

采用自调整模糊变结构控制的机载激光通信视轴稳定研究

曹 阳^{1,2}

(1. 重庆理工大学 电子信息与自动化学院, 重庆 400054;

2. 电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘 要: 机载激光通信的动态视轴稳定是建立激光通信链路的首要前提, 传统的粗跟踪控制方法不能克服载体扰动及参数变化对系统的不利影响, 影响了视轴稳定精度。根据控制系统的任务, 将论域自调整模糊控制与滑模变结构控制的思想相融合, 在稳定的误差相平面内构造稳定的滑模面。理论分析和模拟实验结果表明, 该方法消除了系统的抖振现象, 改善了系统的瞬态性能, 对机载通信平台受到的扰动及参数变化具有完全的自适应性。因此自调整模糊变结构控制具有一定鲁棒性, 且控制算法简单, 可望获得工程应用。

关键词: 机载激光通信; 视轴稳定; 变结构控制; 自调整模糊控制

中图分类号: TN929 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3373-05

Self-adjusting fuzzy variable structure control of optical axis stabilization for airborne laser communication

Cao Yang^{1,2}

(1. School of Electronic Information & Automation, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: For the airborne laser communication, optical axis stabilization is the key to keep laser communication link. Conventional coarse tracking controlling method can not effectively overcome the effect of system model parameter change and their influence of uncertainty. According to control requirement, the variable structure controller (VSC) and self-adjusting fuzzy control method was fused, which can force system state to reach sliding surface. Theoretical research and simulation results show it can fully adapt to the disturbance and parameter changes of airborne communication platform. So it has great robustness, and is expected to apply in engineering.

Key words: airborne laser communication; optical axis stabilization; VSC; self-adjusting fuzzy control

收稿日期: 2014-02-08; 修订日期: 2014-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(61205106); 重庆教委科学技术项目(KJ120827); 中国博士后科学基金(2014M552329)

作者简介: 曹阳(1977-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士后, 主要从事自由空间激光通信技术方面的研究。Email: caoyjz@sina.com

0 引言

空间激光通信具有通信容量大、抗电磁干扰能力强、保密性好等优点,以机载为节点的激光通信链路已成为研究热潮^[1-2],机载激光通信是实现天、空、地、水下通信立体组网的重要一环^[3]。由于激光光束窄、发散角小,需要精确保持激光通信终端之间的通信视轴稳定,机载激光通信视轴稳定一般采用二级稳定,即粗、精跟踪稳定方法,粗跟踪伺服系统是实现激光通信精密视轴稳定的第一步和重要环节,其中最为关键的是粗跟踪伺服系统视轴稳定控制方法。

机载激光通信系统在运行过程中受到各种扰动的影响,如载体的姿态变化和振动都会引起视轴稳定系统轴系间的摩擦力矩改变^[4],同时,还会受到空间环境(如温度、气压变化等)的影响,视轴稳定系统的某些结构参数可能会产生变化,这也会给视轴稳定带来影响^[5]。目前,视轴稳定大多基于 PID 校正环节、相位超前和滞后校正网络等,无法适应伺服控制

系统参数和变化^[6-7]。变结构控制算法具有鲁棒性好、结构简单、响应速度快等优点,但变结构控制不可避免地存在抖振现象^[8],文中研究将滑模变结构控制和变论域模糊控制相结合,达到提高减小抖振的目的^[9]。仿真结果表明:控制器很好地达到了削弱抖振的目的,克服上述外界扰动及参数变化对系统的不利影响,提高了系统的控制性能。

1 变结构控制数学模型

完整的机载激光通信粗视轴稳定控制系统主要由视轴稳定控制器、驱动电路、伺服电机、光电编码器、陀螺等构成。机载激光通信平台受到干扰力矩及载体运动的影响,机载激光通信视轴稳定系统结构如图 1 所示,视轴稳定系统工作过程如下:(1) 输入信号(视线偏差)和反馈信号在视轴稳定控制器进行运算,产生控制信号;(2) 控制信号经功率放大器后,使伺服机构输出轴输出力矩的大小和方向随输入控制信号的大小和极性而改变,从而实现光学天线的闭环视轴稳定。

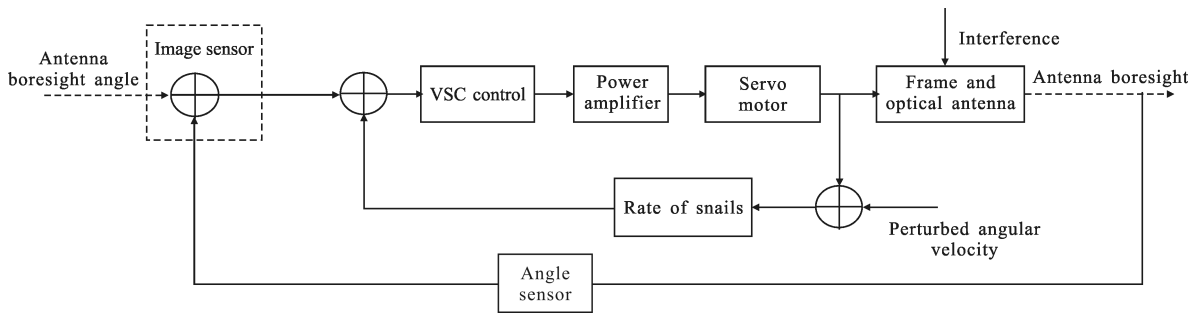


图 1 机载激光通信视轴稳定框图

Fig.1 Block diagram of optical axis stabilization

为了构造变结构的控制器,设 e 为跟踪误差; θ_i 为期望转角, θ 为实际转角,其中 $x_1=e=\theta_i-\theta, x_2=\Delta e$ 。在变结构控制器作用下,视轴稳定系统可以解决随机扰动和不确定参数项所造成的不利影响,使期望转角与实际转角的误差渐趋于零。下面以跟踪误差作为系统状态空间变量,变结构控制方程可以被描述如下:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= (A+\Delta A)x(k) + (B+\Delta B)U(k) + (d+\Delta d)f \\ y &= g(k) \\ x(k) &= [x_1(k), x_2(k)] \end{aligned} \quad (1)$$

在确定伺服电机后,那么 A 和 B 就可以确定;

ΔA 和 ΔB 为参数变化; d 为外加随机扰动。假设系统满足匹配条件:

$$\Delta A = B\tilde{A}, \Delta B = B\tilde{B}, d + \Delta d = B\tilde{d} \quad (2)$$

那么公式(1)可被简化为:

$$x(k+1) = Ax(k) + b[u(k) + T(k)] \quad (3)$$

其中, $E(k)$ 包括不确定项和外加干扰

$$T(k) = \tilde{A}x(k) + \tilde{B}U(k) + \tilde{d}f \quad (4)$$

切换函数可被定义为:

$$\begin{aligned} S &= C^T x = c_1 x_1 + x_2 \\ C &= [c_1, 1]^T \end{aligned} \quad (5)$$

取控制律为:

$$U(k)=U_{eq}(k)+\Delta U(k) \quad (6)$$

式中: U_{eq} 为等效控制量; ΔU 为校正控制量。在进行滑模状态后, $x(k)$ 等于 $x(k+1)$,那么可推导出:

$$U_{eq}(k)=(C^T B)^{-1} C^T (I-A)x(k)-T(k) \quad (7)$$

2 自调整模糊变结构控制器设计

在穿越滑模面时,系统会在滑模面附近产生不可避免的抖振,而变结构与模糊控制的相互结合,可使相点接近滑模面时减小其穿越速度,从而减少抖振。滑模存在的条件为 $S\dot{S}<0$, ΔU 为保证系统运动得以到达滑模面的校正增益,其值必须足以消除不确定项的影响,才能保证滑模存在的条件。模糊变结构控制器的结构如图 2 所示。

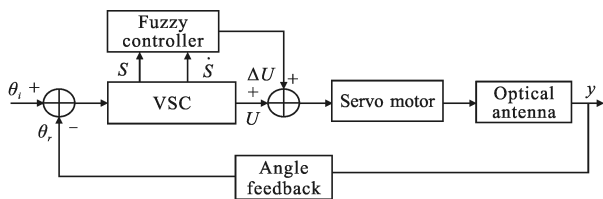


图 2 模糊变结构控制器结构

Fig.2 Structure of FVSM

模糊控制器系统输入输出模糊集分别定义如下:

$$S\dot{S}=\{NB \quad NM \quad ZE \quad PM \quad PM \quad PB\}$$

$$\Delta U=\{NB \quad NM \quad ZE \quad PM \quad PM \quad PB\}$$

式中: NB 为负大; NM 为负中; ZE 为零; PM 为负中; PB 为正大。

模糊器的设计是变结构控制的关键,传统的模糊控制器按照等间距的论域划分方法,特别是在偏差处于较小范围内时,就会存在所谓“控制盲区”问题,传统方法无法较好解决变结构存在的抖振问题。文中提出一种变论域的模糊器设计方法,论域自调整的方法如图 3 所示,当偏差较大时,论域间距划分较大,可以使系统快速趋于稳定;当偏差仅在“ZE”附近变化时,此时可使论域收缩,此时模糊器可对该微偏差也能充分辨析。变论域方法的设计步骤如下:(1) 确定模糊器微偏差区域所代表的论域的大小及形状;(2) 当输入量在“ZE”时,此时,模糊器可改变论域所对应的量化因子和比例因子;(3) 遵循上述步骤,持续调整量化因子和比例因子,直到控制残差达到规定的要求为止。

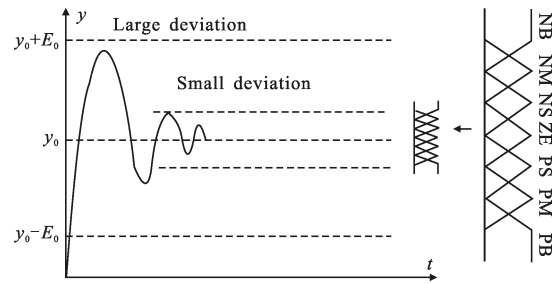


图 3 论域自调整

Fig.3 Domain of self-adjusting

模糊规则设计如表 1 所示^[10]。

表 1 模糊规则设计

Tab.1 Design of fuzzy rules

	$S\dot{S}$	ΔU
Rule 1	PB	PB
Rule 2	PM	PM
Rule 3	ZO	ZO
Rule 4	NM	NM
Rule 5	NB	NB

采用加权平均法将模糊输出精确化,可以利用加权平均法求得:

$$\Delta U(k)=\frac{\sum_{i=1}^n x_i u_i}{\sum_{i=1}^n u_i} \quad (8)$$

式中: x_i 和 u_i 分别为各对称隶属度函数的质心和隶属度值。

3 仿真分析

为了检验文中设计的控制器的鲁棒性及跟踪效果,利用 Matlab 软件进行了仿真研究。取扰动项为 $d(t)=\lambda x(k)$,其中 λ 为均方差 0.3 的随机数,取不确定项 f 服从正态分析,均值为 1,均方差为 0.1。在相同的仿真环境下建立基于 PID 和模糊变结构控制器模型,通过两种控制方法的性能比较,验证模糊变结构控制的鲁棒性和对系统参数变化的适应性。

图 4(a)和 4(b)分别为两种控制模型的单位阶跃响应,可以看出:变论域模糊变结构控制(AFVSC)的输出响应具有很好的快速性,且没有超调,系统进入

稳态后并没有产生明显的抖动，克服控制器本身的影响，系统对于干扰力矩和机体扰动具有很强的鲁棒性；而基于 PID 控制器的系统模型输出有一定超调，且系统进入稳态后明显受到了载体扰动和干扰力矩的影响。

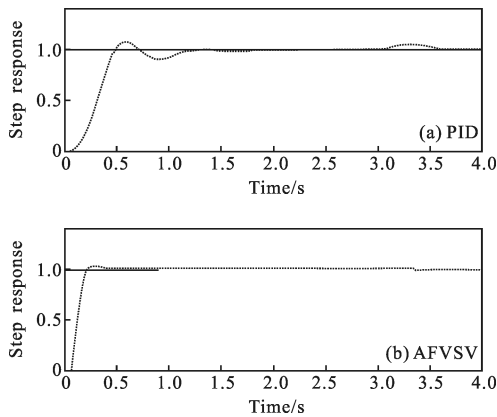


图 4 单位阶跃响应
Fig.4 Step response

在单位阶跃响应下，图 5(a)为模糊变结构(FVSC)系统的相轨迹图，图 5(b)为 AFVSC 系统的相轨迹图。从图 5 可知，因为 FVSC 采用等间距的论域划分方法，使系统的相轨迹在滑模面附近存在一定的抖动，而 AFVSC 可以消除模糊控制器余差，即消除“控制死区”，它的相轨迹在滑模面附近无明显抖动，表明该 AFVSC 能有效解决传统变结构控制中存在的品质控制和抖动之间的矛盾。

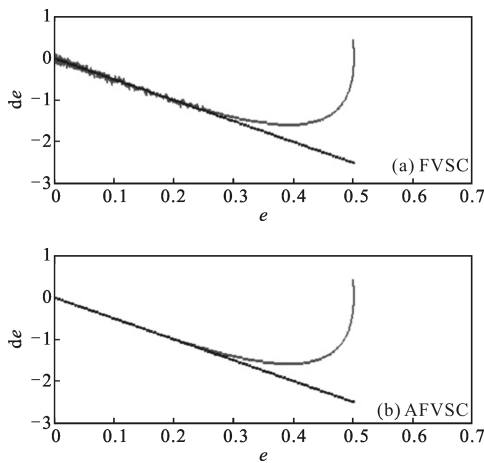


图 5 模糊变结构控制的相轨迹
Fig.5 Phase locus of FVSC

假机体运动为幅值 5° 、频率 4 Hz 的正弦运动，扰动项 $d(t)$ 不变，以上为条件 1，视轴稳定曲线如图 6

所示。机体运动幅度加 1 倍，将平台扰动项 $d(t)$ 变为原来的 2 倍， f 的方差变为 0.2，参数不变，此为条件 2，该系统的视轴稳定如图 7 所示。

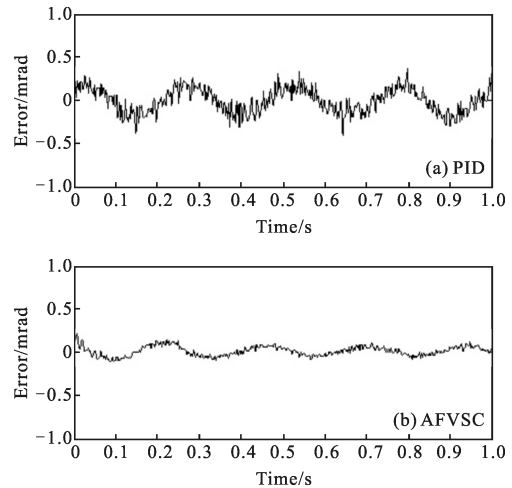


图 6 条件 1 下的视轴稳定精度

Fig.6 Optical axis stabilization precision in condition 1

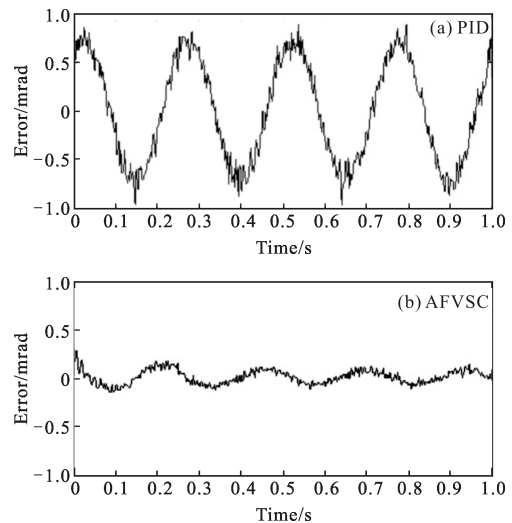


图 7 条件 2 下的视轴稳定精度

Fig.7 Optical axis stabilization precision in condition 2

在不同扰动和结构参数变化条件下，分别采用 PID 和模糊变结构算法进行比较评估，文中将视轴稳定的精度作为其衡量性能指标。两种场景仿真结果如下。

(1) 场景 1: 无扰动和结构参数变化，跟踪稳定误差曲线如图 6 所示，其角位置跟踪稳定精度分别为 0.45 mrad 和 0.15 mrad ，显然，模糊变结构跟踪稳定性更优。

(2) 场景 2: 系统参数变化后，跟踪稳定误差曲

线如图 7 所示,其角位置跟踪稳定精度分别变化为 0.77 mrad 和 0.19 mrad,相比于 PID 算法,模糊变结构跟踪稳定精度变化不大。

仿真结果表明:模糊变结构算法具有更好的鲁棒性和环境适应性。

4 结 论

将传统的变结构控制与其他智能控制算法相结合是目前的一个研究热点,文中针对机载激光通信的视轴稳定问题,结合变论域模糊控制的基本原理,设计了模糊切换函数以取代传统的滑模符号切换函数,对系统的外来随机扰动及不确定项进行补偿,从而有效地削弱了抖振。理论分析与仿真结果表明:此方法具有非常良好的视轴稳定效果,克服了载体的扰动,在削弱抖振的同时也提高了控制精度。

参 考 文 献:

- [1] Louthain James A, Schmidt Jason D. Anisoplanatism in airborne laser communication [J]. *Optics Express*, 2008, 16(14): 10769–10785.
- [2] Cao Yang, Zhao Mingfu, Luo Binbin, et al. Airborne platform's tracking algorithm for free space optical communication based on IMMPPF methods [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 3065–3068. (in Chinese)
曹阳, 赵明富, 罗彬彬, 等. 机载空间光通信平台的交互多模型粒子滤波跟踪算法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 3065–3068.
- [3] Song Yansong, Tong Shoufeng, Jiang Huilin, et al. Variable structure control technology of the fine tracking assembly in airborne laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 934–938. (in Chinese)
宋延嵩, 佟首峰, 姜会林, 等. 机载激光通信系统精跟踪单元变结构控制技术 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 934–938.
- [4] Xiong Zhun, Ai Yong, Shan Xin, et al. Fiber coupling efficiency and compensation analysis for free space optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2510–2514. (in Chinese)
熊准, 艾勇, 单欣, 等. 空间光通信光纤耦合效率及补偿分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2510–2514.
- [5] Lee Sangwoo, Kavehrad Mohsen. Airborne laser communications using wavelet packet modulation and its performance enhancement by equalization [C]//SPIE, 2006, 6201: 37–42.
- [6] Locke Michael, Czarnomski Mariusz, Qadir Ashra, et al. High-performance two-axis gimbal system for free space laser communications onboard unmanned aircraft systems[C]//SPIE, 2011, 7923: 12–15.
- [7] Vilcheck M J, Burriss H R, Moore C I, et al. Miniature lasercomm module for integration into a small unmanned aerial platform[C]//SPIE, 2012, 8380: 56–60.
- [8] Huang Haibo, Zuo Tao, Chen Jing, et al. Optimum design of servo bandwidth for fine tracking subsystem in compound-axis system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1561–1565. (in Chinese)
黄海波, 左韬, 陈晶, 等. 复合轴精跟踪系统伺服带宽的优化设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1561–1565.
- [9] Niu Hong, Zhang Qingling, Yang Chunyu, et al. Variable structure control for three-variable autocatalytic reaction [J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2012, 11(3): 393–400.
- [10] Choi Han Ho. Adaptive controller design for uncertain fuzzy systems using variable structure control approach [J]. *Automatica*, 2009, 45(11): 2646–2650.