

基于全光引导的快速捕获指向控制技术研究

胡晨涛^{1,2}, 刘洋^{1,2}, 付景怡⁴, 滕云杰¹, 刘建华², 江伦^{1,2},
赵思思³, 尚卫东³, 刘彤宇⁴

- (1. 长春理工大学光电工程学院空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;
3. 北京空间机电研究所, 北京 100000; 4. 电磁空间安全全国重点实验室, 天津 300308)

摘要:传统激光通信受到强电磁信号干扰时,导致电学引导机制失灵,初始指向将无法建立。为了解决强电磁干扰导致无法正常激光通信的问题,提出了一种结合伺服控制技术的全光捕获的控制技术。该方法对于全光引导光学模型进行解析研究,进而得出全光引导跟踪数学模型,在此基础上加入伺服控制技术,通过对高斯-赛德尔迭代算法的融合改进研究,以控制两个独立激光通信端机的快速捕获,精准指向与跟踪。实验结果表明,设计的捕获方案能进行全周 $90^\circ/\text{s}$ 的方位扫描,并55 s内完成俯仰 20° 的捕获。使激光通信在静默条件下快速建链有广阔的应用前景。

关键词:全光引导;伺服控制;高斯-赛德尔迭代算法;快速捕获;精准指向

中图分类号:O439;TP13 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2025.03.017

Research on fast capture pointing control technology based on all light guidance

HU Chen-tao^{1,2}, LIU Yang^{1,2}, FU Jing-yi⁴, TENG Yun-jie¹, LIU Jian-hua²,
JIANG Lun^{1,2}, ZHAO Si-si³, SHANG Wei-dong³, LIU Yu-tong⁴

- (1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. National and Local Joint Engineering Research Center for Space Optoelectronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 3. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100000, China;
4. National Key Laboratory of Electromagnetic Space Security, Tianjin 300308, China)

Abstract: When traditional laser communication is interfered by strong electromagnetic interference, it leads to the failure of electrical auxiliary guidance methods, and the initial pointing cannot be established. In order to solve the problem of abnormal laser communication due to strong electromagnetic interference, a control technology combining servo control technology for all optical capture is proposed. The method is an analytical study of the optical model of all optical guidance, which leads to the all-optical guidance tracking mathematical model, based on which servo control technology is added to improve the fusion of the Gauss Seidel Method algorithm, so as to control the rapid capture, precise pointing and tracking of two independent laser communication terminals. The experimental results show that the designed capture scheme can perform azimuth scanning at $90^\circ/\text{s}$ throughout the entire cycle and complete capture at

基金项目:吉林省科技发展计划项目(No. 20240304109SF);第八届青年人才托举工程项目(No. 2022QNRC001)资助。

作者简介:胡晨涛(1999-),男,硕士研究生,主要从事伺服控制方面的研究。E-mail:1017557317@qq.com

通讯作者:刘洋(1991-),男,博士,副研究员,空间激光通信,主要从事伺服控制,光电跟踪方面的研究。E-mail:ly1991@cust.edu.cn

收稿日期:2024-07-17

an elevation of 20° within 55 seconds, which makes the laser communication has broad application prospects for rapid chain building under silent conditions.

Keywords: all optical guidance; servo control; Gauss Seidel method algorithm; quick capture; accurate pointing

1 引言

在当今激光通信领域中,往往依赖于 GPS/INS 联合导航系统来准确测定通信双方的位置及其姿态,该系统通过无线电磁信号,将联络请求和自身位置信号传递至对方,以此完成初步的定位和指向。在初始指向完成后,进行通信的两方将依照既定的初始参数执行扫描过程。无线激光通信在与其他通信方式比较时,显现出明显的优势^[1-2]: 其拥有高速率和较大通信容量;同时其具备强大的抗干扰和抗截获能力,确保了通信的保密性与安全性;此外该系统的重量、体积和功耗都相对较小^[3-4]。然而在遭遇强烈的电磁干扰时,该系统的应用将面临制约,此时电学辅助引导手段失灵,导致无法准确地进行初始定位。这种捕获手段不能再符合通信需求^[5-6]。因此,必须借助全光捕获技术^[7-10]来建立通信链路。

美国的马里兰大学(University of Maryland)在全光捕获试验中首次采用了单独的 CCD 相机进行研究^[11]。当 CCD 相机接收到光斑时,通过图像立体处理技术得到万向架旋转的角度。基于这些计算结果,利用控制系统使万向架随着激光发射端和接收端同步转动,当 CCD 相机能再次捕获到光斑后,接收端也发射出激光,从而建立通信链路。然而,在该实验中,由于该实验所使用 CCD 相机的视场捕获范围较小,这使在许多复杂环境条件下难以迅速建立激光通信。在此基础上,美国海军研究实验所(NRL, Naval Research Laboratory)进行了一项创新实验,期间运用了两台具备八个象限检测功能的探测器^[12-13]。虽然能够优化和扩大捕捉视野角度,但是又面临着背景光的干扰也随之增强的问题。国内方面,在北京大学 Xiaozheng Song 团队研发出了一种颇具成效的畸变校正技术—分段三次样条插值算法。此技术专门针对鱼眼镜头产生的光学畸变进行修正,能够根据激光斑点的初始位置准确计算出光线入射的角度(误差控制在 0.027° 以内)。使无线光通信链路的建立速度得到显著提升^[14]。各个实验结果表明,在无电子学辅助做初始指向的条件下,只通过光学手段能够完成对信标光的捕获。但这些策略仍停留在实验阶段,在现实工程实践中还未得到应用。

在没有电子学辅助的情况下,为了进一步减少捕获时间,实现激光通信系统的信标光捕获。本文采用了角反射棱镜单扫和高斯—赛德尔(Gauss-Seidel Method,简称 GS)迭代算法的融合,利用伺服控制技术,实现两个独立激光通信端机的快速捕获,精确指向与跟踪。既能解决远距离激光通信中,数传电台传输距离限制所带来的链路建立难题,又能确保远距离激光通信系统的便捷性。

2 策略分析与设计

2.1 全光捕获策略分析

目前,被广泛采纳的扫描技术方案主要包括激光预警装置方案和角反射棱镜方案。角反射棱镜方案又可分为两种模式:互相扫描与单向扫描。

为了准确锁定对方的位置,在双方均不知确切方位的情况下,必须依赖一种能够对水平广阔区域进行搜索的初始定位工具。激光预警装置拥有全方位的侦测功能,它是对初始引导系统理想的选择。假使通信双方的通信端机均配备有激光预警装置,那么激光告警器方案的具体操作流程如下所述:发射光端机 A 进行全周扫描;接收光端机 B 作为通信的接收方)处于静止接收状态。当光端机 B 收到光端机 A 发出的信标光后,通过位置解算,使自身对准光端机 A 的不确定区域,并在不确定区域内发出信标光进行扫描。当光端机 A 收到光端机 B 的信标光后,其将中断全周扫描,重复光端机 B 的指令。由于两个端机的扫描速度不同,最终两个端机会各自进入对方的捕获接收视场,这时双方会进入粗跟踪阶段。具体过程如图 1 所示。

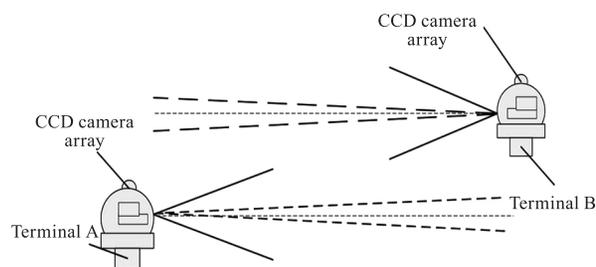


图 1 激光告警器方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser alarm scheme

对于角反射棱镜互扫方案,则是利用对两个通信光端机的扫描速度精确调整,完成对信标光的迅速捕获。光端机 A 发射信标光以角速度 ω_1 开始全

周扫描,光端机 B 以角速度 ω_2 也进行全周扫描,此时通信双方将独立执行任务。光端机 A 在扫描过程中,一旦探测到光端机 B 的存在,其内部的成像 CCD 相机便捕捉到由全反射棱镜反射回的光点信号。这一位置被准确记录后,光端机 A 随即启动调整机制,改变自身指向,以对准光端机 B。当光端机 A 进行调整之际,光端机 B 仅需进行一周扫描,便能在其 CCD 相机上捕获到从光端机 A 发射的信标光。此时,光端机 B 也记录下捕获到的位置,随即开始调整自身的视轴,使其对准 A 端,进而完成两端光轴的精准对准。具体过程如图 2 所示。

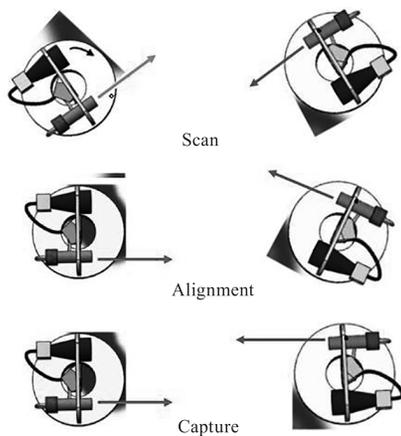


图 2 角反射棱镜双方扫描原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of dual scanning with corner reflector prism

在角反射棱镜单扫方案中,发射光端机 A 以一定的角速度进行跳步—全周扫描,接收光端机 B 处于静止状态,双方独立运作。当光端机 A 能够接收到经全反射棱镜反射回来的粗信标信号,记录下其位置,实现单方面的粗跟踪。随后光端机 B 重复光端机 A 的指令,借助伺服控制技术,实现两个通信视轴的精确对准。具体过程如下图 3 所示。

通过对比上述三种方案,可以明显看出,激光告警器通过数据引导更容易发现目标位置,但是捕获时间较长;角反射棱镜互扫方案不需要进行跳步扫描,使其能在更短的时间内完成捕获,但是在相机视场内容容易出现双光斑;而角反射棱镜单扫方案系统结构更简单、成本更低,但相较于互扫方案捕获时间较长。针对本次实验捕获不确定区域较小(方位可以在 360° 连续通信,俯仰 $\pm 10^\circ$),在后续实验系统设计和验证中将采取角反射棱镜单扫方案。面对捕获时间较长的情况,通过设计合理的扫描轨迹和 GS 迭代算法的融合研究来有效地减少捕获时间。

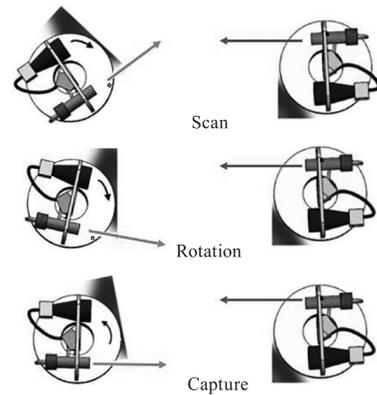


图 3 角反射棱镜单扫原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of single scan principle of corner reflection prism

2.2 全光捕获系统捕获概率

激光通信系统的捕获概率模型为:

$$P_T = P_U \cdot P_S \cdot P_D \quad (1)$$

式中, P_T 为捕获系统的捕获成功概率; P_U 为发射端机出现在接收端机捕获不确定区域内的概率; P_S 为接收端机在扫描中视场覆盖率; P_D 为捕获装置探测概率。

由于光端机视轴的初始对准存在偏差,激光通信系统的捕获时间和捕获概率受捕获不确定区域影响。而在全光捕获系统中,不存在 GPS/INS 联合导航系统和初始指向,从而不存在指向不确定区域。在扫描捕获过程中,多种因素可能会引起扫描遗漏,而对于角反射棱镜单扫方案而言,其发射端机出现在接收端机捕获不确定区域内的概率 P_U 能够达到 100%;视场覆盖的概率 P_S 在使用跳步—连续扫描也能够达到 100%。

探测器在捕获过程中,既借助 CCD 相机实现图像捕获,也依据电流阈值的设定,来判定信标光信号是否被成功接收。完成捕获的迹象表现为捕获探测器所接收的电流超过了阈值。然而当噪声产生的电流值超过电流阈值时,发生这种情况的概率称为 CCD 像素级虚警率 P_{fa} :

$$\begin{aligned} P_{fa} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \int_{I_{th}}^{\infty} e^{-\frac{(i_n - I_n)^2}{2\sigma_n^2}} di_n \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_{th} - I_n}{\sqrt{2}\sigma_n}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, i_n 为没接收到光信号时 CCD 相机上的噪声电流; I_n 为其电流均值; σ_n 为其电流均方差; I_{th} 为阈值电流。

如果发生信号的丢失现象,此时捕获探测器得到的电流值低于电流阈值,这种情况的概率称为像

素级丢失概率 P_{md} 。

$$P_{md} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{sn}} \int_{-\infty}^{I_{th}} e^{-\frac{(i_{sn}-I_{sn})^2}{2\sigma_{sn}^2}} di_{sn} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_{sn} - I_{th}}{\sqrt{2}\sigma_{sn}}\right) \quad (3)$$

式中, i_{sn} 为接收到光信号时 CCD 捕获相机上的电流; I_{sn} 为其电流均值; σ_{sn} 为其电流均方差。假设 CCD 捕获相机的像素数为 $M \times M$, 信标光覆盖 $N \times N$ 个像素, 则可推导出帧级虚警率 P_{FA} 和帧级丢失概率 P_{MD} 的表达式为:

$$P_{FA} = 1 - (1 - P_{fa})^{M^2} \quad (4)$$

$$P_{MD} = P_{md}^{N^2} \quad (5)$$

由此可获得 CCD 捕获相机在帧级的探测概率为 P_D :

$$P_D = (1 - P_{MD})(1 - P_{FA}) \quad (6)$$

在一般条件下, $\sigma_n = \sigma_{sn} = \sigma$, 并且 $I_{th} - I_n = I_{sn} - I_{th}$ 因此 CCD 捕获相机的探测概率 P_D 大于 99.4 %。

因此, 根据公式(1)可知该全光捕获系统的捕获成功概率 P_T 优于 99.4 %。

2.3 基于高斯-赛德尔迭代算法的精准指向

当接收端机的 CCD 相机首次接收到发射端机的粗信标光时, 会记录当前位置并停止全周扫描, 通过伺服控制技术使接收端机指向记录位置。因此发现目标后的精准指向是全光捕获过程中减少捕获时间的关键。

要实现精准指向首先必须计算出对方粗信标光的大地坐标系, 因此就要求出坐标转换矩阵, 通过以下公式求出坐标转换矩阵:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \times \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, $\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$ 为相机坐标; $\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}$ 为大地坐标; R 为系统

旋转矩阵; α 为转动的方位角; β 为转动的俯仰角。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ z \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, H 为坐标转换矩阵; $\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$ 为相机图像坐标; $z = 1$ 。公式(10)、(11)可以将 3 维相机坐标转换为 2 维相机图像坐标。

$$\text{首先在初始对准时, } H_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}^T,$$

(θ 为回到接收端机的视场中初始位置需要转过的方位角度) 根据误差比较公式判断是否在一定的误差范围内实现了初始对准。然后当接收端机接收到的信标光到达了相机视场中心时, 相机坐标为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \text{ 根据公式(12)计算出在双方视轴对准}$$

完成后的工作平面坐标 $\begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix}$ 。

$$X_L^{k+1} = \frac{1}{a_n} [x_1 - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} x_j^{k+1} - \sum_{j=i+1}^3 a_{ij} x_j^k] \quad (11)$$

$$\text{当 } \left\| \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} - X^k \right\| \leq \varepsilon (\varepsilon \text{ 为指向误差}) \text{ 时, 即可}$$

以确定双方视轴对准。

与传统扫描算法相比, 通过 GS 迭代算法可以有效地减少计算量, 提高计算效率; 能够更快地判断双方视轴是否对准, 减少捕获时间。

3 数据分析

为验证基于全光引导的快速捕获控制技术进行了 1.7 km 通信实验, 搭建了如下图 4 所示的系统端机(方位 360° , 俯仰 $+10^\circ$)。

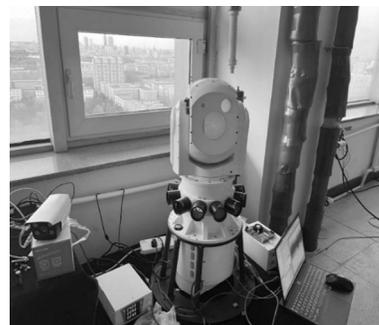


图 4 全光捕获实验现场图

Fig. 4 All-optical capture experiment scene diagram

3.1 捕获轨迹

该端机的可见光相机的视场为 $3^\circ \times 2^\circ$; 方位电机运动速度为 $90^\circ/\text{s}$; 俯仰电机运动速度为 $90^\circ/\text{s}$ 。具体扫描过程如下:

光端机 A 和光端机 B 在同一海拔高度水平放置。将光端机 A 俯仰电机指向任意位置(限位内); 光端机 B 俯仰电机也指向任意位置(限位内)。光端机 B 处于静止状态, 光端机 A 以 $90^\circ/\text{s}$ 转速做周扫捕获(方位电机每旋转 360° , 俯仰电机运动 1.5°), 相机同步拍照, 当光端机 A 发射的信标光扫过光端机 B 角锥, 光端机 A 的 CCD 相机拍到角锥回光, 根据光斑与光端机 A 转台信息确定光端机 B 位置后进行单方面的粗跟踪。光端机 B 重复上述步骤, 直到双方均捕获到角锥回光, 双方系统进行稳定粗跟踪, 根据光功率检测微调跟踪点, 进行高速激光通信。具体扫描路径如图 5 所示。

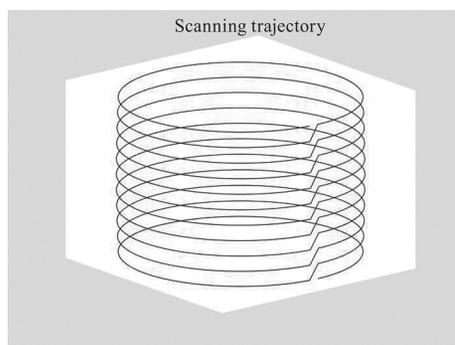


图 5 扫描轨迹示意图

Fig. 5 Schematic diagram of scanning trajectory

为了减少捕获时间, 方位俯仰电机同时运动, 因此在空间上端机运动轨迹不能做到完全覆盖。当俯仰电机运动 1.5° 时, 方位电机也运动了 1.5° , 但是仍处于可见光相机视场内, 因此能保证不存在漏扫情况; 俯仰电机在达到限位之前, 只能朝一个方向运动, 也减少了重复扫描的可能。最终经过 1000 次实验, 其中 997 次捕获成功, 捕获成功概率为 99.7%。

3.2 极限捕获时间对比

在相同实验环境下, 也进行 1000 次实验测试极限位置的捕获时间。将光端机 A 俯仰电机指向 $+10^\circ$; 光端机 B 俯仰电机指向 -10° , 分别用传统扫描算法和 GS 迭代算法在端机极限位置进行捕获测试, 重复上述实验。相机在视场内无光斑时, 收到的脱靶量为 1024 像素。光端机发射信标光, 信标捕获相机进行光斑位置识别并提取脱靶量; 粗跟踪转台根据信标接收相机脱靶量信息进行粗跟踪。具体捕

获时间如图 6 和图 7 所示。

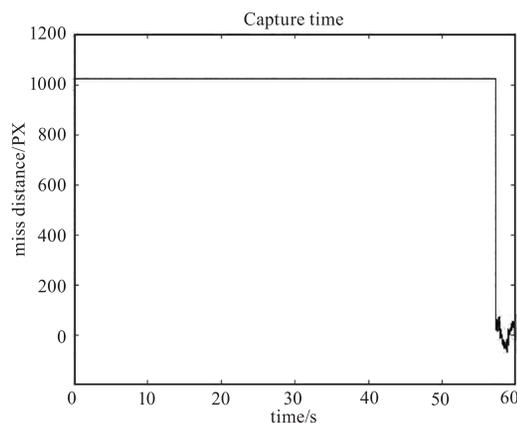


图 6 传统扫描捕获时间示意图

Fig. 6 Schematic diagram of traditional scan capture time

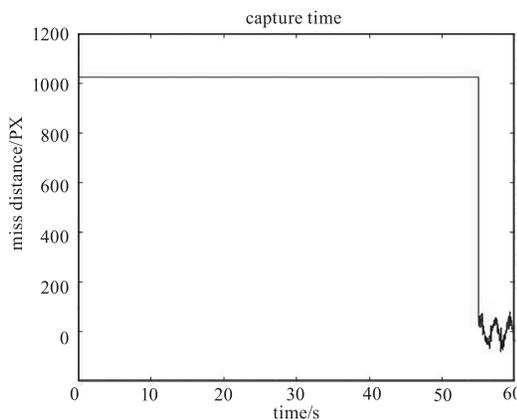


图 7 GS 迭代算法捕获时间示意图

Fig. 7 Schematic diagram of Gauss-Seidel method capture time

根据实验现象可知, 使用传统单扫描的平均总捕获时间为 57.3 s, 而使用 GS 算法的平均总捕获时间为 55.0 s。捕获时间减少了 4%。因此 GS 算法相较于传统扫描算法有明显的优化效果。

4 结论

本文针对强电磁干扰环境导致电子通信手段失效的情况下, 设计了一种基于全光引导的捕获系统。通过对全光捕获技术方案的理论研究和试验, 对全光捕获中的系统参数进行分析, 在此基础上进行了实验搭建, 验证了融合 GS 迭代算法的伺服控制系统的可行性。

本文采用了与二维伺服转台相结合的角反射棱镜方案来完成捕获。在捕获过程中, 采用了角反射棱镜单扫方案, 使捕获概率优于 99.4%; 融合了 GS 迭代算法来判断初始对准位置, 使极限位置捕获时间减少 4%。相较于传统的全光捕获模型, 提高了捕获概率, 减少了捕获时间。本系统能够稳定地完成从捕获目标光斑到稳定跟踪的功能。后续研究将

深化全光捕获系统的改进,优化捕获和跟踪系统。将增加实验距离,验证全光捕获远距离通信的可行性,使本系统有更广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Chi Nan, Lin Xianhao, Luo Zhiteng, et al. Research on ultra-high speed spaceborne visible light laser communication[J]. *Advances in Laser and Optoelectronics*, 2024, 61(7):38-44. (in Chinese)
迟楠, 林显浩, 罗志腾, 等. 超高速星载可见光激光通信技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(7):38-44.
- [2] Du Yonggang, Wang Yulin, Zhang Wentai, et al. Research status and prospect of high precision tracking and pointing technology[J]. *Mechanical Meter*, 2023, 40(12):18. (in Chinese)
杜永刚, 王禹林, 张文台等. 高精度跟踪指向技术研究现状及其展望[J]. *机械计*, 2023, 40(12):18.
- [3] Yao Linhai, Lu Peiguo, Yang Yongang, et al. Research on high precision detection method of beam pointing stability[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(2):339344. (in Chinese)
姚林海, 陆培国, 杨永安, 等. 光束指向稳定性高精度检测方法研究[J]. *应用光学*, 2022, 43(2):339-344.
- [4] Wang Zhen, Yang Ganyuan, Wang Chen, et al. Design of two-dimensional precision servo control system based on FPGA[J]. *Guangdong Communication Technology*, 2023, 43(11):65-70. (in Chinese)
王振, 杨乾远, 王琛, 等. 一种基于FPGA的二维精密伺服控制系统设计[J]. *广东通信技术*, 2023, 43(11):65-70.
- [5] Liu Yi, Chuang Jialiang, Li Jiangyong. Analysis of military requirements and key technologies for all-optical operations[J]. *Infrared*, 2022, 43(7):29-33. (in Chinese)
刘奕, 闯家亮, 李江勇. 全光作战军事需求与关键技术分析[J]. *红外*, 2022, 43(7):29-33.
- [6] Meng Lixin. Research on capture and tracking technology in airborne laser communication[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [7] Liu Weida. Research on all-optical capture technology for ground dynamic laser communication system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
刘伟达. 地面动态激光通信系统全光捕获技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- [8] Zhao Yong. Experimental study on all optical capture technology of army laser communication system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
赵勇. 陆军激光通信系统全光捕获技术实验研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [9] Hu Hanyuan. Development of ground laser communication all-optical capture experimental device[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2015.
胡瀚元. 地面激光通信全光捕获试验装置研制[D]. 长春: 长春理工大学, 2015.
- [10] Li B, Tong S, Yao H, 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.
- [11] Tzung-Hsien Ho, Stuart D. Milner, Christopher C. Davis. Fully optical real-time pointing, acquisition and tracking system for free space optical link[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5712:81-92.
- [12] Tzung-Hsien Ho, Stuart D. Milner, Christopher C. Davis. Pointing, acquisition and tracking system with omnivision[J]. *Proc. of SPIE*, 2005, 5892:589419.
- [13] Tzung-Hsien Ho, Stuart D. Milner, and Christopher C. Davis. Robust optical alignment systems using geometric invariants[J]. *Proc. of SPIE*, 2007, 6709:6709071.
- [14] Xiao Zhengsong, Lu Liu, Jun Xiongtang. High-accuracy-angle detection for ultra-wide-field-of-view acquisition in wireless optical links[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(2):25.