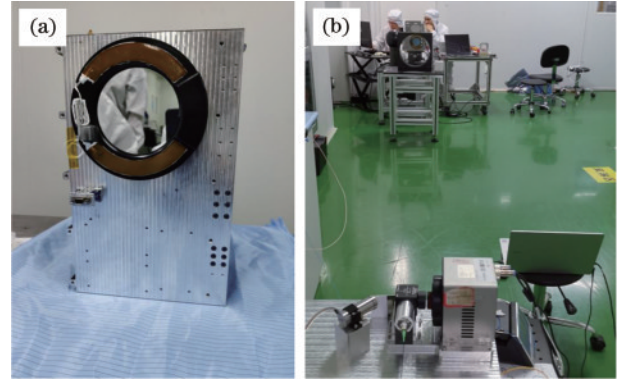


图 5 测试实物照片

Fig. 5 Test physical photo

带来通信链路的衰减,这种衰减会直接影响接收端接收到的光功率,因此需要对光束进行闭环跟踪。在闭环跟踪下,跟踪效率与快反镜扰动频率之间的关系如图 6 所示,随着扰动频率的增加终端的跟踪效率减小,其中跟踪效率定义为跟踪后与跟踪前频率 f 处光束指向扰动的峰峰值的比值。对应的跟踪 -3 dB 带宽为 4.3 Hz,有效抑制卫星平台的低频高幅抖动。

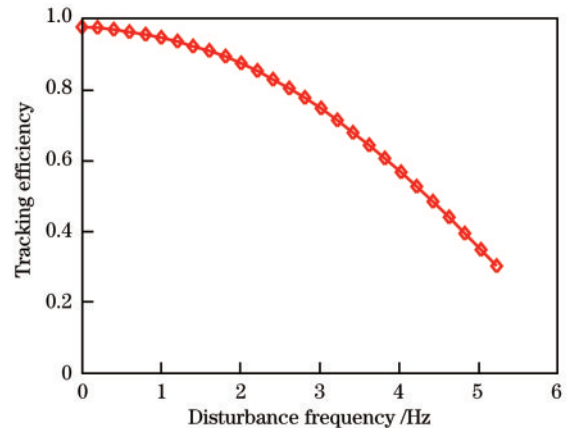


图 6 跟踪效率和扰动频率之间的关系

Fig. 6 Relationship between tracking efficiency and disturbance frequency

对于星间光通信来说,接收灵敏度是一个重要的参数。图 7 显示了在不同的扰动频率下,接收误码率与接收光功率之间的关系。在不同的抖动频率下,BER 性能没有恶化,在 1×10^{-9} 的 BER 下,灵敏度为 -41 dBm。与理论值相比,存在 11.5 dB 的损失。这种损耗主要是由 QAPD 放大器电路引入的电子噪声引起的。

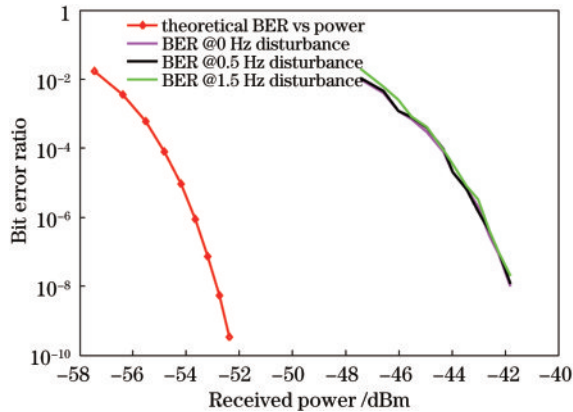


图 7 误码率与接收光功率之间的关系

Fig. 7 Relationship between BER and received power

4 结 论

本文报道了一种通信和跟踪一体机的设计方案,位置计算和通信解调由 QAPD 实现。通过理论和实验验证了高灵敏度位置计算算法,在计算误差小于 10% 的情况下,对应的探测器灵敏度为 -45.2 dBm。通过闭环跟踪,入射光束的 -3 dB 跟踪带宽约为 4.3 Hz,有效抑制了卫星平台的低频高幅抖动。当比特率为 10 Mbit/s 时,接收器灵敏度达到 -41 dBm,误码率为 1×10^{-9} 。该工作采用无线标光捕获跟踪的方案,使用单个 QAPD 探测器实现光斑位置解算和通信信号的解调,该设计方案下,光束位置探测光轴和通信信号解调光轴为同一个轴,避免了传统分离式光束位置探测和通信信号解调光轴偏差带来的链路损耗,进而影响通信性能。

参 考 文 献

- [1] 鲁绍文,侯霞,李国通,等.空间光通信技术发展现状及趋势[J].天地一体化信息网络,2022,3(2):39-46.
Lu S W, Hou X, Li G T, et al. Development status and trend of space optical communication technology[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(2): 39-46.
- [2] 徐森,史浩东,王超,等.空间目标多维度探测与激光通信一体化技术研究[J].中国激光,2021,48(12):1206002.
Xu M, Shi H D, Wang C, et al. Technology for integrating space object multidimensional detection and laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1206002.
- [3] 李轩,周逸潇,赵尚弘,等.基于线性调频的雷达通信一体化波形研究进展[J].激光与光电子学进展,2023,60(5):0500003.
Li X, Zhou Y X, Zhao S H, et al. Research progress of integrated radar-communication waveform based on linear frequency modulation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(5): 0500003.
- [4] 薛正燕,亓波,任戈,等.星间光通信中跟瞄误差下最优光束发散角设计[J].激光与光电子学进展,2015,52(7):070602.
Xue Z Y, Qi B, Ren G, et al. Design of optimum beam divergence angle for intersatellite optical communication systems with pointing errors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 070602.
- [5] 李俊华,董岩,林本震,等.基于光通信快速反射镜的改进型自抗扰控制算法[J].激光与光电子学进展,2023,60(7):0706007.
Li J H, Dong Y, Lin B Z, et al. Improved active disturbance rejection control algorithm based on fast steering mirror for optical communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(7): 0706007.
- [6] 余子昊,王栋皓,汪洋,等.卫星激光通信快速反射镜研究进展及发展趋势[J].激光与光电子学进展,2023,60(15):1500003.
Yu Z H, Wang L H, Wang Y, et al. Research progress and development trend of fast steering mirror for satellite laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(15): 1500003.
- [7] Tolker-Nielsen T, Oppenhaus G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4635: 1-15.
- [8] Fields R, Lunde C, Wong R, et al. NFIRE-to-TerraSAR-X laser communication results: satellite pointing, disturbances, and other attributes consistent with successful performance[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7330: 73300Q.
- [9] Fields R, Kozlowski D, Yura H, et al. 5.625 Gbps bidirectional laser communications measurements between the NFIRE satellite and an Optical Ground Station[C]//2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), May 11-13, 2011, Santa Monica, CA, USA. New York: IEEE Press, 2011: 44-53.
- [10] Sterr U, Gregory M, Heine F. Beaconless acquisition for ISL and SGL, summary of 3 years operation in space and on ground[C]//2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), May 11-13, 2011, Santa Monica, CA, USA. New York: IEEE Press, 2011: 38-43.
- [11] Heine F, Mühlwinkel G, Zech H, et al. LCT for the European data relay system: in orbit commissioning of the Alphasat and Sentinel 1A LCTs[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9354: 93540G.
- [12] 姜会林,江伦,宋延嵩,等.一点对多点同时空间激光通信光学跟瞄技术研究[J].中国激光,2015,42(4):0405008.

- Jiang H L, Jiang L, Song Y S, et al. Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0405008.
- [13] 梅博, 杨中华, 李梦男. 无信标星间激光通信系统粗精复合扫描方法[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(6): 20210434.
- Mei B, Yang Z H, Li M N. Coarse-refined combined scanning method of beaconless inter-satellite laser communication system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6): 20210434.
- [14] 刘金标, 徐林, 马建军, 等. 舰载激光通信设备设计及试验研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(10): 127-130.
- Liu J B, Xu L, Ma J J, et al. Design and experimental study of shipborne laser communication equipment[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(10): 127-130.
- [15] Lu S W, Gao M, Yang Y, et al. Inter-satellite laser communication system based on double Risley prisms beam steering[J]. Applied Optics, 2019, 58(27): 7517-7522.
- [16] Yang Y G. Analytic solution of free space optical beam steering using Risley prisms[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(21): 3576-3583.
- [17] Li Y J. Closed form analytical inverse solutions for Risley-prism-based beam steering systems in different configurations[J]. Applied Optics, 2011, 50(22): 4302-4309.
- [18] Ma X Y, Rao C H, Wei K, et al. Error analysis of the de-crosstalk algorithm for the multinode-PMT-based quadrant tracking sensor[J]. Optics Express, 2012, 20(28): 29185-29195.
- [19] Zhang J, Qian W X, Gu G H, et al. Quadrant response model and error analysis of four-quadrant detectors related to the non-uniform spot and blind area[J]. Applied Optics, 2018, 57(24): 6898-6905.