

基于双态混沌 PSO 的机载激光通信视轴稳定控制

黎洪展, 曹 阳, 彭小峰, 张洪波, 陈 果, 王培容
(重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054)

摘 要:机载空间激光通信视轴稳定是激光通信链路建立的前提。在视轴稳定平台中应用自抗扰控制方法取得了良好的控制效果,但自抗扰控制需调整参数众多且缺乏规范的调整手段。针对自抗扰控制调参难的问题,本文提出了一种利用双态混沌粒子群算法优化自抗扰控制参数的方法。仿真结果表明,与 PSO-PID 控制方法相比,该方法具有更快的响应速度,更强的抗干扰能力和更好的鲁棒性。

关键词:双态混沌粒子群算法;自抗扰控制;机载空间激光通信;视轴稳定

中图分类号:TN929.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.07.007

Chaos Binary – State PSO of optical axis stabilization control for airborne laser communication

LI Hong-zhan, CAO Yang, PENG Xiao-feng, ZHANG Hong-bo, CHEN Guo, Wang Pei-rong
(School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract:The premise of the laser communication link establishment is the Optical axis stabilization in space laser communication. Good control effect is achieved by applying the ADRC in the optical axis stabilization, but, ADRC needs to adjust a large number of parameters and lack of standardized adjustments. In view of difficulties in adjusting the parameters of ADRC, this paper proposes to optimize ADRC parameters by using Chaos Binary-State Particle Swarm Optimization. Compared with the PSO-PID control method, the simulation experiment results show that the Chaos Binary-State Particle Swarm Optimization ADRC has better fast response speed, stronger disturbance rejection ability and stronger robustness.

Key words:Chaos Binary-State Particle Swarm Optimization; ADRC; airborne laser communication; optical axis stabilization

1 引 言

空间激光通信因其具有保密性好、抗干扰能力强、传输容量大等优点被广泛应用于航空航天领域^[1-2]。通常机载空间激光通信利用 APT 技术

(Acquisition Pointing Tracking), 即通过相应的捕获跟踪及瞄准技术建立稳定的通信链路,但机载平台上幅度较大的低频扰动会影响平台的跟踪精度,严重时还可能导致激光链路中断。因此,APT 需首先

基金项目:中国博士后科学基金项目(No. 2014M552329);重庆市教委科学技术项目(No. KJ1500934;No. KJ120827);重庆市科委社会事业与民生保障科技创新专项(No. cstc2017shmsA40019);重庆市研究生科研创新项目(No. CYS18311);重庆市基础与前沿研究计划项目(No. cstc2015jcyjA40051)资助。

作者简介:黎洪展(1995-),男,硕士研究生,主要从事空间激光通信技术方面的研究。E-mail:920273655@qq.com

通讯作者:曹 阳(1977-),男,博士,教授,主要从事空间激光通信技术方面的研究。

收稿日期:2018-12-26;**修订日期:**2019-01-18

实现视轴稳定,而机载视轴稳定平台受到的扰动主要来自载体运动产生的平台振动、姿态变化以及外界不确定因素等方面的影响^[3]。为了隔离平台受到的扰动,控制方法的选择尤为重要。

自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)是一种不依赖于系统模型的非线性控制技术,它不仅继承了 PID 的优点,还具有响应速度快、控制精度高、抗干扰能力强等特点。但是,ADRC 参数较多且难以整定,限制了其发展。文献[4]提出了利用粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)对自抗扰控制器参数进行整定,降低了整定的难度但优化时易陷入局部极小。文献[5]将混沌(chaos)思想引入 PSO 算法解决该算法易进入局部极小的问题取得了一定成果,但如何快速取得较为有效的参数组合,仍是 ADRC 最难解决的难题。

本文采用双态混沌粒子群算法(Chaos Binary-State Particle Swarm Optimization)对自抗扰控制参数进行优化。此方法,将粒子群拆分为两种状态并结合混沌思想(Chaos Theory)在全局范围内寻优,提高了整定效率并增强算法逃离局部最优的能力。

2 机载视轴系统结构

机载视轴系统由光电探测器、稳定平台、伺服控制系统执行器及传感器等设备组成^[6]。系统分为两个工作状态:①捕获状态,系统首先进行自检与初始化,光电探测设备捕捉信标光,此过程中光电编码器的数据作为位置环的反馈量。②跟踪状态,光电平台成功捕获目标后进入跟踪状态,此状态下方位、俯仰脱靶量作为跟踪环的反馈量。完整视轴系统结构如图 1 所示。

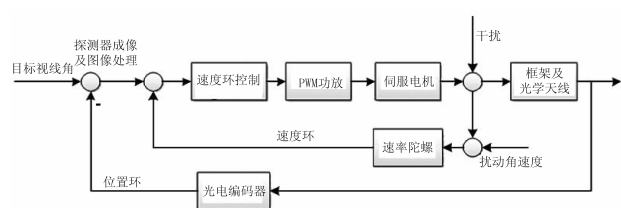


图 1 机载激光通信视轴稳定系统结构

Fig. 1 Structure of optical axis stabilization system
for airborne laser communication

3 自抗扰控制器设计

机载视轴稳定包括俯仰角(外框)和方位角

(内框)的控制,自抗扰控制器继承了传统 PID 利用“误差消除误差”控制策略的精髓,将内扰和不可预测的外部扰动归结为系统的总和扰动,使用反馈的方法对目标进行实时补偿。自抗扰控制器主要由跟踪微分器(Tracking Differentiator, TD)、扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)、非线性状态误差反馈率(Nonlinear State Error Feedback, NLSEF)三个部分组成^[7]。以二阶系统为例,其结构如图 2 所示。

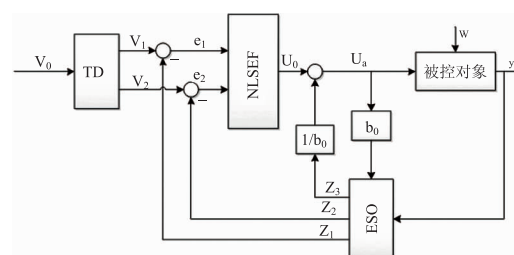


图 2 自抗扰控制器结构

Fig. 2 Structure of ADRC

3.1 跟踪微分器(TD)

TD 作为信号处理环节,跟踪输入信号 v_0 得 v_1 出并给出 v_1 的近似微分 v_2 , 利用其跟踪特性安排过渡过程、提高信噪比、减小初始误差,使得“快速”和“超调”之间的矛盾得以解决。其表达式为:

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + h \cdot v_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + h \cdot \text{fhan}(v_1(k) - v_0(k), v_2(k), r, h_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中, h 为采样步长; r 决定跟踪快慢; h_0 为滤波因子 ($h_0 = (3 \sim 10)h$); fhan 为最速控制综合函数, 参数变量关系描述如下:

$$\begin{cases} d = rh_0 \\ d_0 = h_0 d \\ y = v_1 - v_0 + hv_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|} \\ a = \begin{cases} v_2 + \frac{(a_0 - d)}{2} \text{sign}(y), & |y| > d_0 \\ v_2 + \frac{y}{h_0}, & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ \text{fhan} = - \begin{cases} r \text{sign}(a), & |a| > d \\ r \frac{a}{d}, & |a| \leq d \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

3.2 扩张状态观测器(ESO)

ESO 作为 ADRC 的核心环节对模型的不确定及未知的内、外扰动进行估计。其表达式如下:

$$\begin{cases} e(k) = Z_1(k) - y(k) \\ Z_1(k+1) = Z_1(k) + h(Z_2(k) - \beta_1 \text{fal}(e(k), a_0, \delta_1)) \\ Z_2(k+1) = Z_2(k) + h(Z_3(k) - \beta_2 \text{fal}(e(k), a_1, \delta_1) + b_0 u(k)) \\ Z_3(k+1) = Z_3(k) - h\beta_3 \text{fal}(e(k), a_2, \delta_1) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为输出误差校正增益, 决定 ADRC 观测能力; fal 是非线性函数, 其表达式为:

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta \\ e\delta^{\alpha-1}, & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (4)$$

3.3 非线性误差反馈率(NLSEF)

NLSEF 作为一个转换环节, 把简单的“线性组合”转换为“非线性组合”, 从而提高控制性能。其表达式为:

$$\begin{cases} e_1(k) = v_1(k) - Z_1(k) \\ e_2(k) = v_2(k) - Z_2(k) \\ u_0(k) = \beta_{10} \text{fal}(\sum e_1(k), a_0, \delta_2) \\ \quad + \beta_{20} \text{fal}(e_1(k), a_1, \delta_2) \\ u_a = u_0 - \frac{z_3(k)}{b_0} \end{cases} \quad (8)$$

在 ADRC 中需整定的参数较多, 但事实上, 只需对 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{10}, \beta_{20}, b_0$ 仔细试调, 其他参数可按照分离原则根据经验直接设定^[8]。而通过手动过程将这 6 个参数调整到最优控制效果的组合是非常困难的, 它需要在控制领域有非常丰富的经验且耗时较长。为了克服 ADRC 调参的难题, 本文采用双态混沌粒子群算法优化 ADRC 参数。

4 ADRC 参数的双态混沌 PSO 优化算法

基于双态混沌粒子群的机载激光通信自抗扰控制的结构图如图 3 所示。

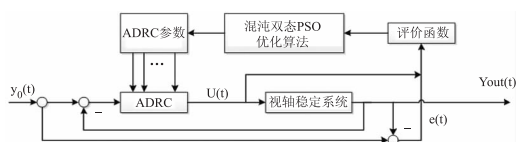


图 3 双态混沌 PSO 算法结构图

Fig. 3 Structure diagram of Chaos Binary-State PSO

4.1 适应度函数的选择

综合考虑机载空间激光通信视轴稳定的稳定性、快速性、精确性, 可选择适应度函数形式为:

$$F = \frac{1}{J} = \frac{1}{\int_0^\infty [\omega_1 t |e(t)| + \omega_2 u^2(t) + \omega_4 e(t)] dt + \omega_3 t_u} \quad (9)$$

式中, $\omega_1, \omega_2, \omega_4$ 为权值常数; ω_3 为权值; t_u 为系统响应时间; $e(t)$ 为系统误差; $u(t)$ 为控制量, 适应度函数 F 越小, 粒子越靠近最优解。

4.2 PSO 算法

PSO 源于对鸟群捕食行为的研究, 是一种新的全局优化计算技术, 其核心思想是通过个体与群体之间的信息共享来寻找最优解^[9]。不同于遗传算法(Genetic algorithm, GA)使用交叉和变异粒子的方法, PSO 通过共享每个粒子自身的最优值(p_{best} , $P_p = P_{p1}, P_{p2}, \dots, P_{pn}$)和迭代过程中群体的最优值(g_{best} , $P_g = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gn})$)不断纠正速度和方向, 并根据每个粒子的适应度, 使粒子逐渐靠近最优区域得到最优解^[10]。

$$\begin{cases} V_{in}(t+1) = \omega V_{in}(t) + c_1 \text{rand}(P_{pn}(t) - X_{in}(t)) + c_2 \text{rand}(P_{gn}(t) - X_{in}(t)) \\ X_{in}(t+1) = X_{in}(t) + V_{in}(t+1) \end{cases} \quad (10)$$

式中, $1 \leq i \leq M$, M 为群体规模, 通常设 $M = 10 \sim 100$; $1 \leq n \leq N$, N 为空间维数, X_{in} 和 V_{in} 分别表示粒子位置和飞行速度; 在 ADRC 中需要调整的参数有 6 个, 因此设 $N = 6$; c_1, c_2 为学习因子, 通常 $c_1 = c_2 \geq 2$; rand 为介于 $(0, 1)$ 之间的随机数; t 为当前迭代次数; ω 为惯性权重因子, ω 决定全局搜索能力和局部搜索能力的强弱, 通常使用线性递减权值策略^[11], 表达式为:

$$\omega(t) = \omega_{\text{star}} - (\omega_{\text{star}} - \omega_{\text{end}}) \cdot \frac{t}{T} \quad (11)$$

式中, $\omega_{\text{star}}, \omega_{\text{end}}$ 分别为惯性权重因子的最大值和最小值; T 为群体迭代最大次数。

4.3 双态混沌 PSO 算法

双态混沌 PSO 算法将传统 PSO 中的粒子群(P)分为两种不同状态的群体——搜索群体(P_1)和捕食群体(P_2), 其群体状态运行原理模型如图 4 所示。

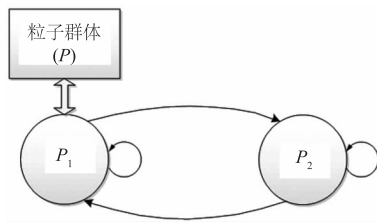


图4 双态混沌 PSO 群体状态变换原理模型

Fig. 4 Principle model of Chaos Binary - State PSO transformation

该算法在开始时处于捕食状态,当粒子陷入局部极小或者优化效率减慢时转入搜索状态,而粒子也可以从搜索状态归队进入捕食状态,每一个状态都可能达到全局最优,粒子群自适应动态分群以提高优化效率,减小粒子陷入局部极值的几率。

根据适应度偏差策略判断 PSO 有无出现“早熟”现象^[12],适应度偏差策略定义为:

$$\Delta F_i = (F_i - F_{\text{best}}) / F_i \quad (12)$$

式中, F_i 为第 i 个粒子的适应度; F_{best} 为每个粒子历史最优适应度。若连续 T_e 次 $\Delta F_i < \varepsilon$ 成立 (ε 为设定值),则判定粒子“早熟”,将其转入搜索状态。当粒子进入搜索状态时将重新在搜索空间中随机分布,其表达式为:

$$X_{jn} = X_{jn}^{\min} + \text{rand}(X_{jn}^{\max} - X_{jn}^{\min}) \quad (13)$$

搜索状态的速度位置更新公式变为:

$$V_{jn}(t+1) = \omega \cdot \text{symbol}(r) + c_1 \cdot \text{rand}(P_{jn}(t) - X_{jn}(t)) + c_2 \cdot \text{rand}(P_{gn}(t) - X_{jn}(t)) + c_3 \cdot u(0,1)(X_{jn}(t) - P_{gn}(t)) \quad (14)$$

$$X_{jn}(t+1) = X_{jn}(t) + V_{jn}(t+1) \quad (15)$$

$$\text{symbol}(r) = \begin{cases} 1, (r \geq 0.1) \\ -1, (r < 0.1) \end{cases} \quad (16)$$

式中, $c_3 \in (0,1)$; $\text{symbol}(r)$ 为可改变粒子飞行方向的符号函数, r 为随机数, $u(0,1)$ 为高斯分布函数。

捕食状态结合精英学习方法^[13]和传统 PSO 算法,捕食群体在搜索到的最优区域时进行精确搜索。对捕食群体中的精英粒子(群体领导者)进行精英学习,能协助精英粒子脱离局部点,正确的领导其他粒子,加快收敛速度。精英学习算法如下:

$$P_{pn} = P_{pn} + \eta \cdot (X_{in}^{\max} - X_{in}^{\min}) \text{Gaussian}(\mu, \sigma^2) \quad (17)$$

$$\sigma = \sigma_{\max} - (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \frac{t}{T} \quad (18)$$

式中, η 为限幅常数; $\text{Gaussian}()$ 为高斯方程; $\mu = 0$; σ 为线性递减学习率。

PSO 算法存在迭代次数增多后易收敛于局部极值点的缺陷,因此,引入混沌算法重启搜索。优化停止的粒子从捕食转换到搜索,利用 Logistic 映射产生的混沌序列^[14]重启算法,扩大搜索空间,使粒子逃离局部极小并快速收敛。

$$z_n(t+1) = \gamma \cdot z_n(t)(1 - z_n(t)) \quad (19)$$

式中, $\gamma \in (2,4]$ 为混沌参数,当 $\gamma = 4$ 时处于完全混沌状态;混沌变量 z_n 在 $(0,1)$ 内遍历。若粒子陷入局部极小,便会随机产生一个 N 维的初始向量 $z_n(0) = [z_1(0), z_2(0), \dots, z_n(0)]$,并根据式(15)得到迭代序列 $z_n(t) \in (0,1)$ 。

通过载波方式,将混沌序列 $z_n(t)$ 转化为最优变量 $z_n'(t)$:

$$z_n'(t) = x_n(t) + R_n(t)(2z_n(t) - 1) \quad (20)$$

式中, z_n' 为新的粒子位置; $R_n(t)$ 为混沌搜索半径。通过式(16)即可求得以停滞粒子位置 $x_n(t)$ 为中心,以 $R_n(t)$ 为半径的局部最优解周围的多个邻域。

利用 z_n' 计算新函数适应值 $F(Z'(t))$,若 $F(Z'(t))$ 优于 F_i ,则更新历史最优适应度 $F^* = F(Z'(t))$,并用历史最优位置 (X_i^*) 和历史最优速度 (V_i^*) 替换当前位置和速度重复执行。

$$V_i^* = \frac{(X_i^* - X_i)}{\|X_i^* - X_i\|} \quad (21)$$

5 仿真与结果分析

5.1 参数设置

仿真参数设置分为 ADRC 和双态混沌 PSO 两个部分,ADRC 设定参数为: $h = 0.01$, $h_0 = 0.08$, $r = 1000$, $a_0 = 0.01$, $a_1 = 0.3$, $a_2 = 0.6$, $\delta_1 = 0.1$, $\delta_2 = 0.01$; ADRC 中 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{10}, \beta_{20}, b_0$ 需优化参数的 6 个参数变化范围为: $\beta_1 \in (0, 200)$, $\beta_2 \in (0, 150)$, $\beta_3 \in (0, 200)$, $\beta_{10} \in (0, 100)$, $\beta_{20} \in (0, 100)$, $b_0 \in (0, 5)$ 。双态混沌 PSO 参数设为: $M = 50$, $N = 6$, $T = 100$, $c_1 = c_2 = 2$, $\omega_{\text{star}} = 0.9$, $\omega_{\text{end}} = 0.3$, $\sigma_{\max} = 1$, $\sigma_{\min} = 0.2$, $\varepsilon = 0.002$, $T_e = 6$ 。最终获得最优参数: $\beta_1 = 12.5136$, $\beta_2 = 54.0564$, $\beta_3 = 114.4713$, $\beta_{10} = 28.8036$, $\beta_{20} = 25.3863$, $b_0 = 3.0514$ 。

5.2 动态响应速度分析

两种控制方法的单位阶跃响应如图 5 所示, PSO-PID 控制系统进入稳态需 0.07 s 左右, 而基于双态混沌 PSO-ADRC 控制系统仅需 0.06 s 左右即可进入稳态, 且基本无超调。此方法具有非常强的全局搜索能力, 并且不会陷入局部最小, 能够快速的找到全局最优解, 动态响应速度和超调量皆优于 PSO-PID 控制。

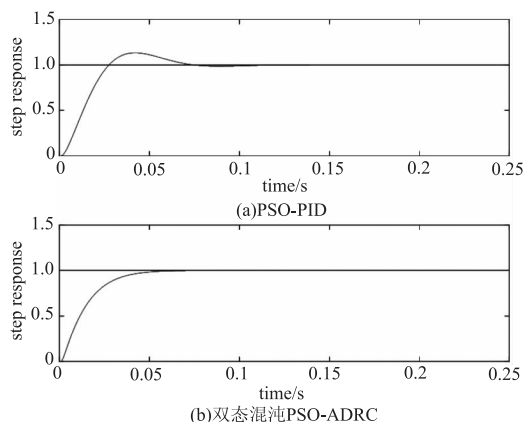


图 5 两种控制方法的单位阶跃响应对比

Fig. 5 Comparison of unit step response of two control methods

5.3 扰动隔离能力分析

在系统中加入幅度为 2 mard, 频率 20 Hz 的周期性正弦扰动信号, 测试系统扰动隔离能力^[14]。测试结果如图 6 所示, 双态混沌 PSO-ADRC 控制器隔离度为 0.0012 %, 而 PSO-PID 控制器隔离度仅为 0.0038 %。由此, 可得出结论, 双态混沌 PSO-ADRC 具有较强的抗干扰能力。

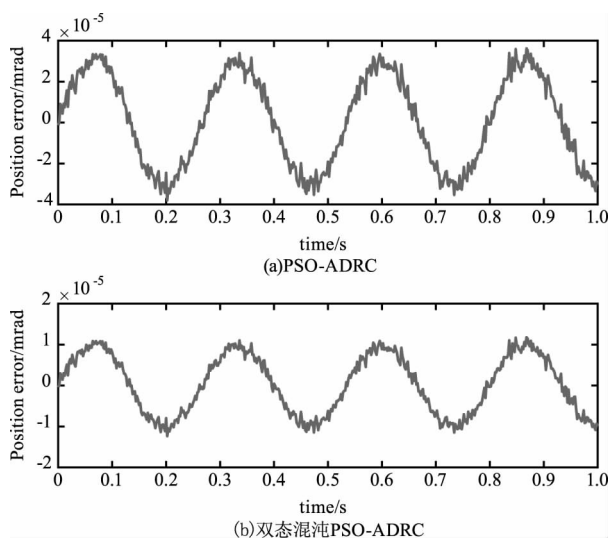


图 6 两种控制方法的扰动隔离能力对比

Fig. 6 Comparison of disturbance isolation ability of two control methods

5.4 鲁棒性分析

以不同幅度和不同频率的两种输入信号对两种控制方法的跟踪精度进行验证^[15], 实验结果如图 7 所示。

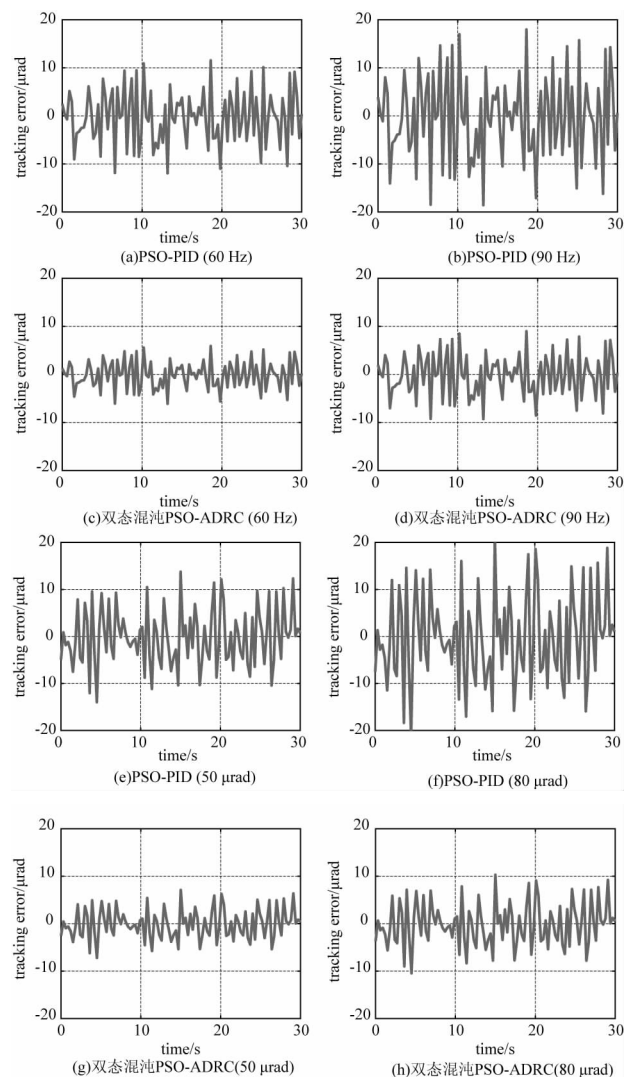


图 7 两种控制方法的鲁棒性分析

Fig. 7 Robust analysis of two control methods

如图 7 所示, 频率设为 60 Hz 时, PSO-PID 和双态混沌 PSO-ADRC 的跟踪误差分别为 $\pm 11.5 \mu\text{rad}$ 和 $\pm 6.5 \mu\text{rad}$; 当频率变为 90 Hz 时, 二者跟踪误差分别为 $\pm 19 \mu\text{rad}$ 和 $\pm 9.5 \mu\text{rad}$ 。幅值设为 50 μrad 时, PSO-PID 和双态混沌 PSO-ADRC 的跟踪误差分别为 $\pm 12 \mu\text{rad}$ 和 $\pm 8 \mu\text{rad}$; 当幅值变为 80 μrad 时, 二者跟踪误差分别为 $\pm 20 \mu\text{rad}$ 和 $\pm 10.5 \mu\text{rad}$ 。由不同频率和幅值对两种控制方法的影响对比可知, 当关键参数改变时, 双态混沌 PSO-ADRC 具有更低的跟踪误差和较强的鲁棒性。

6 结 论

本文结合混沌思想和 PSO 算法的优点,提出了一种双态混沌 PSO 算法优化 ADRC 参数,并将其与 PSO-PID 控制进行对比实验。仿真结果表明,在机载激光通信平台具有大量非线性扰动和外部扰动的情况下,双态混沌 PSO-ADRC 控制器具有更快的响应速度、更小的超调量和较好的扰动隔离性与鲁棒性。

参考文献:

- [1] TONG Shoufeng,JIANG Huilin,LIU Yunqing,et al. Optimum design of bandwidth for the APT coarse tracking assembly in free space laser communication[J]. Opto-Electronic Engineering,2007,(9):16-20. (in Chinese)
佟首峰,姜会林,刘云清,等. 自由空间激光通信系统 APT 粗跟踪伺服带宽优化设计[J]. 光电工程,2007,(9):16-20.
- [2] LI Yimang,SHENG Lei,CHEN Yunshan. Design and implementation of high-speed laser spot detection systems[J]. Laser Technology,2015,39(4):533-536. (in Chinese)
李一芒,盛磊,陈云善. 高速激光光斑检测系统的设计与实现[J]. 激光技术,2015,39(4):533-536.
- [3] CAO Yang,RONG Jian,ZHANG Hongmin,et al. Fuzzy variable structure multiple-mode tracking for airborne laser communication system[J]. Acta Photonica Sinica,2014,43(8):94-99. (in Chinese)
曹阳,荣健,张红民,等. 机载激光通信终端的模糊变结构跟踪方法研究(英文)[J]. 光子学报,2014,43(8):94-99.
- [4] SHI Yongli,HOU Chaozhen,SU Haibing. Auto-disturbance-rejection controller design based on particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of System Simulation,2008,(2):433-436. (in Chinese)
史永丽,侯朝桢,苏海滨. 基于粒子群优化算法的自抗扰控制器设计[J]. 系统仿真学报,2008,(2):433-436.
- [5] CHENG Qiming,CHENG Yiman,WANG Mingmei,et al. The applied research on ADRC based on chaos-PSO optimization in SG water level control[J]. East China Electric Power,2011,39(6):957-963. (in Chinese)
程启明,程尹曼,汪明媚,等. 基于混沌粒子群算法优化的自抗扰控制在蒸汽发生器水位控制中的应用研究[J]. 华东电力,2011,39(6):957-963.
- [6] XIE Ruihong. The research of stabilization and tracking control techniques on airborne opo-electric platform servosystem[D]. Changchun:Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,2017. (in Chinese)
谢瑞宏. 机载光电平台伺服系统稳定与跟踪控制技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2017.
- [7] HAN Jingqing. From PID technique to active disturbances rejection control technique[J]. Control Engineering of China,2002,(3):13-18. (in Chinese)
韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程,2002,(3):13-18.
- [8] LI Shuqing,ZHANG Shengxiu,LIU Yinan,et al. Parameter-tuning in active disturbance rejection controller using time scale[J]. Control Theory & Applications,2012,29(1):125-129. (in Chinese)
李述清,张胜修,刘毅男,等. 根据系统时间尺度整定自抗扰控制器参数[J]. 控制理论与应用,2012,29(1):125-129.
- [9] HUANG Yourui,QU Ligu. Parameter tuning and implementation of PID controller[M]. Beijing:Science Press,2010. (in Chinese)
黄友锐,曲立国. PID 控制器参数整定与实现[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [10] Liu C,Zang B. Application and the parameter tuning of ADRC based on CPSO[C]//Control & Decision Conference,IEEE,2012.
- [11] LIU Zhaozhu,ZHANG Yingjie,ZHANG Jing,et al. Active disturbance rejection control of a chaotic system based on immune binary-state particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Physica Sinica,2011,60(1):789-797. (in Chinese)
刘朝华,张英杰,章兢,等. 基于免疫双态微粒群的混沌系统自抗扰控制[J]. 物理学报,2011,60(1):789-797.
- [12] MENG Hongji,ZHENG Peng,MEI Guohui,et al. Particle swarm optimization algorithm based on chaotic series[J]. Control and Decision,2006,(3):263-266. (in Chinese)

- 孟红记,郑鹏,梅国晖,等. 基于混沌序列的粒子群优化算法[J]. 控制与决策,2006,(3):263-266.
- [13] Zhan Z H,Zhang J,Li Y, et al. Adaptive particle Swarm optimization[J]. IEEE Trans. Syst. Man. Cyber (Part B), 2009,39(6):1362-1381.
- [14] KUANG Ping,LI Jun,LEI Yang, et al. Active disturbance rejection control of high precision stabilized platform servo control system[J]. Industrial Instrumentation & Automation,2016,(1):14-18. (in Chinese)
- 邝平,李军,雷阳,等. 高精度稳定平台伺服系统的自抗扰控制[J]. 工业仪表与自动化装置,2016,(1):14-18.
- [15] CUI Ning,CHEN Xinglin,CAO kairui, et al. Fuzzy active disturbance rejection control of fine tracking system for free space optical communication[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5):1394-1400. (in Chinese)
- 崔宁,陈兴林,曹开锐,等. 空间光通信精跟踪系统的模糊自抗扰控制[J]. 光学精密工程,2015,23(5):1394-1400.