

基于 TD 的机载激光通信跟踪控制系统设计

陈 怡¹, 俞建杰^{2,3,4}, 于丙文², 王 磊¹, 邬佳杰²

(1. 湖州师范学院 工学院, 浙江 湖州 313000;

2. 浙江大学湖州研究院, 浙江 湖州 313000;

3. 浙江大学 生物医学工程与仪器科学学院, 杭州 310027;

4. 比羿激光科技(湖州)有限公司, 浙江 湖州 313099)

摘要: 机载激光通信系统限于机载平台的高机动性和运动的随机性, 同时受到探测器检测误差、平台振动抑制残差和系统安装误差等影响, 如何在大气环境中提高跟踪精度来提高通信质量是需要重点解决的问题之一; 为了提高机载平台对发射端信号光的跟踪精度, 设计一种基于 TD 的机载激光通信跟踪控制系统; 由主控模块、伺服系统、光学系统和图像处理单元组成跟踪控制系统; 利用跟踪微分器加上传统 PID 控制器, 将系统中的低频大幅扰动和大动态范围的跟踪补偿量进行过渡, 经过 PID 控制器补偿控制时, 在保证快速响应的前提下同时减小了超调, 从而提高控制系统的跟踪精度; 通过实验分析表明, 设计的系统无干扰时拥有较好的鲁棒性, 在有扰动的环境中能够将跟踪精度保持在 5 mrad 以内, 可以保证机载激光通信系统进行稳定通信。

关键词: 机载激光通信; 跟踪微分器; PID 控制; 跟踪控制; 稳定通信

Design of Airborne Laser Communication Tracking Control Systems Based on TD

CHEN Yi¹, YU Jianjie^{2,3,4}, YU Bingwen², WANG Lei¹, WU Jiajie²

(1. College of Engineering, Huzhou University, Huzhou 313000, China;

2. Huzhou Institute of Zhejiang University, Huzhou 313000, China;

3. College of Biomedical Engineering and Instrument Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

4. Beacomm Laser Technology (Huzhou) Co., Ltd., Huzhou 313099, China)

Abstract: Airborne laser communication systems are limited by the high mobility and random motion of airborne platforms, which are affected by factors such as detector measurement errors, platform vibration suppression residuals, and system installation errors. One of key challenges is how to improve tracking accuracy in atmospheric environments to enhance communication quality. To improve the tracking accuracy of the airborne platform for signal lights in the transmitting end, an airborne laser communication tracking control system based on tracking differentiator (TD) is designed, which consists of a main control module, a servo system, an optical system, and an image processing unit. The TD and traditional PID controller is used to reduce transition process between the large disturbances with low-frequency and the tracking compensation with a large dynamic range. After compensation by the PID controller, the system achieves a rapid response while reducing overshoot, thereby improving the tracking accuracy of the control system. Experimental analysis shows that the designed system has a good robustness without interference and can maintain the tracking accuracy within 5 mrad with interference, ensuring stable communication for the airborne laser communication system.

Keywords: airborne laser communication; TD; PID control; tracking control; stable communication

0 引言

自由空间激光通信^[1-2]在近年来受到国内外的广泛关注, 激光通信具有高带宽、高保密性、抗电磁干扰等

特点, 相比传统的无线电通信, 激光通信具有更高的传输带宽和更低的信号延迟, 而且空间激光通信工作的光谱频带不受管制, 不占用拥挤的无线电频谱资源, 也不会与其他传输系统发生信号干扰, 不会产生频谱许可问

收稿日期:2024-12-13; 修回日期:2025-02-07。

作者简介:陈 怡(1999-), 男, 硕士研究生。

通讯作者:俞建杰(1980-), 男, 博士, 副研究员。

引用格式:陈 怡, 俞建杰, 于丙文, 等. 基于 TD 的机载激光通信跟踪控制系统设计, 2026, 34(1): 86-93.

题, 即不需要申请频谱许可证。机载激光通信作为自由空间激光通信发展的一个重要方向, 近年来也得到了充分重视^[3]。激光通信高保密性的优势非常符合国防军事领域对通信性能的需求, 灵活的机载平台也可大大提高侦查范围^[4-6]; 且它的数据传输速率高、信息容量大的优点使得它在民用上也具有巨大的应用潜力。因此近几年, 机载光电平台被广泛地应用于军事领域和公安、消防、灾情救助^[7-8]、地貌测绘^[9]以及环境监控等民用领域。

受限于机载平台的快速移动, 强振动和受风力影响大等特性, 载机的姿态变化、振动和飞行中的风阻力矩都会降低视轴指向稳定精度, 且机载平台振动的显著特点在于振动幅度都随着频率的增加而快速减小, 在低频振动时的振动幅度更为剧烈, 此阶段对光电平台中激光通信终端的通信效果产生的影响最为显著。为了克服这些影响, 必须建立一个稳定的控制系统, 减小载机的运动和振动对系统中光机部分视轴的影响, 从而与对向的另一激光通信终端达成稳定的跟踪链路。

文献 [10] 中提出了一种机载激光通信系统, 该系统的跟踪模式采用了粗、精跟踪结合的方法, 通过速度闭环和位置闭环进行控制, 经过多次测试验证实现了通信距离为 6.7 km, 通信速率为 1.25 GB/s 的机载激光通信实验^[10]。文献 [11] 中提出引入线性自抗扰控制器, 设计了船机粗跟踪控制结构, 实现跟踪的高控制精度与稳定性^[11]。文献 [12] 提出了一种基于全光捕获法的跟踪控制系统, 并在此基础上完成了基于飞机平台的机载激光通信实验^[12], 实现了电磁拒止环境下的捕获建链。文献 [13] 提出一种基于观测器的二自由度内模控制方法, 以经过电流环化简后的速度环为被控对象, 采用二自由度内模控制对系统进行校正, 实现了较好的跟踪性能^[13]。文献 [14] 提出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^[14]。以上文献中均针对不同的使用环境和光机系统设计了相适应的算法, 但使用的算法中有时需要对控制对象进行建模, 考虑到工程中建模难度大, 针对于本次的光机系统设计, 对粗瞄吊舱提出了基于 TD 的机载激光通信跟踪控制系统, 无需建立系统的具体模型, 仅增加一个跟踪微分器 (TD, Tracking-Differentiator), 利用跟踪微分器能够平滑信号的特性对 PID 控制系统进行改进, 减少 PID 控制的超调量, 提高跟踪精度。

跟踪微分器^[15-16]包含了跟踪和微分两个部分, 跟踪就是一个对输入信号以某种手段延迟输出的环节, 在做一些控制时, 通常不希望输入信号出现阶跃的情况, 这会在系统中产生一定扰动, 因此通常会设计控制算法使

输入信号变得更平缓, 在变化的输入信号中体现出平滑滞后的效果, 输出信号即为输入信号的跟踪; 微分是指跟踪信号微分后的信号, 代表着跟踪信号的变化率, 即变化速度, 当要求快速且精准地到达目标信号时, 既要保证快速, 也要保证精准。而这两者通常是相悖的, 快速往往伴随着超调。因此如果能把握好速度的快慢, 在离得远时增加控制量, 在快要到达时减少控制量, 就可以避免超调的情况。因此, 为了提高机载激光通信跟踪控制系统的视轴对准跟踪精度, 在跟踪控制系统中结合使用了跟踪微分器和 PID 控制器, 实现在不超调的情况下提高跟踪控制系统的响应速度和稳定精度。通过实验表明, 所提的系统具有良好的跟踪控制性能, 能够在动态环境中建立稳定的机载激光通信链路。

1 系统设计

机载激光通信跟踪控制系统主要由主控模块、伺服系统、光学系统图像处理单元组成, 吊舱内部构造示意图如图 1 所示。

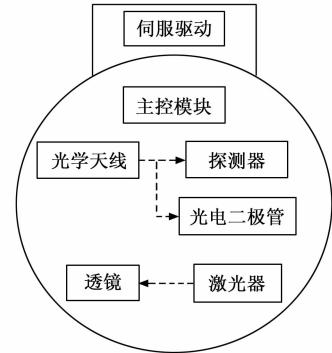


图 1 吊舱内部构造示意图

1.1 机载激光通信跟踪控制系统框架

常见的激光通信设备是点对点进行数据交换的, 正如此机载激光通信系统, 其是与地面端激光通信设备进行对接通信。机载载荷采用的是光电吊舱形式, 整个机载激光通信系统的基本模块均置于吊舱内, 本控制系统只是其中的一部分, 其中主控模块、探测器模块和执行机构之间通过各个接口实现数据互通互联, 配合完成对激光光束的跟踪, 控制框图如图 2 所示。

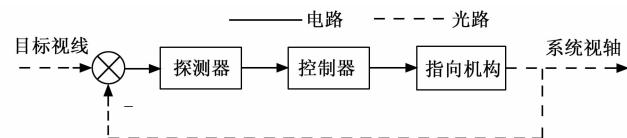


图 2 跟踪控制系统框图

其中探测器模块在接收到地面端发过来的光束后, 鞍面上会呈现出一块经过二值化处理后的光斑, 同时相机计算出质心位置, 并将质心位置数据上传至主控模块, 主控模块计算出当前位置与期望位置的脱靶量 (误

差值), 将脱靶量作为控制器的误差输入, 控制器模块计算出所需的控制量, 并输出至指向机构 (吊舱的方位与俯仰电机) 做最终执行。由于此流程是一个动态的跟踪过程, 因此光斑在探测器模块上的位置会实时更新, 接着继续通过探测器模块的图像数据处理查看当前脱靶量, 依此类推重复进行上述反馈控制流程, 当脱靶量数据存在且有效时, 则跟踪过程就一直持续。完整的机载激光通信跟踪控制系统模型如图 3 所示。

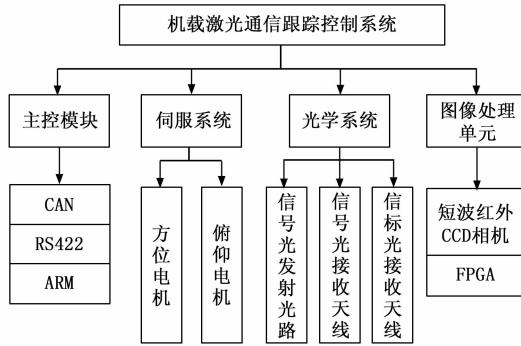


图 3 跟踪控制系统模型

上述系统中主控模块的 CAN 口与短波红外 CCD 相机相连, 作为相机的控制接口; RS422 与吊舱的伺服驱动相连, 作为吊舱的控制接口; 光学天线与相机以空间光的形式互相联系, 相机将成像光斑信息通过 FPGA 芯片解算后反馈至主控 ARM 芯片进行后续处理。

1.2 主控模块

主控模块是整个机载激光通信跟踪控制系统的大脑, 由一块 ARM 芯片与一块 FPGA 芯片组成, 主控在启动完成自检以后, 即可进入待机状态, 当接收到开启跟踪的指令时, 主控利用外部控制器模式实时获取 FPGA 端解算的质心数据, 跟踪子系统通过设备驱动子系统调动外围资源精确控制吊舱等部件, 进入捕获状态。一旦锁定地面目标发射过来的光斑后, 主控将进入跟踪阶段, 同时数据通信阶段也将同步开启。

接口中的 CAN 与图像处理单元的短波红外相机相连, 负责传输主控的对相机的控制需求, 如帧频、曝光时间和开窗大小的调节等功能, 改善光斑检测精度和频率, 以便于提高跟踪系统的精度; RS422 接口与吊舱的控制接口连接, 负责发送对吊舱方位轴与俯仰轴电机的角度控制指令, 同时接收电机码盘的角度反馈, 与探测器一并形成完整的控制环路。

1.3 伺服系统

机载激光通信跟踪控制系统的伺服系统主要由无刷直流电机和伺服控制板组成, 无刷直流电机如图 4 所示。

其中霍尔 IC 安装在转子附近, 用于检测转子的位置和速度, 可作为无刷电机的控制反馈系统使用; 输出轴是电机的动力输出部分, 连接到外部负载, 将电机的

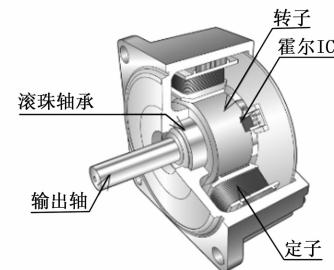


图 4 吊舱无刷直流电机

旋转力传递给其他机械结构, 以此完成测控任务。

伺服控制板由上下叠放的三块板组成, 分别为电源板、陀螺仪数据处理板和电机驱动板, 摆放如图 5 所示。

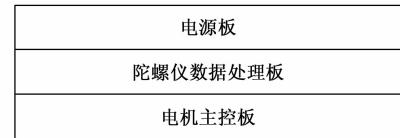


图 5 伺服控制板示意图

电源板对激光通信系统输入的电压进行适当的降压与滤波处理, 保证吊舱方位电机与俯仰电机的正常使用; 陀螺仪数据处理板对一个六轴陀螺仪进行非线性补偿、动态补偿、正交补偿、温度补偿和漂移补偿等算法设计, 保证测量精度; 电机主控板通过获取陀螺仪数据处理板的反馈数据进行吊舱的动态控制与稳像控制, 保证相应的控制精度, 减小跟踪误差。

电机主控板通过 RS422 接口与跟踪控制系统的主控模块相连, 接收跟踪控制系统主控使用算法控制器发送的位置控制指令, 驱动吊舱方位电机与俯仰电机做出响应动作, 并再次通过 RS422 接口向跟踪控制系统的主控反馈吊舱方位电机与俯仰电机当前所处的位置, 以便于跟踪控制系统的主控进行动态跟踪。

1.4 光学系统

光学系统是激光通信终端的重要组成部分, 也是跟踪控制系统环路中接收信号/信标光的通道, 光学系统会直接影响激光通信的信号传输质量和稳定性, 通过合理的设计能够减少信号在大气传输中的衰减和干扰, 提高信号的信噪比, 从而提升系统的通信质量和可靠性。

激光通信系统的光学设计通常是基于跟踪误差的统计模型完成的, 需要对系统性能参数进行深入分析后进行链路预算, 评估跟踪误差对系统性能的影响, 再从光学设计的角度留出足够的链路冗余。

本光学系统设计简单, 既保证了对准的成功概率, 也保证了足够的通信能量, 系统包括信号光接收、信标光接收和信号光发射共 3 个光路, 3 个光路的具体工作原理如下:

信号接收: 信号光束经过接收望远镜聚焦, 会聚于

信号接收探测器 PIN 管上;

信标接收: 信号光束经过接收望远镜聚焦, 并经过分光片透射, 会聚于信标接收探测器 CCD 上;

信号(信标)发射: 发射光纤输出的信号光(兼做信标光), 经准直后出射。

且本系统采用无信标光的设计, 光学系统示意图如图 6 所示。

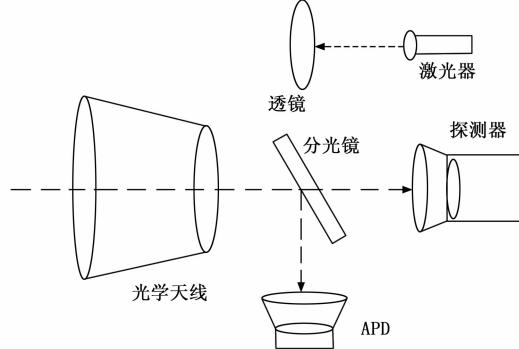


图 6 光学系统示意图

其中信号光兼做信标光, 信号光从光学天线进入后进行 9:1 分光, 九成信号光从信号接收光路进入雪崩光电二极管(APD, avalanche photodiode)作为通信信号光调制解调, 一成信号光从信标接收光路进入探测器作为跟踪信标光进行光斑检测。通过如此设计, 将大部分的光用来保证通信, 另一部分的光用于跟踪对准, 使信号光一直处于 APD 的接收视场中, 即时刻处于通信视场中。

为了实现激光的快速捕获和信息的稳定传输, 高精度的光学元件在系统中至关重要。光学系统必须具备优秀的准直和聚光能力, 以确保激光束在远距离传输过程中也能保持足够的能量密度, 从而提高通信的可靠性。同时, 跟踪系统需要具备快速响应能力, 以便在外界干扰下迅速调整接收角度进行实时跟踪, 从而重新对准光束, 最大限度降低信号丢失的风险。因此, 光学系统与控制系统的设计必须综合考虑, 以确保光信号的高效传输和稳定接收, 具体的控制系统设计将在后面详细介绍。

1.5 图像处理单元

在激光通信系统中, 跟踪探测器是图像处理单元的关键器件, 在设计时需要确保探测器的激光波长与其响应光谱段相匹配。作为跟踪系统的反馈单元, 探测器的光斑检测误差是跟踪系统的主要误差源之一。此外, 跟踪反馈探测器的光斑探测和图像信号处理之间的延迟也会降低控制系统的稳定相位裕量, 影响系统的带宽和稳定性^[17]。

此吊舱控制系统使用的激光波长为 1 550 nm 波段, 吊舱伺服带宽为 5 Hz, 因此本控制系统的图像探测器选用了如图 7 所示的短波红外 CCD 相机, 此类探测器

的突出特点是其具有高动态范围, 高分辨率, 高灵敏度和高可靠性等系列优点。而且短波红外 CCD 相机恰好在 1 550 nm 这一波段具有较高的灵敏度, 相机的光谱响应能够很好地匹配通信激光的波长, 可以提高光学检测效率和信号的接收质量。



图 7 短波红外机芯外形

短波红外相机即是光学系统中信标接收光路的接收部分, 相机进行光斑检测后将数据传至 FPGA 模块进行光斑质心计算, FPGA 在将质心数据传至 ARM 主控进行二次处理, 计算出脱靶量, 这就表示质心计算的准确度很大程度上会受探测器检测误差的影响。但在信标光的处理上, 系统可采用像元细分的方法和先进的光斑检测算法, 对接收到的光斑进行精确地实时分析和定位。这种技术不仅可以提高跟踪精度, 还能在一定程度上抵消由于环境变化导致的光斑漂移。因此对于机载光电设备来说, 机载平台飞行时受到的外部扰动才是影响跟踪精度的最大误差源。

2 基于 TD 的机载激光通信跟踪控制方法

在自由空间环境中, 当两个光通信终端的视轴对准时, 由于机载平台的运动、振动、外部干扰和激光束特性等因素的影响, 视轴对准角度通常会存在偏差, 且具有一定的随机性。通常情况下, 由于 PID 算法结构简单, 鲁棒性和适应性较强, 且调节整定很少依赖于系统的具体模型^[18], 其在工业控制中是应用的最为广泛的一种控制方法, 但同时也具有一些典型的缺点。由于 PID 是基于误差反馈的控制方法, 当初始误差较大时, PID 控制会产生较大的控制输入量, 此时将会产生较大的超调。除此以外, PID 的微分信号时常会因为其他噪声的影响而无法准确获取, 因此微分项难以发挥其应有的作用。

为解决上述矛盾, 考虑将跟踪微分器(TD)作为 PID 控制器的测量反馈环节使用, 跟踪微分器是自抗扰控制器(ADRC, active disturbance rejection control)的核心组成部分之一, 它可用于实现对设定值的快速跟踪^[19-23], 将信号做过渡处理, 并且可以对信号进行滤波, 于是在 PID 控制器的基础上结合使用跟踪微分器, 设计了一个既能保证精度又能保证稳定性的 TD-PID 控制系统。

在控制系统中先通过 TD 产生过渡过程, 提取含有

随机噪声的输入信号和输入信号的微分信号，再通过 PID 控制器进行控制输出。即 TD 会产生两个信号，一个是过渡信号，一个是过渡信号的微分信号，其中过渡信号即为没有超调的信号。这种方法的优势在于，跟踪微分器能够有效抑制输入信号中的高频噪声，避免 PID 控制器的微分环节对高频噪声的放大而导致输出抖动或不稳定。具体来说，过渡信号的提取使控制系统能够在具有更高稳定性的基础上进行操作，从而避免了传统 PID 控制在面对噪声时可能出现的不稳定现象。在本控制系统中，机载平台运动变化幅度变化较大，容易对控制系统产生冲击，而跟踪微分器可以将此变化平滑输出，与 PID 控制结合使用，减小系统超调，从而提高对激光光束的跟踪精度，从而实现激光链路的稳定通信目标。

跟踪微分器是通过 *fhan* () 函数的计算后将一输入信号处理为一个输入信号的跟踪信号和输入信号的近似微分信号的，该跟踪微分器的结构如下式：

$$\begin{cases} f\text{h} = f\text{han}[z_1(k) - u, z_2(k), r, h_0] \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h * z_2(k) \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h * f\text{han}[z_1(k) - u, z_2(k), r, h_0] \end{cases} \quad (1)$$

在实际使用中，获取到的相机光斑脱靶量数据信号是非连续的，反馈频率以相机的帧频为准，因此本控制系统以离散信号为主，是一个时变的离散化系统。跟踪微分器设计为最速离散跟踪微分器，其中 *u* 是整个跟踪控制系统实际的控制输出，即为 PID 控制器的输出结果，同时也是 TD 的输入信号， $z_1(k)$ 为 *u* 的跟踪信号； $z_2(k)$ 为 *u* 的微分信号；*r* 决定信号的跟踪速度，称为速度因子；*h* 为积分步长；*h₀* 为滤波因子，主要对噪声起滤波作用，取适当大于积分步长 *h* 的参数，可减小速度曲线进入稳态时刻的超调现象；*fhan* () 为最速控制综合函数，具体表达式如下：

$$\begin{cases} d = r * h \\ d_0 = d * h \\ y = z_1 + z_2 * h \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8 * r * |y|} \\ a = \begin{cases} z_2 + \frac{a_0 - d}{2} * \text{sign}(y), |y| > d_0 \\ z_2 + \frac{y}{h}, |y| \leq d_0 \end{cases} \\ f\text{han} = \begin{cases} -r * \text{sign}(a), |a| > d \\ -r * \frac{a}{d}, |a| \leq d \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

其中：*y*，*a₀* 与 *a* 均为计算中间值，将时间步长 *h* 改为独立于时间步长的另一可调参数 *h₀* 即可得到 *fhan* ($z_1(k)$, $z_2(k)$, *r*, *h₀*)，*r* 和 *h₀* 均为可调参数。经过跟踪微分器 (TD) 处理后的跟踪信号 $z_1(k)$ 作为 PID

控制器的比例和积分部分的输入，微分信号 $z_2(k)$ 直接替代 PID 控制中的微分部分，经过计算后得到相应的控制输出值 *u* 即为执行器的最终输出，则改进后的 PID 控制律如下式：

$$u(k) = K_p * e(k) + K_i * \sum_{i=0}^k e(i) + K_d * [z_2(k)] \quad (3)$$

其中： K_p 代表比例增益，是调适参数； K_i 代表积分增益，也是调适参数； K_d 代表微分增益，也是调适参数；*e* 代表误差 = 期望值 - 实际输出值；*k* 代表采样次数。

对 TD-PID 跟踪控制系统和单独使用 PID 控制器的跟踪系统分别做仿真分析，对控制器中各个调适参数经过人工调整优化后，加入同一扰动后的结果如图 8~9 所示，最终 TD-PID 中 TD 的参数 *r* 设置为 30，*h* 设置为 0.001，PID 控制器中的 $K_p = 4.7378$ ， $K_i = 2.4125$ ， $K_d = 0.2286$ ；单独使用 PID 控制器情况下的参数为 $K_p = 24.6593$ ， $K_i = 19.4786$ ， $K_d = 14.5479$ 。

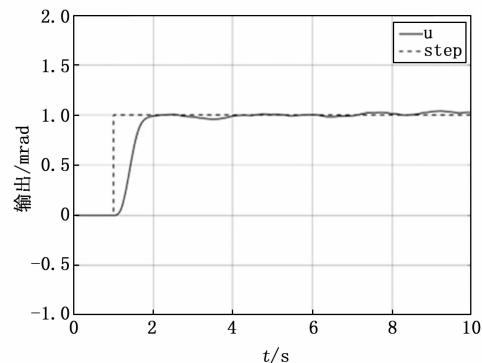


图 8 TD-PID 控制响应输出曲线

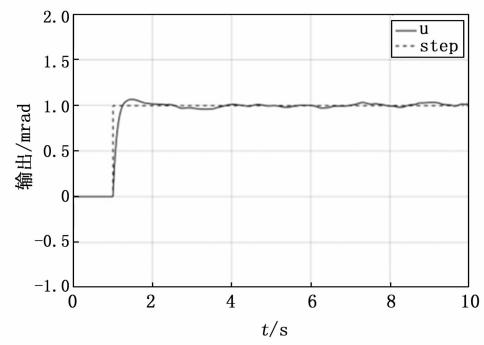


图 9 PID 控制响应输出曲线

基于 TD 的跟踪控制器在经过跟踪微分器处理后，系统中的 PID 控制器可以接收其过渡信号和微分信号，实现对系统的稳定控制。再通过调整比例、积分和微分参数，使 PID 控制器能够优化系统的响应，确保其跟踪精度。对比仿真结果可知，虽然使用 PID 单独控制时虽然可以提高系统的响应速度，但若要保证残差尽量小，同时也会带来超调，而 TD-PID 这种组合可以在不

超调的情况下达到与 PID 控制相似的控制效果。通过 TD 的平滑输出, PID 控制器避免了输出的抖动或不稳定问题, 提升了鲁棒性。且在激光通信系统中为了防止断链, 应减小输出的抖动, 因此 TD-PID 控制方法的特性与激光通信的要求非常匹配, 可以使激光通信链路在面对扰动和环境变化时仍能保持稳定的性能。

3 实验结果与分析

为了验证基于 TD 的机载激光通信跟踪控制方法的有效性, 搭建了实验室测试场景, 分别在有扰动和无扰动的场景下进行了测试, 测试时的成像画面如图 10 所示。

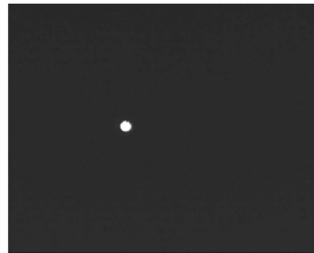


图 10 相机成像画面

3.1 实验步骤

图 11 为吊舱加扰的跟踪性能测试系统示意图, 主要由吊舱、激光器、发射镜头、手动二维转台和电动二维转台组成, 并按图 12 示意进行系统连接, 其中吊舱下的电动二维转台用于模拟飞行扰动量, 激光器下的二维转台用于给出动态控制量。

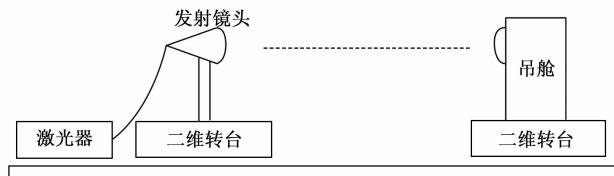


图 11 加扰的跟踪性能测试系统框图

具体实验步骤如下:

1) 按照上述的跟踪测试示意框图完成系统连接, 由激光器入射的信号功率调节至 10 dBm, 同时在发射光纤处安装衰减器再次进行衰减, 观察系统界面, 将短波红外相机探测器的接收光功率调整至 -28 dBm 左右, 完成链路建立后使吊舱进入跟踪过程;

2) 场景 A: 无干扰时拧动发射端二维转台的方位控制旋钮, 保持运动 30 s 左右, 同时使吊舱进行跟踪, 每隔 1 s 记录一次短波红外相机探测器反馈的质心位置。场景 B: 有干扰时需开启电动二维转台, 使方位轴进行来回摆动, 模拟扰动量, 然后拧动发射端二维转台的控制旋钮, 保持运动 30 s 左右, 同时使吊舱进行跟踪, 每隔 1 s 记录一次短波红外相机探测器反馈的质心位置。

3) 根据记录所得质心位置与靶面位置进行作差得

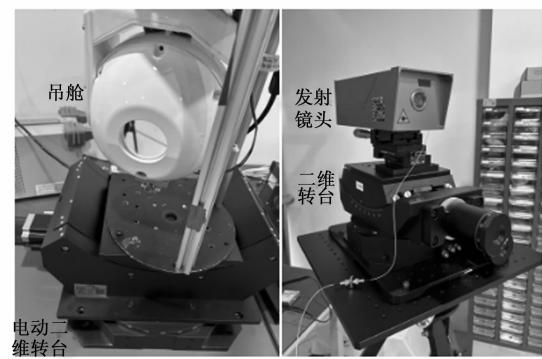


图 12 实物图

到脱靶量的像素值, 再将像素值转换成角度值, 然后分别进行均值计算和标准差计算, 最终的跟踪精度应以 $\bar{X} \pm 3\sigma$ 确认。

脱靶量的像素值转换成角度值需要通过光斑在探测器中运动的距离和整个光学机构的焦距计算得到, 吊舱接收镜头到短波红外相机探测器的光学合成焦距为 100 mm, 相机的像元为 15 μm , 因此脱靶量角度值的计算公式为:

$$\theta = \Delta * \frac{15}{100} \quad (4)$$

其中: θ 为脱靶量的角度值, 单位为 mrad, Δ 为脱靶量的像素值, 单位为 pixel。

3.2 实验测试结果

在系统中采用 TD 与 PID 结合的控制算法后, 对控制器参数进行相应的调整, 无扰动和有扰动的场景下均分别进行了 5 次测试, 不同场景下的具体测试结果如表 1、表 2 所示。

表 1 无扰动时的测试结果

测试序号	脱靶量 X 轴均值/pixel	脱靶量 X 轴标准差 (3 σ)/pixel	脱靶量 Y 轴均值/pixel	脱靶量 Y 轴标准差 (3 σ)/pixel	跟踪精度/mrad
1	1.09	2.52	2.61	5.07	0.42 \pm 0.69
2	2.73	6.81	2.33	4.65	0.60 \pm 0.96
3	1.97	5.01	1.00	2.37	0.36 \pm 0.69
4	1.85	3.69	1.64	4.29	0.39 \pm 0.78
5	1.79	2.79	0.84	3.24	0.35 \pm 0.48

表 2 有扰动时的测试结果

测试序号	脱靶量 X 轴均值/pixel	脱靶量 X 轴标准差 (3σ)/pixel	脱靶量 Y 轴均值/pixel	脱靶量 Y 轴标准差 (3σ)/pixel	跟踪精度/mrad
1	3.94	14.73	0.88	2.10	0.64±2.16
2	2.58	11.73	1.42	5.52	0.51±1.80
3	4.70	16.44	1.27	4.26	0.79±2.37
4	2.39	7.35	1.48	4.92	0.48±1.11
5	2.55	13.05	1.33	3.33	0.48±1.89

此机载激光通信跟踪控制系统采用的是直径 0.5 mm 光敏面的 APD, 因此信号光能用于通信的通信视场为 5 mrad, 为确保终端能够持续地稳定通信, 跟踪控制系统的跟踪精度需要保证在 5 mrad 以内, 分析表 1 可知, 当不加扰动时, 5 次测试中光电吊舱的动态跟踪精度均值皆不超过 1 mrad, 且这 5 次跟踪精度的三倍标准差也均在 1 mrad 以内, 由此可见对于吊舱跟踪控制系统而言, 其采用此算法时拥有较好的鲁棒性, 光电吊舱能够对另一端发射的信号光进行稳定的动态跟踪。

在无扰动的测试基础上加入电动转台, 对方位轴输入正弦信号使转台呈现来回摆动的状态, 模拟机载设备在高空中遇风摆动的状态或机载平台飞行时的低频振动。根据表 2 可知, 5 次测量中的跟踪精度均值皆可控制至 1 mrad 以内, 跟踪精度的三倍标准差均保持在 2 mrad 左右, 最佳可达到 1.11 mrad, 但整体跟踪精度均不超过通信视场的 5 mrad, 同时还保证了至少 1 mrad 的误差冗余量, 由此可见, 应用此算法能够使本机载激光通信终端与另一地面终端在动态跟踪时的动态跟踪误差稳定在 5 mrad 以内, 从而建立稳定的通信链路。

4 结束语

基于目前无人机应用的拓展, 机载激光通信系统凭借其高机动性与便携性, 使其在保密通信领域占有一席之地。针对机载激光通信跟踪系统如何提高跟踪精度的问题, 设计了基于 TD 的机载激光通信跟踪控制系统, 描述了机载激光通信跟踪控制系统的框架体系, 结合主控模块、伺服系统、光学系统和图像处理单元等多个硬件模块, 在确定好光学设计的同时, 完成了对跟踪控制系统环路的设计, 根据机载平台实际的飞行状态, 使用跟踪微分器确定探测器反馈信号的过渡过程, 并设定靶心位置作为期望的参考输入, 结合应用 PID 控制器减小误差以达到跟踪的效果。所提跟踪控制系统利用了 PID 算法达成控制的快速性, 利用跟踪微分器的跟踪过程减小了超调, 达成控制的稳定性, 根据最终的测试结果来看, 此跟踪系统在实际应用场景中也达成了控制的准确性, 保证了既定的跟踪精度要求。在实用性方面, 所提的控制系统的应用, 有效达成了机载激光通信终端

对目标信号光动态跟踪精度的要求, 保障了机载激光通信系统对地面终端的通信链路保持, 符合实际应用需求。

未来在空中骨干网络建设中可将激光通信与射频通信互补使用, 加入舰载平台、卫星平台和地面站等设施共同组成空天地一体化网络。该网络在军事上可应用于无人机、临近空间飞行器、预警机与地面或者其他指挥节点, 完成数据传输任务, 即使在电磁拒止的环境下也可快速部署空中通信单元。在民用上可以满足大型客机的网络通信需求, 提供航行过程中的无间断网络服务。

参考文献:

- [1] 苏绍璟, 童小钟, 魏俊宇. 基于自由空间光的无人机集群通信载荷技术发展现状与趋势 [J]. 国防科技大学学报, 2021, 43 (4): 118–127.
- [2] 鲁绍文, 侯 霞, 李国通. 空间光通信技术发展现状及趋势 [J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3 (2): 39–46.
- [3] 赵志鹏. 机载激光通信系统发展现状与趋势探讨 [J]. 电子世界, 2019, (10): 85–86.
- [4] TROTTER C, et al. Gigabit indoor free-space optical communication enhanced by dynamic beam control [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, 2021: 1–2.
- [5] NAFEES M, HUANG S, THOMPSON J, et al. Back-haul-Aware UAV-Aided capacity enhancement in mixed FSO-RF network [J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2024, 5: 4400–4416.
- [6] 梅 博, 杨中华, 李梦男. 无信标星间激光通信系统粗精复合扫描方法 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51 (6): 428–437.
- [7] SHARMA P, SINGH D, S R. Performance analysis of UAV-Based FSO communication over doubly inverted gamma-gamma turbulence channel [C] // National Conference on Communications, 2024: 1–6.
- [8] SONG S, CHOI M, KO D E, et al. Multi-UAV trajectory optimization considering collisions in FSO communication networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39 (11): 3378–3394.
- [9] NGUYEN T V, LE H D, PHAM A T. On the design of RIS-UAV Relay-Assisted hybrid FSO/RF Satellite-Aerial-Ground integrated network [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59 (2): 757–771.
- [10] 安建欣, 何晓垒, 杨乾远. 小型无人机空地无线激光通信的应用研究 [J]. 光通信技术, 2017, 41 (6): 10–13.
- [11] 卞 冉, 张燕革, 陈 晶. 无线激光通信线性自抗扰控制研究与实验 [J]. 光通信技术, 2020, 44 (1): 39–43.
- [12] 姜 锋. 基于全光捕获法的机载激光通信跟踪控制系统

- 设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (9): 93–98.
- [13] 李燕军, 张 敏, 刘 洋. 改进的内模控制在机载激光通信系统的应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60 (1): 123–131.
- [14] 曲 正, 常 帅, 董 岩. 基于改进加速度惯量反馈的机载激光通信平台稳定策略 [J]. 光学学报, 2021, 41 (23): 75–84.
- [15] 母东杰, 郝 河, 蔡 会. 基于跟踪微分器的伺服系统抗干扰特性仿真研究 [J]. 机电工程技术, 2024, 53 (5): 46–49.
- [16] LI W, LI B, HUA W, et al. Tracking-Differentiator-Based Sliding-Mode control for tracking control [C] // China Automation Congress, 2023: 5132–5137.
- [17] 姜会林. 空间激光通信技术与系统 [M]. 北京, 国防工业出版社, 2010: 264–265.
- [18] 辛 强, 易 俊, 袁文强. 基于 PID 搜索算法的永磁同步电机振动抑制研究 [J]. 机电工程技术, 2024, 53 (10): 213–216.
- (上接第 66 页)
- [6] GUAN X, MU Q Z, YIN X J, et al. Characterization and prediction of wind turbine blade damage based on fiber grating sensor [J]. EAI Endorsed Transactions on Energy Web, 2024, 11: 1–7.
- [7] 章学兵, 骆国防. 基于风机叶片缺陷的超声波检测方法分析 [J]. 河北电力技术, 2022, 41 (1): 76–79.
- [8] 周登科, 郭星辰, 史凯特, 等. 风电场无人机巡检红外叶片图像拼接算法 [J]. 红外技术, 2023, 45 (11): 1161–1168.
- [9] XIAO M, GONG Y, WANG H, et al. Defect detection of light guide plate based on improved YOLOv5 networks [J]. Optoelectronics Letters, 2024, 20 (9): 560–567.
- [10] DINÇ Ç S, KÜÇÜK N, ŞENKESEN Ö, et al. A multicentric study on a dosimetric comparison of extended SSD technique, VMAT-Based and helical tomotherapy (HT) for total body irradiation (TBI) [J]. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 2024, 17 (3): 101050–101050.
- [11] JOHNSON D. YOLOv1 to v8: comprehensive review on YOLO variants [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2023: 211–230.
- [12] MARTINEZ P. YOLOv10 for automated welding seam quality control [C] // Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, 2024: 1432–1440.
- [13] 全卫国, 蔡天娇, 王用沛, 等. 基于 YOLOv8 改进的风机叶片小尺度缺陷检测算法 [J/OL]. 电气工程学报, 1–10 [2025–07–28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20250313.1647.010.html>.
- [14] 曾勇杰, 范必双, 杨涯文, 等. 改进 YOLOv8 算法在风
- [19] WU Z, SHI G, LI D, et al. Active disturbance rejection control design for high-order integral systems [J]. ISA Transactions, 2022, 125: 560–570.
- [20] QIU B, XIONG H, FU J. The position control of micro quad-rotor UAV based on ADRC [C] // 2015 Chinese Automation Congress, 2015: 422–426.
- [21] LIU L, LIU H, NIE G, et al. Control strategy of permanent magnet synchronous motor and brushed DC servo motor based on ADRC [C] // 2023 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2023: 461–466.
- [22] 胡近朱, 高 强, 侯润民. 偷察车云台伺服系统的改进自抗扰控制 [J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41 (1): 65–69.
- [23] DONG H L, HUANG H B, ZHUANG Y F. Heading angle controller design of USV based on improved sliding mode active disturbance rejection control [C] // Chinese Automation Congress, 2020: 3547–3551.
- [24] 机叶片缺陷检测上的应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38 (8): 26–35.
- [15] 许长栋, 谭健峰, 张 辉. 基于改进 YOLOv8 算法的风机叶片表面缺陷检测 [J]. 传感器世界, 2024, 30 (12): 33–38.
- [16] 汤占军, 张朝杰, 王 健, 等. 基于改进 YOLOv7 的风机叶片缺陷检测研究 [J/OL]. 北京航空航天大学学报, 1–15 [2025–07–29]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0228>.
- [17] QIU X, CHEN Y, CAI W, et al. LD-YOLOv10: a lightweight target detection algorithm for drone scenarios based on YOLOv10 [J]. Electronics, 2024, 13 (16): 3269.
- [18] 高均益, 张 伟, 李泽麟. YOLO-BFEPS: 一种高效注意力增强的跨尺度 YOLOv10 火灾检测模型 [J]. 计算机科学, 2025, 52 (s1): 424–432.
- [19] 宋维凯, 柯福阳, 魏 民, 等. 非接触式单目视觉高精度自动沉降监测 [J]. 测绘通报, 2025 (5): 145–151.
- [20] 曹珍贯, 陶明丽, 王勇杰, 等. 基于 YOLOv10n 的轻量化输电塔异物检测模型 [J/OL]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 1–13 [2025–07–29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1155.N.20250526.1633.002.html>.
- [21] LAU K W, PO L M, REHMAN Y A U. Large separable kernel attention: rethinking the large kernel attention design in CNN [J]. Expert Systems with Applications, 2024, 236: 121352.
- [22] HUANG H, CHEN Z, ZOU Y, et al. Channel prior convolutional attention for medical image segmentation [J]. Computers in Biology and Medicine, 2024, 178: 108–784.