

基于改进加速度惯量反馈的机载激光通信平台稳定策略

曲正*, 常帅, 董岩, 宋延嵩

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

摘要 在闭环控制回路中引入限幅型加速度惯量反馈和扩张状态观测器复合的优化算法, 保证机载激光通信平台对瞬态阶跃响应的稳定性, 优化了平台对环路各阶扰动的抑制能力。从系统扰动响应的角度对常规加速度惯量反馈算法进行阐述, 分析了该算法的输入输出(I/O)特性和扰动抑制能力, 并指出它在实际应用中存在的问题。逐一地引入限幅算法、降阶扩张状态观测器对常规加速度惯量算法进行分步改进, 给出改进过程中的性能分析和特性分析。搭建仿真模型和物理实验对所提优化算法进行验证。实验结果表明: 当平台以 $70 (^{\circ})/s$ 的速度阶跃时, 改进后的控制环路的阶跃超调量幅值约为比例-积分-微分(PID)控制环路的 50%; 当平台进行 $5 (^{\circ})/Hz$ 的空间扰动隔离时, 与 PID 控制环路相比, 改进后的平台对信标光的动态稳定精度从 $198 \mu rad$ [均方根(RMS)统计方式] 提升至 $14.28 \mu rad$ (RMS), 控制环路的动态扰动隔离度有 11.42 dB 的优化表现。

关键词 光通信; 加速度惯量反馈; 机载激光通信平台; 光轴稳定; 扩张状态观测器; 扰动响应; 扰动隔离

中图分类号 TN929.1; TP79; V243.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2306007

Stability Decision of Airborne Laser Communication Platform Based on Improved Acceleration Inertia Feedback

Qu Zheng*, Chang Shuai, Dong Yan, Song Yansong

National Defense Key Discipline Laboratory on Space-Ground Laser Communication, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract An optimization algorithm combining limiting acceleration inertia feedback and an extended state observer was implemented in the closed-loop control loop to ensure the stability of the airborne laser communication platform to transient step response and optimize the platform's ability to suppress various order disturbances in the loop. Considering the system disturbance response as the breakthrough perspective, the conventional acceleration inertia feedback algorithm was explained, and the I/O characteristics and disturbance suppression ability of the algorithm were studied. Problems were found in the practical application as indicated. Limiting algorithms and reduced-order extended state observer were individually incorporated to improve conventional acceleration inertia feedback algorithms by step. The performance analysis and character analysis of the improvement process were studied. The proposed optimization algorithm was verified by simulation processes and physical experiments. The experimental results show that when the platform steps at a speed of $70 (^{\circ})/s$, the step overshoot of improved control loop is approximately 50% that of the proportion-integration-differentiation (PID) control loop. Compared to the stable accuracy of the PID control loop [$198 \mu rad$ (root mean square (RMS))], when the platform performed spatial disturbance isolation of $5 (^{\circ})/Hz$, the dynamic stability accuracy of the improved platform for beacon light improves to $14.28 \mu rad$ (RMS). Further, the disturbance isolation of the improved control loop has an optimized performance of 11.42 dB.

Key words optical communications; acceleration inertia feedback; airborne laser communication platform; optical axis stability; extended state observer; disturbance response; disturbance isolation

OCIS codes 060.2605; 010.0280; 060.4150

收稿日期: 2021-05-07; 修回日期: 2021-05-20; 录用日期: 2021-06-16

基金项目: 中央引导地方科技发展基金(202002036JC)

通信作者: *qizi1994@126.com

1 引言

近年来,随着高空无人系统对合作信标载荷的空间对准精度和通信距离的要求越来越高,同时随着空间激光遥感技术的提升,机载激光通信平台正逐渐向极窄束散角、高精度/长距离跟瞄的方向发展,关于激光通信平台光轴稳定技术的研究日益受到重视^[1-3]。对中小型机载激光通信平台而言,由于受到体积、质量等系统条件约束,所涉及的光轴稳定技术通常指基于陀螺惯性反馈和电机带载驱动的一级光轴稳定技术。该技术利用陀螺的空间姿态敏感实现平台光轴的惯性指向与载机扰动相隔离,进而实现平台的无差空间惯性指向和对合作信标光的精准捕获、跟踪^[4-6]。

激光通信平台对载机扰动的隔离程度也称平台的扰动隔离度,是评价平台光轴稳定技术的重要标准^[7]。相比于定基座激光通信平台,机载动基座激光通信平台的应用环境更加复杂。机载平台的扰动源除了定基座平台的大气信道干扰(包括散射、湍流及衰减等),还有载机空间运动引起的大幅度高阶扰动(包括载机的空间姿态变化、机体振动、飞行过程中的气流变化和风阻等)。由于平台空间扰动的扰动源组成复杂、阶次较高,通常以正弦扰动形式对其进行有效分析,如常见的 $5^\circ/\text{Hz}$ 正弦扰动^[8-10]。在对空间扰动的隔离方法进行研究的过程中,较为常见的环路稳定控制算法包括比例-积分-微分(PID)控制算法、

非线性自抗扰控制算法、最优控制、非线性滑模控制、加速度惯量反馈控制等。其中,非线性自抗扰控制算法具有更平滑的控制响应和更优的静态误差,但存在较大的动态滞后;最优控制的优势在于利用最小的控制代价来实现系统的零差性和稳定性,但收敛速度依赖于更高带宽的状态反馈;非线性滑模控制有更高的收敛速度,但有较大的控制残差。由于激光通信平台对动态环境的响应时效性、鲁棒性及控制精度等指标均有较高要求,在上述指标的综合约束下,PID 闭环校正和加速度惯量反馈校正仍是当前最为常见的扰动抑制控制算法。PID 闭环校正的实现过程虽然可以较好地适应平台的动态使用环境,但受环路带宽、相频裕度、内部噪声等一系列控制系统性能因素的限制,仍然无法对上述的扰动进行理想隔离;扰动残差过大,导致光电探测器视场抖动,进而平台无法完成较长距离的信标光识别和跟踪工作^[11-12]。

本文利用加速度惯量反馈优化方式对载体空间扰动进行有效隔离,并针对加速度惯量反馈算法的不足进行进一步改进和优化,得到平台对空间扰动稳定、高效的抑制结果。

2 平台工作原理及加速度惯量反馈理论

2.1 机载激光通信平台工作原理

机载激光通信平台主要由稳定和跟踪控制模块、通信收发模块、光学系统组成。平台的工作原理示意图如图 1 所示。

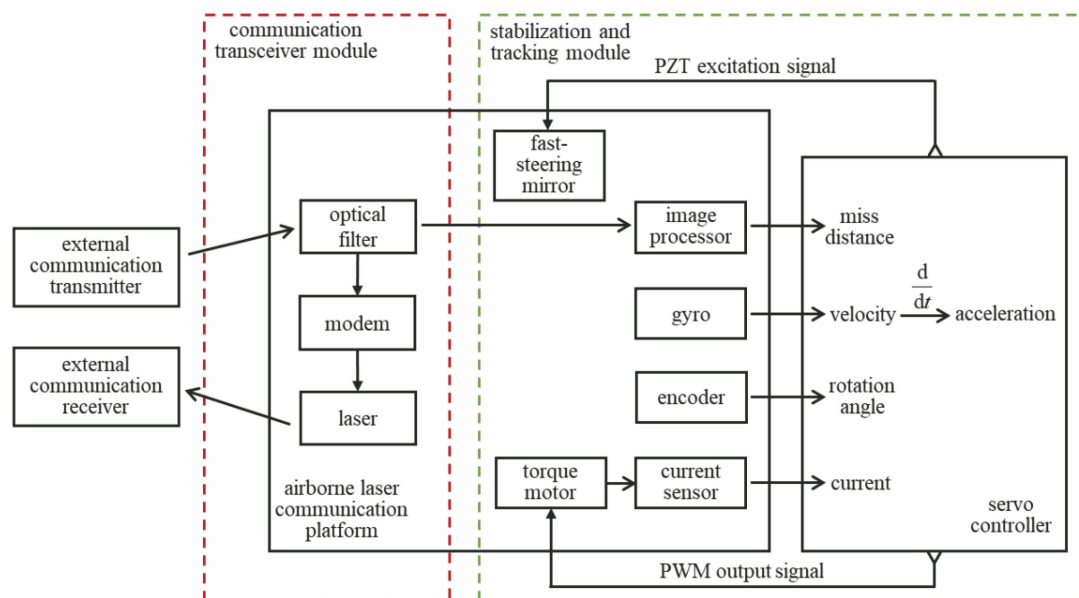


图 1 机载激光通信平台工作原理示意图

Fig. 1 Schematic of working principle of airborne laser communication platform

其中,稳定和跟踪控制模块以图像处理、陀螺、编码器、电流传感器为各阶物理量的敏感元件,以快速反射镜、伺服力矩电机为各级执行元件,采用伺服控制器对上述元件进行数据解析、滤波处理、算法校正及可调制脉宽波(PWM)功率驱动,使平台最终在动态扰动下实现对目标光源的惯性指向捕获和精密跟踪;收发模块由探测器、激光器、放大器及调制解调器组成,采用幅度调制和直接探测的模式,在跟瞄状态下实现数据对传;光学系统利用卡塞格林望远镜单元对平台进行六轴分光滤波,保证收发模块和 CCD 探测器同轴耦合,即实现平台指向光轴与通信收发光轴的同时对准。

机载激光通信平台的闭环控制在考虑平台的静态表现同时,须利用陀螺等敏感元件搭建惯性稳态环路作为控制内环,对载机振动和姿态变换进行有效隔离或补偿,进而实现平台在空间动态扰动下对合作信标的理想引导和跟踪。以陀螺稳定控制回路为硬件基础,从扰动响应的角度对基于加速度惯量反馈的闭环算法进行分析阐述。

2.2 基于扰动响应的加速度惯量反馈算法

2.2.1 控制系统扰动响应分析

从扰动响应的角度对加速度惯量反馈算法进行引述,扰动响应定义为控制系统输出量 $Y(s)$ 与扰动量 $D(s)$ 之间的传递关系^[13],扰动响应示意图如图 2 所示。

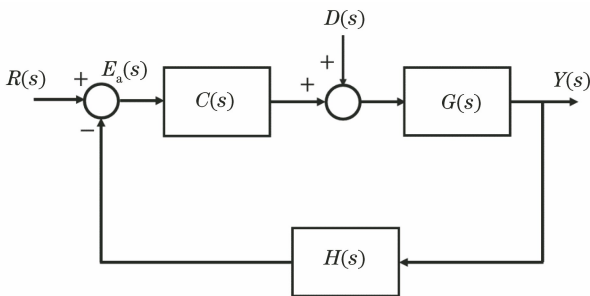


图 2 控制系统扰动响应示意图

Fig. 2 Schematic of disturbance response of control system

图 2 中 $R(s)$ 为控制系统输入, $C(s)$ 为闭环控制器, $G(s)$ 为控制系统传递函数, $H(s)$ 为闭环反馈函数, $E_a(s)$ 为误差信号。由控制系统的传递关系可得扰动响应的表达式为

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)C(s)H(s)} \quad (1)$$

对于常规 PI 控制器,有 $C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$ 。令控制系统传递函数 $G(s) = \frac{1}{Js}$, 闭环反馈函数 $H(s) =$

1, 则有

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{s}{Js^2 + K_p s + K_i} \quad (2)$$

式中:控制器的比例系数 K_p 反映控制系统对中频扰动的抑制能力;积分系数 K_i 反映控制系统对低频扰动的抑制能力;控制系统的转动惯量 J 反映控制系统对高频扰动的抑制能力。在控制系统校正环节的设计过程中,对常规 PI 算法进行参数设计可以实现对中低频扰动的有效隔离,但无法同时对高频扰动进行隔离。对于实际激光通信平台,考虑从加速度惯量优化的角度进一步提升其控制系统的扰动抑制能力。

2.2.2 加速度惯量反馈算法的搭建

激光通信平台的加速度惯量反馈流程如图 3 所示。

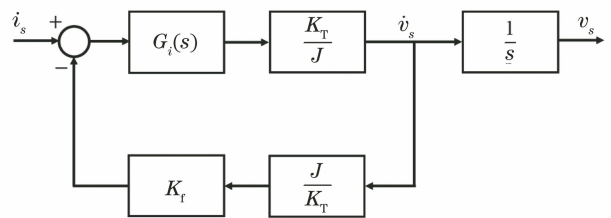


图 3 加速度惯量反馈流程示意图

Fig. 3 Schematic of acceleration inertia feedback process

图 3 中, i_s 为激光通信平台控制环路的电流输入, v_s 为控制环路的加速度输出, K_T 为平台负载电机的力矩系数, K_f 为平台闭环反馈支路电子惯量反馈系数。若 $G_i(s)$ 为激光通信平台的理想电流模型, 则有

$$\frac{v(s)}{i(s)} = \frac{K_T}{1 + K_f} \times \frac{1}{s} = \frac{K_T}{(1 + K_f)Js} \quad (3)$$

可以看出,在 K_f 的调控作用下,系统扰动响应衰减了 $1 + K_f$, 此时激光通信平台轴向回传的等效控制惯量为 $(1 + K_f)J$ 。

与此同时,等效惯量的提升也使平台对给定输入的响应能力降低,需要在速度环路中对平台控制系统的开环增益进行补偿^[14], 此时平台等效的速度环路结构如图 4 所示。

图 4 中, $G_i(s)$ 为校正后的平台电流闭环传递函数, u_s 为平台速度闭环参考输入, v_s 为平台速度闭环输出。此时平台控制环路中引入的增益补偿 $1 + K_f$ 与(3)式中的 $\frac{1}{1 + K_f}$ 参量相互抵消,若令平台控制系统反馈函数 $H(s) = 1, D(s) = 0$, 则平台速度闭环的传递函数为

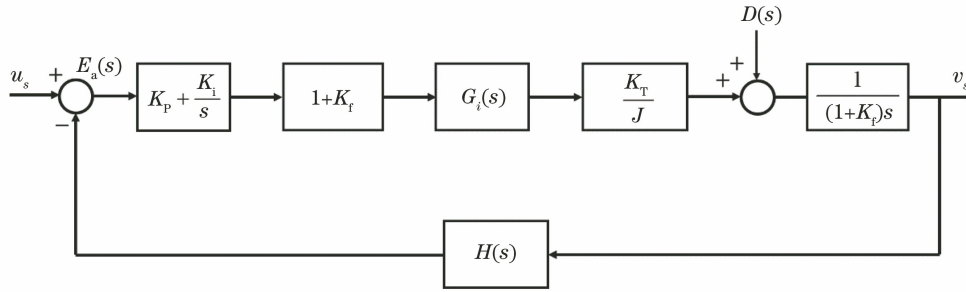


图 4 增益补偿后的等效速度环路结构示意图

Fig. 4 Schematic of equivalent speed loop structure after gain compensation

$$\frac{v(s)}{u(s)} = \frac{K_T(K_p s + K_i)G_i(s)}{J s^2 + K_T(K_p s + K_i)G_i(s)} \quad (4)$$

$$K_m = \left| \frac{y_i}{u_{PWM}} \right| \quad (6)$$

此时平台控制系统对外部给定参考输入的跟随能力和控制系统闭环相位均与 K_f 无关,只增加了对外界扰动的抑制。若 $D(s) \neq 0$,此时激光通信平台对外界扰动响应的最终传递形式为

$$\frac{v(s)}{D(s)} = \frac{s}{(1+K_f)[J s^2 + K_T(K_p s + K_i)G_i(s)]} \quad (5)$$

结合(1)~(5)式,得出优化结论:加速度惯量优化可以在全频段对扰动进行 $1+K_f$ 倍的抑制,且激光通信平台控制环路的相位不会发生改变^[15-16]。

3 改进的加速度惯量反馈算法设计

3.1 限幅型加速度惯量反馈算法的设计

激光通信平台中的常规加速度惯量反馈算法具有操作简单、不受控制环路带宽约束、不改变控制环路的相位和指令响应等优点,但也存在相应的不足,增大了平台控制系统内环的负荷。惯量优化的实际应用过程中,扰动抑制能力成倍提升的同时平台控制系统内环的给定输出量呈等效倍率提升的趋势,若提升倍率过大,从平台控制系统反馈的角度考虑,在控制系统收敛的过程中会出现真实反馈量超过反馈量观测量程的情况,造成控制环路反馈失效,进而平台控制环路失控;与此同时,激光通信平台的驱动单元在这种饱和情况下同样可能会出现长时间峰值驱动的情况。基于上述分析,特别地在平台控制系统内环中引入限幅控制算法,得到限幅型加速度惯量反馈(LAF)算法。

结合平台控制系统的电流环给定输入,对电流环控制器的输出端进行限幅控制算法的设计,若平台控制系统电流环开环传递函数 $G_{i_o}(s)$ 的分子项系数 K_m 可由平台数字 PWM 驱动信号 u_{PWM} 和对应的平台电流采样反馈信号 y_i 得到,则有

若设计平台控制系统的电流环实际控制器传递函数为 $C_i(s)$,环路反馈系数 $H_i(s) = 1$,电流环给定输入为 $u_i(s)$,平台对负载电机工作电流的有效采样区间为 $|y_i| \leq y_{max}$,此时由 $C_i(s)$ 到平台输出 PWM 信号的执行量为 $u_{PWM}(s)$,有

$$u_{PWM}(s) = E_i(s) \cdot C_i(s), \quad (7)$$

其中

$$E_i(s) = u_i(s) - y_i(s). \quad (8)$$

在平台数字离散系统下对 u_{PWM} 进行限幅处理, k 时刻的平台 PWM 实际输出为

$$O(k) = \begin{cases} u_{PWM}(k), & -L_m \leq u_{PWM}(k) \leq L_m \\ L_m, & u_{PWM}(k) > L_m \\ -L_m, & u_{PWM}(k) < -L_m \end{cases}, \quad (9)$$

$k = 1, 2, 3, \dots,$

式中: L_m 为预设的极限限位值。 L_m 由采样量程 y_{max} 和平台开环传递函数的分子项系数 K_m 决定,有

$$|L| \leq \left| \frac{y_{max}}{K_m} \right| \quad (10)$$

再结合(3)式对 K_f 进行调控设计,在有效反馈量程内实现对平台所受外界扰动的有效抑制,保证激光通信平台控制模块的稳定工作。

根据上述对 LAF 算法的设计分析,得到激光通信平台在有效工作量程内对扰动隔离的优化,但在一些极端的上升区间内,例如对一些较大速度阶跃的瞬态响应,平台的控制系统仍有可能出现积分外环在未达到稳态收敛时内环便提前达到输出饱和状态的情况,使内环在上升过程中产生一定的非线性相位激荡;在积分作用下,平台在速度阶跃响应的过程中相应地产生近似二阶三角波的超调扰动,该扰动影响激光通信平台在空间指向过程中的稳态收敛速度。当前控制系统对于光轴稳定而言能观测到的

物理量只有平台速度和电流传感量,为了对非线性的相位振荡现象进行修正和改进,设计了一种降阶型扩张状态观测器,对平台控制系统的瞬态特性进行进一步估计和补偿。

3.2 基于扩张状态观测器的改进型 LAF 设计

扩张状态观测器(ESO)是一种对系统的未知扰动进行状态扩张,从而实现系统状态和扰动进行有效估计和补偿的状态观测器^[17-18],与高阶的扩张状态观测器相比,降阶扩张状态观测器具有低滞后、少变量、易调控的优点^[19-20]。首先对扩张状态观测器的原理和观测性能进行理论分析,在此基础上对扩张状态观测器的降阶设计和环路补偿方式进行阐述。

3.2.1 扩张状态观测器及其收敛性能分析

对被控对象的时间域微分观测模型进行描述,考虑本文的激光通信平台为二阶系统,有

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}, w, t) + bu, \quad (11)$$

式中: y 为平台控制系统的输出量; \dot{y} 为 y 的一阶微分量; \ddot{y} 为 y 的二阶微分量; u 为平台控制系统的输入量; b 为输入常量系数; t 为平台工作时刻; w 为平台所受外部不确定描述; $f(y, \dot{y}, w, t)$ 为基于观测信号的平台内外部动态总描述。从而有对激光通信平台状态的估计^[21],表达式为

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}), \quad (12)$$

$$\text{式中: } \hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{y} \\ \dot{\hat{y}} \\ f \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ b \\ 0 \end{bmatrix}, \text{平台控制}$$

环路的观测增益矩阵 $L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix}$ 。忽略(11)式中待估

计的 f ,取 $C = [1 \ 0 \ 0]$, $D = [0]$ 。令

$$\hat{y} = C\hat{x} + Du, \quad (13)$$

同时令 $u_c = [u \ y]^T$ 为平台控制系统的增广输入,有

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + [B - LD \ L]u_c \\ y_c = \hat{x} \end{cases} \quad (14)$$

受到观测方程的收敛特性约束, L 可由观测方程特征根的位置得出,有

$$\lambda(s) = |sI - (A - LC)| = (s + \omega_0^3). \quad (15)$$

由二项式定理^[22],得

$$l_i = \frac{(n+1)! \omega^i}{i! (n+1-i)!}, \quad i = 1, 2, \dots, n+1. \quad (16)$$

故对于二阶系统,有

$$L = [l_1 \ l_2 \ l_3]^T = [3\omega_0 \ 3\omega_0^2 \ \omega_0^3]^T. \quad (17)$$

为分析 ESO 的观测误差,取 $y = Cx + Du$, 那么对于原平台状态 $\dot{x} = Ax + Bu$, 有

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = (A - LC)(x - \hat{x}). \quad (18)$$

将(16)式代入(18)式,展开有

$$\dot{x}_i - \dot{\hat{x}}_i = -\frac{(n+1)! \omega^i}{i! (n+1-i)!} (x_1 - \hat{x}_1) + (x_{i+1} - \hat{x}_{i+1}), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (19)$$

$$x_{n+1} - \hat{x}_{n+1} = -\omega^{n+1}. \quad (20)$$

分别在(19)式和(20)式两端同时除以 ω^{i-1} 和 ω^n , 同时记

$$e_i = \frac{\dot{x}_i - \dot{\hat{x}}_i}{\omega^{i-1}}, \quad i = 1, 2, \dots, n+1, \quad (21)$$

$$a_i = \frac{(n+1)!}{i! (n+1-i)!}, \quad i = 1, 2, \dots, n+1, \quad (22)$$

得到

$$\dot{e} = \omega A_0 e, \quad (23)$$

其中

$$A_0 = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{i-1} & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_i & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, n+1, \quad (24)$$

$$e = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_i]^T, \quad i = 1, 2, \dots, n+1. \quad (25)$$

由(23)式可知,若矩阵 $L - AC$ 的特征根具有负实部,那么存在正数 $\omega > 0$, 使

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_i(t) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n+1, \quad (26)$$

进而实现观测器对平台控制系统状态的跟踪收敛。

3.2.2 降阶扩张观测器的设计

进一步对(12)式进行降阶处理,将(12)式转换为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} (y - z_1) \\ z_3 = \int l_3 (y - z_1) dt \end{cases} \quad (27)$$

(27)式可分为两部分,一部分是 Luenberger 型观测器,另一部分是一个与平台扰动相关的积分器。

根据 2.2 节的优化结论,对于存在某一确定优化系数 K_f 的激光通信平台, \dot{y} 可直接由平台电流的观测值与优化后的电子惯量估算得出,那么可以将 (27) 式转换为用 z_1 和 z_2 来跟踪 $x_2 = \dot{y}$ 和 $x_3 = f$ 的形式,进而将 (27) 式设计为^[23]

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = bu + l_1(y - z_1) \\ \dot{z}_2 = \int l_2(y - z_1) dt \end{cases} \quad (28)$$

同样地,考虑观测方程的收敛特性,参照 (14)~(17) 式的特征根配置方式,降阶后的理想观测增益矩阵 L 应为

$$L = [l_1 \quad l_2]^T = [2\omega_0 \quad \omega_0^2]^T, \quad (29)$$

即调节观测器的带宽 ω_0 来完成对 L 的整定。

结合 (28)、(29) 式的设计结果,按照 (30) 式的补偿形式,对激光通信平台的 LAF 控制环路进行线性

前馈补偿。

$$v(s) = v_0(s) - z_2 k', \quad (30)$$

式中: $v_0(s)$ 为平台控制系统速度闭环控制器的输出量; $v(s)$ 为平台控制系统速度闭环控制器在 ESO 估计及补偿作用下的最终输出量; k' 为观测器输入增益参数。

4 仿真与实验

4.1 环路仿真对比

为了进一步验证 ESO 对 LAF 的改进程度,为了直观对比改进的 LAF 和常规 PID 控制器对扰动的抑制程度,在保证仿真所用环路模型、积分系数和闭环 PI 校正函数一致的前提下,分别搭建基于 PID、LAF 及 LAF+ESO 估计补偿复合的伺服控制环路进行仿真对比。对比仿真的流程如图 5 所示。

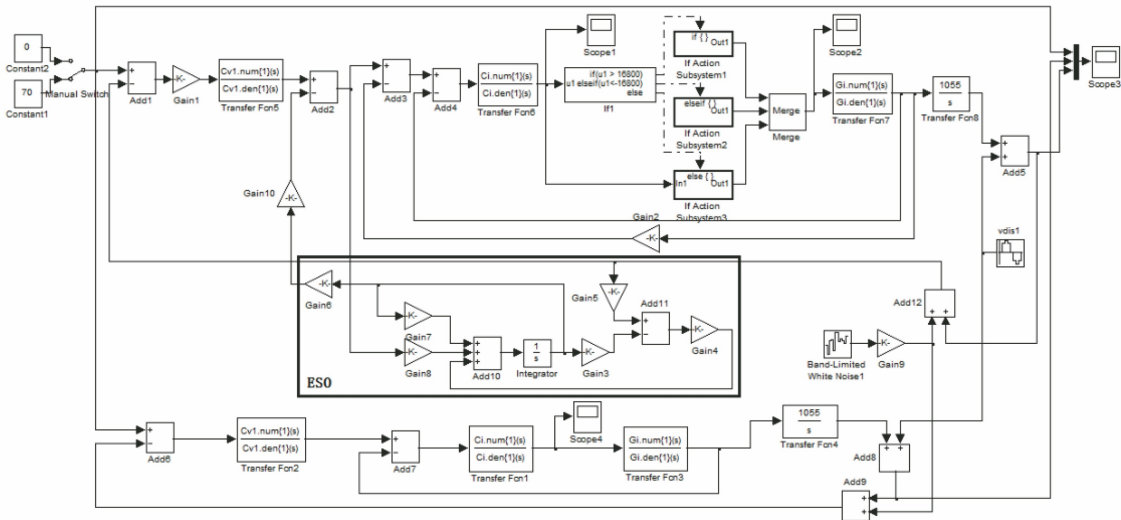


图 5 对比仿真流程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of comparison simulation process

图 5 中,电流环开环传递函数由实验所用平台的实际正弦标定环节得出,有 $G_i(s) = \frac{0.3257}{s+1160}$;设计一阶 PI 控制器,将控制器零点位置为 50,调整增益参数使电流闭环在满足较高相位裕度的同时有理想的带宽表现,取控制器增益系数为 6.1×10^6 ,此时有电流环 PI 校正函数 $C_i(s) = 1.22 \times 10^5 + \frac{6.1 \times 10^6}{s}$,得到带宽为 500 Hz、相位裕度为 180° 的电流闭环;平台等效加速度到平台速度的积分系数 $\frac{K_T}{J} = 1055$;在速度环 PI 控制器设计过程中,考虑陀螺固有的带宽约束 (~100 Hz),为保证速度 PID 控制环路的稳定工作,取控制器零点位置为 18.5,增

益系数为 1.4,此时速度环校正函数 $C_{v1}(s) = 0.1122 + \frac{3.3}{s}$,环路带宽为 30 Hz,相位裕度为 140°。在常规 PID 控制环路中,此时可近似将电流闭环等效为一阶比例环节,满足 LAF 的设计条件。为了尽量缩短环路内环输出饱和时间,且实现对平台扰动响应的有效优化,设计 LAF 控制环路中的加速度反馈系数 $K_f = 16$;电流环输出限值由实际得出,有 $L_m = 16800$ 。在 ESO 的设计过程中,同样地考虑平台控制系统的频率约束,为了在保证环路稳定的前提下实现对三角波阶跃扰动的有效补偿,利用极点配置法设计 $l_1 = 628, l_2 = 98596$,得到带宽为 50 Hz 的 ESO 环路估计补偿。进行如下两例仿真分析。

1) 阶跃对比仿真,在速度环输入端设定给定输

入为 70, 运行仿真进程, 分别得到如图 6 所示的 PWM 阶跃输出对比曲线和图 7 所示的速度阶跃响应对比曲线。

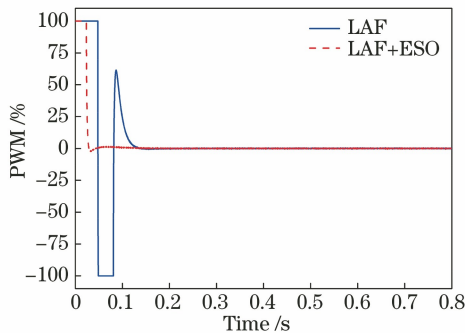


图 6 PWM 阶跃输出仿真对比

Fig. 6 Simulated comparison of PWM step output

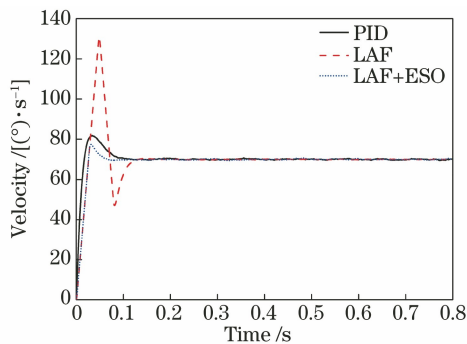


图 7 速度阶跃响应仿真对比

Fig. 7 Simulated comparison of speed step response

从图 6 可以看出: 在限幅作用下, LAF 控制环路在响应阶跃输入信号的上升过程中产生较强烈的相位激荡, 但在限幅区间内仍能实现对预期输出信号收敛的过程; LAF+ESO 在输出饱和情况下仍可以较好地抑制输出曲线的相位翻转, 从而可以快速、稳定地将驱动信号收敛至预期输出幅值。从图 7 可以看出: PID 控制环路的响应曲线在控制器的调控作用下呈标准的 PID 超调阶跃曲线; 对于单一 LAF 控制环路的上升过程, 由于受到 PWM 输出信号相位激荡的影响, 速度阶跃呈现幅值较大的多次三角波超调, 随即收敛于参考速度量值; 在 LAF+ESO 控制环路中, 得益于 ESO 对三角波超调扰动的估计和补偿, 该环路最终呈现幅值较低、参考速度收敛较快的阶跃, 且此时超调量仅为 PID 控制环路超调量的 53%。

2) 扰动隔离对比仿真, 在速度环输入端设定给定输入为 0、引入幅值为 5°、频率为 1 Hz 的外界正弦扰动, 运行仿真进程, 得到如图 8 所示的外界扰动隔离能力对比曲线。

图 8 中, 实线和虚线分别表示 PID 控制环路和

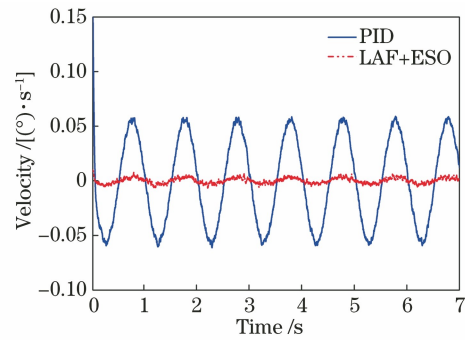


图 8 扰动隔离仿真对比

Fig. 8 Simulated comparison of disturbance isolation

LAF+ESO 控制环路隔离 5 (°)/Hz 正弦扰动的扰动残差曲线。可以看出 LAF+ESO 控制算法的引入使环路的峰值扰动残差从 0.053°降低至 0.0029°, 扰动抑制能力提升约 18.28 倍, 优于 LAF 理论优化的 17 倍。结果表明, ESO 的引入使环路扰动抑制能力在 LAF 控制算法的优化基础上得到少量提升。

4.2 实验验证

参考仿真对比的控制环路结构, 以基于陀螺稳定的两自由度激光通信平台为实验对象, 将平台挂载在摇摆台上进行环路对比实验验证。实验系统由装载光电探测器的运动平台、摇摆台、激光信标光源、平行光管以及图像处理系统组成, 实验装置及结构如图 9 所示。保证平台的轴向各环路理论运动模型、PI 校正参数、LAF 和 ESO 的各项调节参数与仿真参数一致, 进行以下两组对比实验。

4.2.1 阶跃响应对比实验

分别在 PID 控制环路和 LAF+ESO 控制环路中对平台输入 70 (°)/s 的速度阶跃信号, 分别在两个算法实现程序的 debug 进程中对阶跃速度反馈信号进行采样, 采样周期为 0.0001 s。观察两个环路的阶跃上升响应时间和稳定时间, 阶跃对比曲线如图 10 所示。

从图 10 可以看出, PID 控制环路的超调量为 20.03%, 稳定时间约为 0.1 s; LAF+ESO 控制环路的超调量为 10.09%, 稳定时间略小于 0.1 s。从数据对比可以看出, 引入 LAF+ESO 算法的控制环路的超调量约为 PID 控制环路的 50%, 同时具有略优的稳定时间调节表现。

4.2.2 扰动隔离对比实验

分别在 PID 控制环路和 LAF+ESO 控制环路中对平台施加 0 (°)/s 的速度信号, 令平台处于“自稳”状态; 令信标光在探测器成像视场内可见, 并记录光斑初始位置作为基准位置; 利用摇摆台对平台

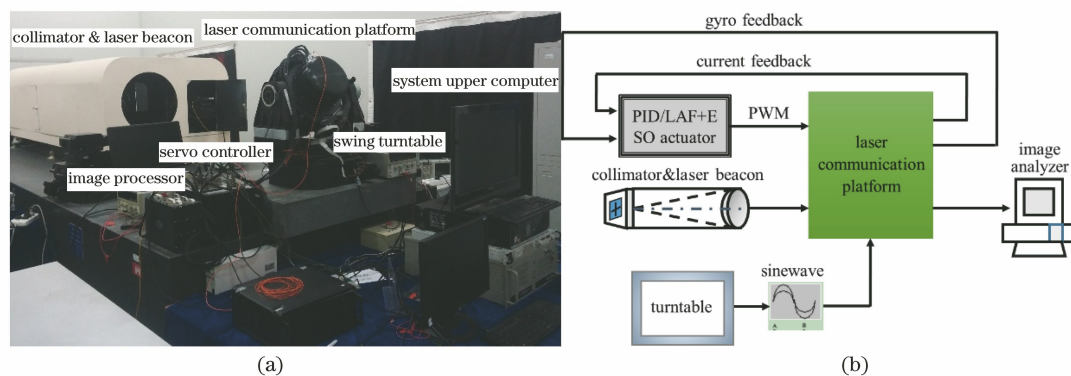


图 9 控制环路对比实验结构示意图。(a)实验现场装置;(b)实验结构示意图
Fig. 9 Schematic of control loop comparison experiment. (a) Diagram of field device;
(b) schematic of experimental structure

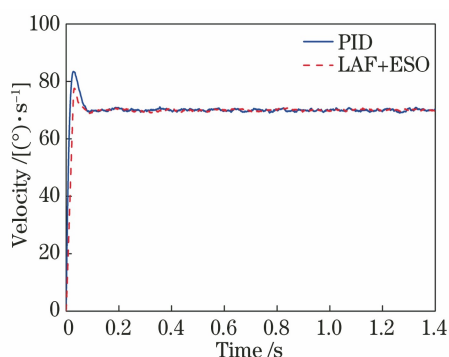


图 10 平台速度阶跃响应实验结果对比
Fig. 10 Comparison of experimental results of platform speed step response

有效运动轴向上引入幅值为 1° 、频率为 5 Hz 的正弦波扰动;用于标定脱靶量偏差值的 CCD 探测器分辨率为 400×400 ,探测器单个像素分辨率为 $25 \mu\text{rad}$,此时探测器视场角为 10 mrad ;打开图像处理系统,在平台对扰动进行隔离的过程中,以 0.04 s 的采样周期对光斑的质心相对偏移量进行解算和统计,得到载体

运动过程中平台的扰动隔离残差表现。两控制环路的扰动隔离残差分别如图 11(a)、(b)所示。

从图 11 可以看出:在平台对 $5^\circ/\text{Hz}$ 空间扰动进行抑制的过程中,通过对 PID 控制环路扰动抑制残差的统计和折算,可得此时控制环路的稳定精度为 $198 \mu\text{rad}$ [均方根(RMS)统计方式];对 LAF+ESO 控制环路进行扰动抑制残差统计,可得该环路的稳定精度为 $14.28 \mu\text{rad}$ (RMS),表明在 LAF 算法和 ESO 算法的共同作用下,平台实际的扰动隔离度相对传统 PID 控制提升了 11.42 dB ,基本符合 LAF+ESO 的理论优化结果。由于所设计的 ESO 同样可以实现对力矩环相关扰动的估计和补偿,LAF+ESO 控制环路的扰动残差曲线整体幅值远低于 PID 控制环路的同时,曲线中电机换向导致的峰值跳变也得到一定的修正,进而得到更为平滑的稳态表现。综上表明,基于 LAF+ESO 算法的控制环路具有更优的扰动隔离能力和动态性能。

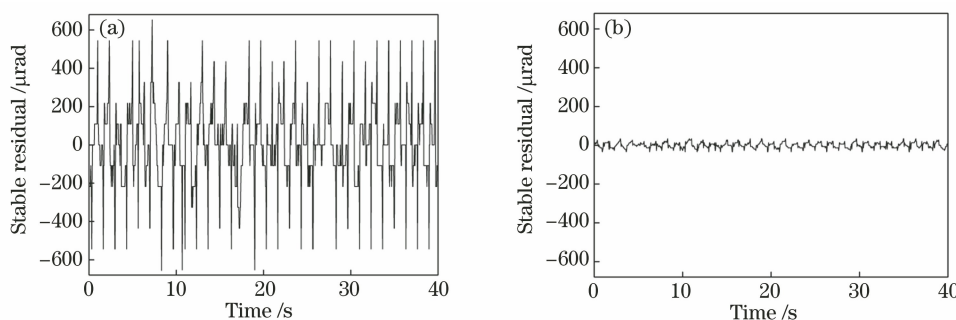


图 11 平台稳定精度测试结果对比。(a) PID 控制环路的扰动隔离残差;(b) LAF+ESO 控制环路的扰动隔离残差
Fig. 11 Comparison of platform stability accuracy test results. (a) Disturbance isolation residual of PID control loop;
(b) disturbance isolation residual of LAF+ESO control loop

5 结 论

针对某型两自由度机载激光通信平台的动态扰动隔离问题,提出一种基于限幅型加速度反馈与扩张状态观测器复合(LAF+ESO)的优化办法,并将其引入到平台闭环控制环路中,得到更优的空间扰动抑制结果,同时保证了平台在响应大速度阶跃信号过程的稳定性。利用仿真结果和实验结果验证了所提方法的有效性,其中平台阶跃实验和扰动隔离实验结果表明:基于 LAF+ESO 的控制环路对速度阶跃响应的稳定时间略优于 PID 控制环路的 0.1 s 阶跃稳定时间,超调量幅值约为 PID 控制环路超调量的 50%;在 5 (°)/Hz 的载体扰动作用下,基于 PID 的控制环路的稳定精度为 198 μrad (RMS),而基于 LAF+ESO 的控制环路的稳定精度为 14.28 μrad (RMS),为 PID 控制环路稳定精度的 7.21%。结果表明,利用 LAF+ESO 对控制环路进行优化后,平台的扰动隔离度有 11.42 dB 的提升表现,为后续对空间合作信标复合跟踪和通信的顺利开展提供参考。

参 考 文 献

- [1] Jiang H L, An Y, Zhang Y L, et al. Analysis of the status quo, development trend and key technologies of space laser communication [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2015, 34(3): 207-217.
姜会林, 安岩, 张雅琳, 等. 空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(3): 207-217.
- [2] Ji S P, Lu X R. Unmanned combat aircraft development and electro optic task payload key technologies[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2012(10): 3-10.
吉书鹏, 路学荣. 无人战斗机发展及光电任务载荷关键技术[J]. 飞航导弹, 2012(10): 3-10.
- [3] Zeng F, Gao S J, San X G, et al. Development status and trend of airborne laser communication terminals [J]. Chinese Optics, 2016, 9(1): 65-73.
曾飞, 高世杰, 伞晓刚, 等. 机载激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 65-73.
- [4] Ji S P. Equipment development of airborne electro-optic payload and its key technologies [J]. Aero Weaponry, 2017(6): 3-12.
吉书鹏. 机载光电载荷装备发展与关键技术[J]. 航空兵器, 2017(6): 3-12.
- [5] 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.
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.
- [6] Liu X, Wang G H, Mao D P, et al. Developing trend and technological analysis of warplane optoelectronic platforms[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(4): 269-288.
刘洵, 王国华, 毛大鹏, 等. 军用飞机光电平台的研发趋势与技术剖析[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(4): 269-288.
- [7] Qi C, Fan S X, Xie X, et al. Research on control method for improving low speed performance and stable precision of electro-optic servo system [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(10): 1873-1882.
祁超, 范世珣, 谢馨, 等. 光电稳定平台伺服机构低速及稳定性能控制方法研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(10): 1873-1882.
- [8] Sun H, Lang X L, Li Z Q, et al. Measurement for LOS stabilization accuracy of electro-optical imaging system on moving carrier [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(9): 2131-2137.
孙辉, 郎小龙, 李志强, 等. 动载体光电平台视轴稳定精度的检测[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2131-2137.
- [9] Bai Y Y, Cen Y Y, Meng L X, et al. Control technology of slave optical transceiver in space laser communication network [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1406001.
白杨杨, 岑远遥, 孟立新, 等. 空间激光通信组网从光端机控制技术研究[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1406001.
- [10] Wang Y Y. Research on high precision LOS stabilization technology based on fast steering mirror [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
汪永阳. 基于快速反射镜的高精度视轴稳定技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [11] Song Y S, Chang S, Tong S F, et al. Feature analysis of aeronautical laser communication system and airborne laser communication experiment [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1206004.
宋延嵩, 常帅, 佟首峰, 等. 航空激光通信系统的特性分析及机载激光通信实验[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1206004.
- [12] Wang C Y, Zhao S Q, Shi H W, et al. Linear active disturbance rejection control of airborne photoelectric stabilized platform [J]. Infrared and Laser

- Engineering, 2019, 48(12): 1213002.
王春阳, 赵尚起, 史红伟, 等. 机载光电稳瞄平台的线性自抗扰控制[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(12): 1213002.
- [13] Wang Y T. Research on high performance robust control for airborne optoelectronic platform [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
王昱棠. 面向机载光电平台的高性能鲁棒控制研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [14] Liu J H, Zhu Z Q, Shen H H, et al. Application of control system based on acceleration to disturbance compensation[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(9): 2191-2198.
刘晶红, 朱志强, 沈宏海, 等. 加速度在控制系统扰动补偿中的应用[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(9): 2191-2198.
- [15] Younkin G W. Compensating structural dynamics for servo driven industrial machines with acceleration feedback[C]//Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting, October 3-7, 2004, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2004: 1881-1890.
- [16] Kong D J, Dai M, Cheng Z F, et al. Realization of acceleration feedback for servo system of moving base optoelectronic platform [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(8): 1782-1788.
孔德杰, 戴明, 程志峰, 等. 动基座光电稳定平台伺服系统中加速度反馈的实现[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(8): 1782-1788.
- [17] Han J Q. From PID to active disturbance rejection control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [18] Wang H Q, Huang H. Property and applications of extended state observer [J]. Control and Decision, 2013, 28(7): 1078-1082.
王海强, 黄海. 扩张状态观测器的性能与应用[J]. 控制与决策, 2013, 28(7): 1078-1082.
- [19] Guo B Z, Zhao Z L. On the convergence of an extended state observer for nonlinear systems with uncertainty[J]. Systems & Control Letters, 2011, 60(6): 420-430.
- [20] Li S H, Xia C J, Zhou X. Disturbance rejection control method for permanent magnet synchronous motor speed-regulation system [J]. Mechatronics, 2012, 22(6): 706-714.
- [21] Komada S, Machii N, Hori T. Control of redundant manipulators considering order of disturbance observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(2): 413-420.
- [22] Yoo D, Yau S S T, Gao Z. Optimal fast tracking observer bandwidth of the linear extended state observer[J]. International Journal of Control, 2007, 80(1): 102-111.
- [23] Chen Z Q, Sun M W, Yang R G. On the stability of linear active disturbance rejection control [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(5): 574-580.
陈增强, 孙明玮, 杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究[J]. 自动化学报, 2013, 39(5): 574-580.