

星间光通信精跟踪系统的模糊自整定 PID 控制及仿真实验

郝悦含, 关贵注, 郭宇龙, 崔慧敏
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 在星间光通信技术中, 精跟踪系统对于整个光通信链路的建立和保持至关重要。本文针对精跟踪系统的被控对象——快速反射镜建模得出传递函数, 在此基础上进行参数辨识而得出完整的数学模型。采用模糊自整定 PID 控制器来优化控制效果, 提升对扰动的抑制能力。通过 Simulink 仿真实验对二者的控制性能进行了对比, 并在仿真过程中加入扰动量以试验二者的鲁棒性。仿真实验结果表明: 模糊自整定 PID 控制器在精跟踪系统的控制过程中有显著的扰动抑制能力。

关键词: 星间光通信; 精跟踪系统; 模糊自整定 PID 控制

中图分类号: TP273+.4; V443+.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2023)04-0030-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230108001

引用格式: 郝悦含, 关贵注, 郭宇龙, 等. 星间光通信精跟踪系统的模糊自整定 PID 控制及仿真实验[J]. 遥测遥控, 2023, 44(4): 30-35.

Fuzzy self-tuning PID control and simulation experiment of fine tracking system in optical communication between satellites

HAO Yuehan, GUAN Guizhu, GUO Yulong, CUI Huimin
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: In the technology of intersatellite laser communication, fine tracking system is very important for the establishment and maintenance of the entire optical communication link. In this paper, the transfer function of the controller object of the fine tracking system, the fast steering mirror is modeled, and the complete mathematical model is obtained based on the parameter optimize the control effect and improve the disturbance suppression ability. The control performance of the two is compared by Simulink, and the disturbance is added in the simulation to test the robustness of the controller. The simulation results show that the fuzzy self-tuning PID controller has significant disturbance suppression ability in the control process of fine tracking system.

Keywords: Intersatellite laser communication; Fine tracking system; Fuzzy self-tuning PID control

Citation: HAO Yuehan, GUAN Guizhu, GUO Yulong, et al. Fuzzy self-tuning PID control and simulation experiment of fine tracking system in optical communication between satellites[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(4): 30-35.

引 言

近年来, 国际上以 One Web(一网)、Star-Link(星链)等为代表、国内以“星网”等星座计划为代表的新兴低轨(Low Earth Orbit, LEO)卫星通信星座迅猛发展, 利用其可覆盖全球及低延时等突出特点, 与地面网络争夺互联网入口。激光通信成为减缓卫星频谱资源紧张、实现卫星高速通信的

有效手段^[1], 能够满足未来航天活动日益增长的通信需求。

由于太空环境复杂、卫星间通信距离非常远, 且激光的束散角小、发射功率小等原因^[2], 建立海量级的通信链路非常困难^[3]。制约星间光通信技术发展的关键因素之一是激光通信保持时间短, 不能确保通信数据的稳定传输。因而瞄准、捕获、跟踪(Pointing, Acquisition and Tracking, PAT)技术

是激光通信技术中的一个难点,亟待进行大量的研究来改进其性能,从而增强整个通信系统的能力。PAT系统的跟踪精度主要由精跟踪模块的工作性能决定。在跟踪过程中,要求精跟踪模块的动态范围小,控制带宽高,跟踪精度高^[4]。对于跟踪过程的稳定性研究,重在提高通信终端控制系统的控制精度,旨在提高通信终端对扰动的抑制能力^[5]。

模糊控制是一种非线性控制方法,属于智能控制方法^[6]。近几十年来,模糊控制在理论研究和应用领域均有了极大的发展,目前已经成为控制领域的一个重要组成部分。模糊控制器是由“专家经验”总结得到的语言型控制规则^[7]。设计者不需要知道被控对象准确的数学模型,适用于难以获取数学模型、动态特性复杂的控制对象。模糊控制系统的鲁棒性较强,适用于具有非线性、时变及纯滞后特性^[8]的系统。

本文在建立星间光通信链路精跟踪系统仿真模型的基础上,完成对精跟踪系统的误差抑制和跟踪精度提升、对跟踪控制算法的合理改进,实现有扰动条件下,精跟踪系统的高稳定度跟踪,提升整个PAT系统的性能,保证星间激光通信链路稳定快速建立。

1 精跟踪系统模型建立

1.1 PAT系统构成和工作原理

PAT技术由瞄准、捕获和跟踪三个重要过程组成,是用于实现建立和保持空间激光通信链路的关键技术。PAT系统的基本结构包括三个部分^[9]:粗瞄准装置、精瞄准装置、预先瞄准装置。粗瞄准装置用于捕捉和粗跟踪,包括万向架、粗瞄准控制器和粗瞄准探测器。精确瞄准装置包括精确瞄准镜、精确瞄准镜控制器和精确瞄准镜探测器,主要用于补偿粗瞄准装置在跟踪过程中的瞄准误差和跟踪过程中星上微振动的干扰^[10]。预先瞄准装置包括预先瞄准镜、预先瞄准控制器和预先瞄准探测器,主要用来补偿卫星之间在链路过程中由于相对移动而造成的瞄准误差。

PAT系统通常有初始指向、快速捕获、粗-精复合跟踪和动态通信4个工作阶段。首先,PAT系统完成初始指向,尽可能实现高概率捕获,减少捕获时的不确定区域,提高视轴指向的精度^[11]。然后,进入快速捕获阶段。在此阶段中,增加信标

光的束散角和粗跟踪探测器的视场是提升捕获效率最为有效的办法。接收方成功捕获对方信标光之后,移动自身接收器,使对方的信标光保持在粗跟踪视场中心位置,完成稳定粗跟踪。最后,启动精跟踪模块,对粗跟踪传递的残差实现进一步的抑制,实现精密对准。之后,启动通信激光发射单元和探测单元,开始传输信息^[12]。

PAT系统多采用粗-精复合轴体结构,在粗-精复合跟踪阶段达到高精度的跟踪效果^[13]。复合轴结构,即嵌套伺服控制结构,可以将低带宽的粗跟踪环嵌套上高带宽精跟踪环,可以使PAT系统在具有比较大的捕获范围的同时,还具有非常高的控制精度。本文的研究对象基于PAT复合轴结构。

精瞄准机构一般选择快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)来实现对光束的控制。FSM的驱动方式主要有压电陶瓷驱动和音圈电机^[14]两种。尽管音圈电机驱动方式具有较大的运动行程和较小的滞后性,但相对于压电陶瓷驱动器,音圈电机位移控制精度较低,同时,具有较高的功耗。所以本文选择压电陶瓷驱动,控制精度更高,性能更卓越。压电陶瓷驱动的FSM系统主要由以下几部分组成,包括压电陶瓷驱动器、柔性铰链、FSM,以及电阻应变片式传感器和驱动控制电路等^[15]。转动式驱动器是一种电阻片感应器,由安装在驱动器上的四根带柔性铰链的镜面组成,可通过压电陶瓷柱的形变实现镜面的微量运动;一台驱动器在伸长的同时相应缩短另一台驱动器,再通过柔性铰链将驱动的直线运动转化为FSM旋转运动,并由测角元件测得转动量。

1.2 压电陶瓷驱动下的FSM模型建立

精跟踪系统中,FSM为主要被控对象。本文主要采用机理建模的方式分析FSM结构,从而得到系统的传递函数。FSM系统是利用通电线圈电流产生的磁场来控制FSM驱动器的伸缩,由压电陶瓷驱动器产生位移。设压电陶瓷通电线圈的传递函数是 $G_1(s)$,FSM的机械结构传递函数是 $G_2(s)$,整个快反镜系统的传递函数为 $G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s)$ 。下面分别进行推导。

设压电陶瓷驱动器的线圈电阻为 R ,电感为 L ,输入电压为 U ,输出电流为 I ,则有:

$$U = RI + L \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

式子两边取Laplace变换,得到线圈输入电压

和输出电流之间的传递函数:

$$G(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{1}{Ls+R} \quad (2)$$

由于FSM所产生的推力与压电晶体中的电场强度成正比, 而电场强度又与线圈中的电流大小成正比, 因此可以得知, 压电陶瓷驱动所产生的推力大小与线圈中的电流大小成正比^[6]。传递函数 $G_1(s)$ 可以表示为:

$$G_1(s) = \frac{F(s)}{U(s)} = \frac{1}{Ls+R} \quad (3)$$

在外力驱动下的FSM等效原理如图1所示。

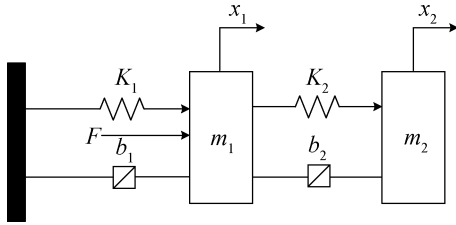


图1 外力驱动下的FSM等效原理图

Fig. 1 Equivalent schematic of FSM driven by external force

其中, K_1 和 K_2 用于模拟柔性铰链的弹性系数, b_1 和 b_2 用于模拟柔性铰链的阻尼系数, m_2 为受外力 F 驱动时解耦在FSM下的等效质量, m_1 为电阻片式传感器等效安装的质量, x_1 为实际测量得到的位移, $x_2 - x_1$ 作为快反镜镜面的变形度。列出该过程的微分方程可得:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + (b_1 + b_2) \dot{x}_1 + (k_1 + k_2) x_1 = F + b_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 \\ m_2 \ddot{x}_2 + b_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 = b_2 \dot{x}_1 + k_2 x_1 \end{cases} \quad (4)$$

对上式进行Laplace变换得:

$$\begin{cases} X_2(s)(m_2 s^2 + b_2 s + k_2) = X_1(s)(b_2 s + k_2) \\ X_1(s)(m_1 s^2 + (b_1 + b_2) s + (k_1 + k_2)) = \\ X_2(s)(b_2 s + k_2) + F(s) \end{cases} \quad (5)$$

整理可得:

$$\frac{X_1(s)}{F(s)} = \frac{m_2 s^2 + b_2 s + k_2}{(m_2 s^2 + b_2 s + k_2)((m_1 + m_2) s^2 + b_1 s + k_1) - m_2^2 s^4} \quad (6)$$

当FSM工作频率较低时, 上述系统模型可以简化为:

$$\frac{X_1(s)}{F(s)} = \frac{1}{(m_1 + m_2) s^2 + b_1 s + k_1} \quad (7)$$

随着工作频段的增加, 可以忽略常数 k_1 、 b_1 以及 s 的一次项。系统可以简化为:

$$\frac{X_1(s)}{F(s)} = \frac{1}{(m_1 + m_2) s^2 + b_1 s + k_1} \frac{m_2 s^2 + b_2 s + k_2}{\left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} s^2 + b_2 s + k_2 \right)} \quad (8)$$

从上式可知, 分子分母上均包括一个二阶的机械谐振对。机械谐振主要来自于压电陶瓷驱动器或是FSM内, 通过几个部件的非刚性机械传动引起^[7]。由于本文中只对快反镜工作于低频段的性能进行分析和改进, 对快反镜在高频段的性能暂时不做分析, 所以采用低频段的传递函数作为 $G_2(s)$ 。根据之前对 $G_1(s)$ 的推导, 结合上面的两个公式可得快反镜系统电压与角位移的传递函数模型为:

$$G(s) = \frac{X_1(s)}{U(s)} = \frac{1}{(m_1 + m_2) s^2 + b_1 s + k_1} \frac{1}{Ls+R} \quad (9)$$

1.3 电机模型辨识

对FSM电机模型的参数辨识采用莱文贝格-马夸特(Levenberg-Marquardt)算法^[8]。该算法又称为阻尼最小二乘法, 能提供非线性最小化(局部最小)的数值解, 是解决非线性最小二乘法问题的有力工具。

Levenberg-Marquardt算法可以对任意全局连续可微的非线性方程组进行迭代, 通过对步长寻优的改变来求得最优解^[9], 其求优过程如下所示。

其中, 目标是寻求非线性方程组 $F(x) = 0$ 的最优解, J_k 表示方程组在 x_k 处的Jacobi矩阵, d_k 表示 x_k 处方程组的一个搜索方向, μ_k 表示 x_k 处的迭代参数, α_k 表示 x_k 处的信赖参数。

① 给定初值 $x_1 \in R^n$, 优化精度 $\varepsilon \geq 0$, 迭代参数初值 $a_1 > 0$, $0 \leq p_0 \leq p_1 \leq p_2 \leq 1$, $k = 1$ 。

② 如果 $\|J_k^T F_k\| \leq \varepsilon$, 则停止计算; 否则, 取 $\mu_k = \alpha_k (\theta \|F_k\| + (1 + \theta) \|J_k^T F_k\|)$, 求解 $(J_k^T J_k + \mu_k I) d = -J_k^T F_k$ 可得到 d_k 。

$$\textcircled{3} \text{ 计算 } r_k = \frac{\|F_k\|^2 - \|F(x_k + d_k)\|^2}{\|F_k\|^2 - \|F_k + J_k d_k\|^2},$$

$$\text{令 } x_{k+1} = \begin{cases} x_k + d_k, & \text{if } r_k > p_0 \\ x_k, & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

$$\textcircled{4} \text{ 计算 } \alpha_{k+1} = \begin{cases} 4\alpha_k, & \text{if } r_k < p_1 \\ \alpha_k, & \text{if } r_k \in [p_1, p_2], \\ \max\{\alpha_k/4, m\}, & \text{else} \end{cases}$$

采用莱文贝格-马夸特算法对其进行参数辨识, 可得传递函数 $G(s)$ 为:

$$G(s) = \frac{35.94}{0.0004597s^3 + 0.03373s^2 + 0.1365s + 1} \quad (11)$$

2 模糊自整定PID控制器设计

本文使用的模糊PID控制器结构如图2所示，以被控量的偏差 e 和偏差的积分 ec 作为控制器的两个输入值，运用模糊规则整定控制器参数，将 K_p 、 K_i 、 K_d 的变化量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 设定为控制器的输出量。

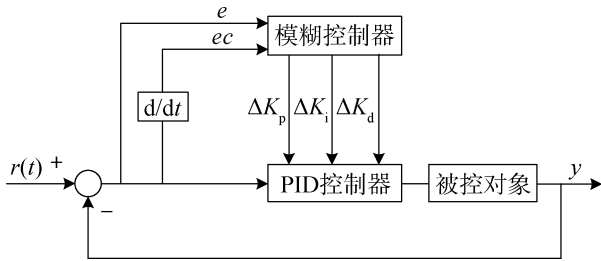


图2 模糊控制器结构图

Fig. 2 Fuzzy controller structure diagram

为减小运算量，本文采用增量式PID控制算法，将控制器参数的改变量作为控制器输入。 K_p 、 K_i 、 K_d 的计算公式变为：

$$\begin{cases} K_p = K_p' + \Delta K_p \\ K_i = K_i' + \Delta K_i \\ K_d = K_d' + \Delta K_d \end{cases} \quad (12)$$

式中， K_p' 、 K_i' 、 K_d' 是比例、积分、微分的初始参数。

2.1 变量论域及隶属度函数的选择

将 e 、 ec 的量化论域设为 $[-3, 3]$ ，输出变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的基本论域、量化论域均定为 $[-3, 3]$ ，量化等级为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。将上述五个变量的模糊子集分为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ 几部分。选取隶属度函数，三角形函数具有较高的灵敏度，将其在变量论域中心范围内均匀分布。经试验，在NB处选择Z型隶属度函数，在PB处选择S型隶属度函数。

2.2 模糊控制规则表的建立

通过仿真实验进行调整，归纳出 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊控制规则，如表1~表3所示。

3 Simulink 仿真试验及结果分析

本文中对模糊自整定PID控制和传统PID控制方法的效果进行了对比。依照第2节中得出的模糊控制规则，在Simulink平台下搭建了参数自调节模

表1 ΔK_p 模糊控制规则表

Table 1 Table of fuzzy control rules of ΔK_p

ΔK_p	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z	NS
NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NS
e	Z	PM	PM	PS	Z	NS	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	PS	Z	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z	Z	NM	NM	NM	NB	NB

表2 ΔK_i 模糊控制规则表

Table 2 Table of fuzzy control rules of ΔK_i

ΔK_i	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
NS	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS
e	Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB

表3 ΔK_d 模糊控制规则表

Table 3 Table of fuzzy control rules of ΔK_d

ΔK_d	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	Z
NS	Z	NS	NM	NM	NM	NS	Z
e	Z	Z	NS	NS	NS	NS	Z
PS	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

糊PID系统与传统PID系统对比仿真模型。其中，传统PID控制采用PID控制，且已进行参数整定。

依据第2节的模糊控制器建立模糊推理系统，并加载到MATLAB工作区中。在Simulink中调用该模糊控制器。在该模型中输入阶跃信号，幅值为1，而外部扰动为幅值为0.3的阶跃信号，在5s后加入。运行后可以得到模糊规则和模糊PID控制与传统PID控制响应曲线对比图，如图3所示。

从图中可以看到，模糊PID控制器曲线的上升

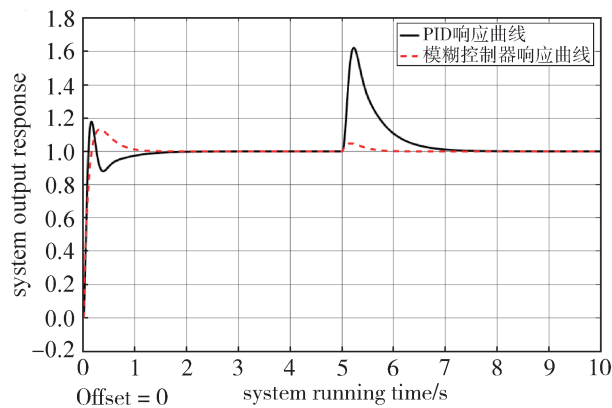


图3 模糊PID控制与传统PID控制响应曲线对比图

Fig. 3 Comparison of response curve between fuzzy PID control and PID control

时间约为0.128 s, 调节时间约为0.671 s, 超调量为12.8%; 相同状态下, 传统PID控制器曲线的上升时间约为0.092 s, 调节时间约为0.703 s, 超调量为17.8%。模糊PID控制器响应曲线的主要动态特性参数均能满足要求, 与常规PID控制器相比具有一定的优越性。在5 s处加入阶跃扰动后, 模糊PID控制器的超调量为4.8%, PID控制器的超调量为62.2%, 模糊PID控制器的抗扰动性能明显优于传统PID控制器, 控制效果较好。

4 结束语

本文深入研究星间光通信系统中的精跟踪系统, 通过机理建模和参数辨识确定其精确数学模型, 分析精跟踪系统的模拟模型, 建立快速反射镜的传递函数模型。FSM采用模糊自整定PID控制策略进行控制, 并与传统PID控制器进行控制效果的对比。在MATLAB仿真实验中, 依次输入阶跃信号和外部扰动来模拟和检验两种控制器的效果。仿真实验结果表明: 本文中所采用的模糊自整定PID控制器能够大幅提高精跟踪系统的抗扰性能, 增强鲁棒性。本控制方案中的扰动仅为阶跃信号模拟, 而实际的卫星平台振动更加复杂和杂乱, 这也是下一步需要深入研究的内容。

参考文献

[1] 王涛. 近地激光通信端机粗精跟踪系统非线性振动特性分析与优化[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.

[2] 杨成武, 谌明, 刘向南, 等. 小卫星激光通信终端技术现

状与发展趋势[J]. 遥测遥控, 2021, 42(3): 1-7.

YANG Chengwu, CHEN Ming, LIU Xiangnan, et al. Current status and development trends of minisatellite laser communication terminal technology[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(3): 1-7.

[3] 于思源, 闫坤, 谭立英, 等. 星间光通信链路稳定保持时间估算[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 137-143.

YU Siyuan, YAN Shen, TAN Liying, et al. Time estimation of the link stability in inter-satellite optical communications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 137-143.

[4] 陈词, 宋延嵩, 李金旺, 等. 空间激光通信系统光斑小目标跟踪算法研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(4): 37-43.

CHEN Ci, SONG Yansong, LI Jinwang, et al. Research on small target tracking algorithm for space laser communication system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(4): 37-43.

[5] 耿天文, 雷呈强, 高世杰, 等. 自适应光学技术在欧美激光通信地面站应用现状[J]. 遥测遥控, 2022, 43(4): 80-88.

GENG Tianwen, LEI Chengqiang, GAO Shijie, et al. A review of the application of adaptive optics technology in European and American laser communication ground stations[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(4): 80-88.

[6] CARSON E, ALEXANDRE L, ABRAHAM L. A lunar backup record of humanity[J]. Signals, 2022, 3(4): 11155.

[7] 张福瑞. 星间激光通信指向与捕获机构研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2019.

[8] ZHOU Jiayao, JIANG Lun, LU Hongbo, et al. Experiment analysis on optimization of 7 km urban space laser communication link[J]. Optik, 2022, 270: 170056.

[9] 赵义武, 娄岩, 韩成, 等. 飞机间激光通信捕获过程中动态补偿算法研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(1): 117-121.

ZHAO Yiwu, LOU Yan, HAN Cheng, et al. Research on dynamic compensation algorithm of acquisition process of laser communication between aircrafts[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(1): 117-121.

[10] MA Jing, LU Gaoyuan, TAN Liying, et al. Satellite platform vibration influence on acquisition system for inter-satellite optical communications[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 138: 106874.

[11] 文江华, 赵创社, 姜粉娥, 等. 基于压电陶瓷的快速反射镜驱动与控制研究[J]. 兵工自动化, 2015, 34(8): 59-64.

WEN Jianghua, ZHAO Chuangshe, JIANG Fene, et al.

- Study of driving and controlling with fast steering mirror based on PZT[J]. Ordnance Industry Automation, 2015, 34(8): 59-64.
- [12] TRINH PHUC V, CARRASCO-CASADO A, OKURA T, et al. Experimental channel statistics of drone-to-ground retro-reflected FSO links with fine-tracking systems[J]. IEEE ACCESS, 2021(9): 137148-137164.
- [13] 谢小平, 高铎瑞, 汪伟, 等. 星载空间激光通信系统设计与实现[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 577-584.
XIE Xiaoping, GAO Duorui, WANG Wei, et al. Design and realization of satellite-borne space laser communication system[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 577-584.
- [14] 宛雄丰, 郝士琦, 赵青松, 等. 基于 Beckmann 分布的星间光通信最优输入信号概率分布[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(3): 65-70.
WAN Xiongfeng, HAO Shiqi, ZHAO Qingsong, et al. Optimum signal input probability distribution for intersatellite optical communications based on Beckmann distribution[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2019, 20(3): 65-70.
- [15] WANG Yukun, LI Dayu, WANG Rui, et al. High-bandwidth fine tracking system for optical communication with double closed-loop control method[J]. Optical Engineering, 2019, 58(2): 026102.
- [16] 马艳芳. 基于物联网的空间光通信 APT 技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [17] 钱建新. 双级伺服系统控制算法及仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [18] 王昱棠, 张宇鹏, 徐钰蕾. 压电陶瓷驱动快速反射镜双闭环控制[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(S1): 68-72.
WANG Yutang, ZHANG Yupeng, XU Yulei. Dual-loop control strategy for fast-steering mirror driven by PZT [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(S1): 68-72.
- [19] DONG Ran, AI Yong, XIONG Zhun, et al. Experiment and analysis of the effect of fine tracking system on the unstable platform in laser communication[J]. Optoelectronics Letters, 2013, 9(4): 301-304.

[作者简介]

郝悦含 1998年生, 硕士研究生, 主要研究方向为星载伺服控制。

关贵注 1971年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为伺服控制系统设计。

郭宇龙 1981年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为星载伺服控制。

崔慧敏 1990年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为高精度光学伺服控制、目标检测跟踪、无人系统。

(本文编辑: 傅 杰)