

基于伺服控制的水下光动态通信捕获跟踪系统设计

刘旭, 钟昉如, 马薪柠, 张鹏*

长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022

摘要 基于空间光通信捕获、对准、跟踪技术的基本理念, 笔者设计了一套基于伺服控制的水下无线光动态通信捕获跟踪系统, 提出了基于跟踪微分器的电机加减速控制技术, 设计了转台粗、精跟踪策略。在此基础上, 笔者开展仿真验证、室内模拟测试及水下激光光斑捕获跟踪实验。仿真验证结果表明了该系统与算法策略在原理上的可行性; 室内模拟测试方位、俯仰跟踪精度分别为 0.08 mrad 和 0.27 mrad, 这表明可将本系统应用于水下无线光动态通信; 水下激光光斑捕获跟踪实验结果表明系统的捕获概率优于 99%, 捕获时间少于 9 s, 水箱施加扰动前后的跟踪精度分别为 0.6 mrad 和 2 mrad。本文为后续开展水下无线光动态通信技术研究提供了一种技术方法和研究思路。

关键词 海洋光学; 捕获跟踪; 跟踪微分器; 伺服控制; 跟踪精度

中图分类号 TN929.1 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL230733

1 引言

激光捕获、对准、跟踪 (APT) 技术已被广泛应用于星间、星地、机载、舰载等平台的空域光通信领域^[1], 该技术采用粗、精跟踪相结合的方式可以实现 μrad 量级的高概率、高速率、高精度动态空域光通信。目前, 将 APT 技术应用于水下无线光通信还鲜见报道。究其原因, 一方面是由于 APT 系统结构复杂精密、体积庞大、价格昂贵, 难以满足水下无线光通信系统的轻小型化设计要求, 另一方面是因为水下信道的阻力^[2-3]、压力以及环境自适应性等因素导致伺服控制系统的精度不高、工程化难实现^[4], 制约了 APT 技术在水下无线光通信领域的发展与应用。因此, 利用 APT 技术对动态的水下光通信激光光斑进行稳定有效的捕获与跟踪, 提高通信链路的稳定性与可通率, 成为水下无线光通信领域未来重要的发展趋势之一。

2017 年, Williams 等^[5]利用宽视场的 sCMOS 相机进行链路捕获, 并利用基于硅光电倍增管阵列的四象限探测器进行精跟踪, 展示了两个水下节点之间的双向稳定的激光 APT 能力。2019 年, 清华大学的 Huang 等^[6]提出并研究了一种基于混合激光二极管 (LD) 和发光二极管 (LED) 的水下无线光动态通信系统, 其中的 LED 用于粗对准, LD 用于高精度定位, 以降低光学对准的难度。2021 年, 浙江大学的徐敬团队^[7]提出了一种基于机器视觉的水下无线光动态通

信捕获、对准和跟踪系统, 该系统使用 OpenMV 相机检测特定标记, 能够迅速对准并建立光链路。本文重点开展基于伺服控制的水下无线光动态通信光斑捕获跟踪系统的设计, 对伺服控制的系统架构、模型组成、控制算法等进行研究, 并开展了仿真验证、室内模拟测试及水下激光光斑捕获跟踪演示验证实验, 验证了该系统在水下无线光通信链路建立方面应用的可行性。

2 伺服控制系统设计

水下无线光动态通信系统的伺服控制系统主要包含以下 3 部分: 1) 光电跟踪平台; 2) PC 端 LabVIEW 上位机; 3) 下位机。设计思路借鉴了空间激光通信 APT 技术, 采用无信标 APT 结构, 即捕获和通信使用同一光源^[8]。整套伺服控制系统的结构框图如图 1 所示。

系统各部分的功能特点如下:

1) 光电跟踪平台。该平台由 CMOS 相机和二维伺服转台组成。CMOS 相机采集含有激光光斑的视频图像后将其传递到 LabVIEW 上位机中, 完成对信标光斑的粗跟踪捕获。二维伺服转台包括俯仰转台和方位转台, 两轴系分别安装分装型步进电机, 可以通过 USB 串口模块连接 PC 端进行上位机调参。

2) PC 端 LabVIEW 上位机。负责接收图像信息、计算目标坐标值及中心脱靶量、算法处理、发送控制参数等工作, 是整个系统的核心控制部分。

收稿日期: 2023-04-17; 修回日期: 2023-05-26; 录用日期: 2023-06-15; 网络首发日期: 2023-07-04

基金项目: 吉林省自然科学基金 (YDZJ202301ZYTS394)、吉林省教育厅科学技术研究项目 (JJKH20230814KJ)、水声对抗技术重点实验室开发基金 (CX-2022-032, 6142214012021-03)

通信作者: *zp@cust.edu.cn

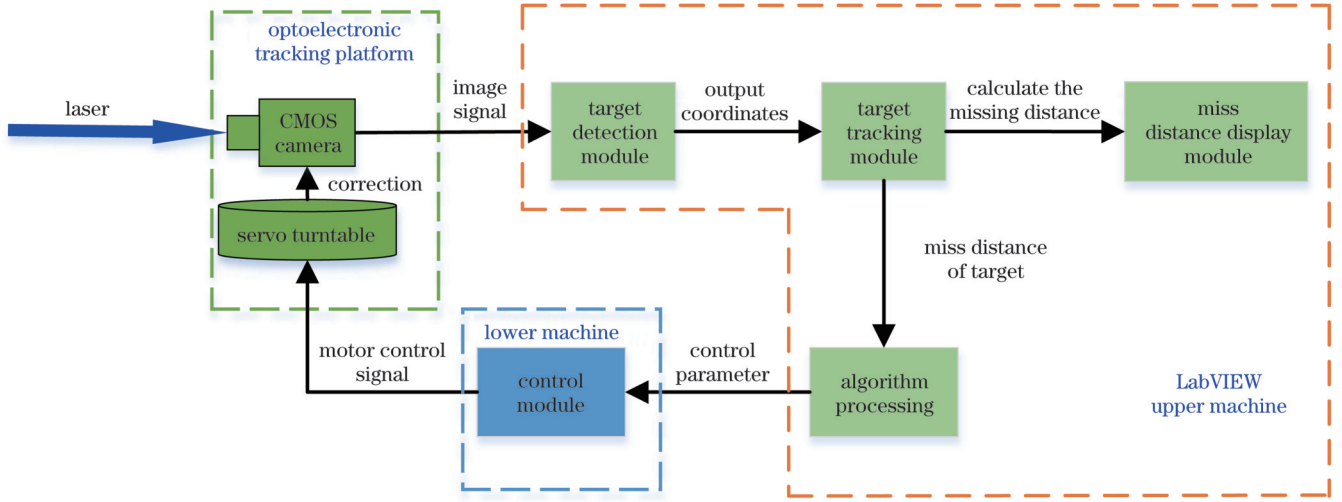


图 1 伺服控制系统结构框图

Fig. 1 Structure block diagram of servo control system

3) 下位机。通过产生相应的脉冲信号、方向信号、停止信号驱动电机运转,完成系统的精跟踪。

3 关键技术

3.1 四象限跟踪原理

高清 CMOS 相机采集到含有激光光斑的视频图像后将其传递到 LabVIEW 上位机中,计算目标光斑

的坐标值及中心脱靶量。二维伺服转台带动高清 CMOS 相机运动,摄像机镜头的焦点跟随目标的运动方向运动,使目标的图像处于相机中心位置,达到对目标跟踪的目的。如图 2(a)所示,将相机成像区域划分成 4 个象限^[9],光斑在实际图像中的位置与中心位置的偏移量称为脱靶量。图 2(b)给出了实际光斑可能存在的 9 个位置。

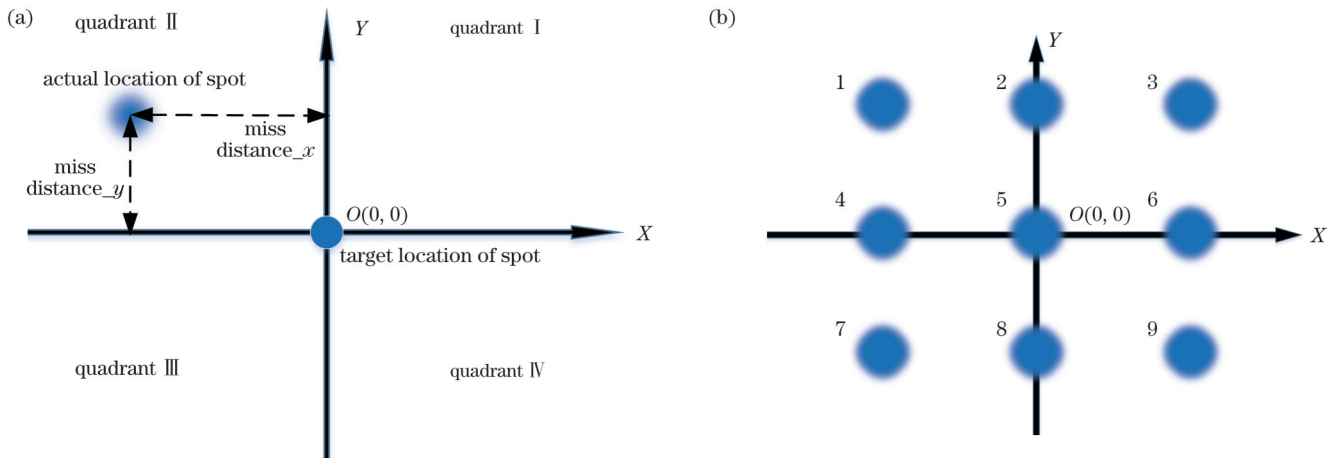


图 2 四象限跟踪原理示意图。(a)四象限示意图;(b)实际光斑可能存在的 9 个位置

Fig. 2 Schematic diagram of four-quadrant tracking principle. (a) Schematic diagram of four-quadrant; (b) nine positions where actual light spots may exist

根据图 2(b)所示的位置关系, X、Y 轴方向的脱靶量分别由方位电机和俯仰电机控制,正方向代表相应电机反转,反方向代表正转。实际光斑处于不同位置时脱靶量的大小以及相应电机的控制策略如表 1 所示。

3.2 基于跟踪微分器的电机加减速控制技术

在伺服控制过程中,为了使电机达到额定的转速或目标角度,需要针对性地采用电机加减速算法,以设计出电机加减速速度曲线。步进电机自适应加减速控制算法主要有梯形加减速控制算法、指数型

曲线控制算法和 S 型曲线控制算法等^[10-12]。但传统算法只适用于电机的方向、初始速度、加速度等参数已经事先确定并在电机达到目标位置之前不再改动的情况,对于水下无线光动态通信的光斑捕获跟踪而言,电机运行参数需要实时改变,因此需要设计一种基于自抗扰控制中跟踪微分器的电机自适应加减速算法^[13-14]。

对于跟踪微分器,如果对它输入一信号 $x(t)$,它将输出两个信号 x_1 和 x_2 ,其中跟踪信号 x_1 跟踪 $x(t)$,而微分信号 $x_2 = \dot{x}_1$ 。以下将给出跟踪微分器的离散

表 1 实际光斑处于不同位置时脱靶量的大小以及相应电机的控制策略

Table 1 Miss distance of the actual spot at different positions and the control strategy of corresponding motor

Spot position	The size of miss distance	Azimuth motor status	Pitch motor status
1	$x < 0, y > 0$	Positive	Negative
2	$x = 0, y > 0$	Stationary	Negative
3	$x > 0, y > 0$	Negative	Negative
4	$x < 0, y = 0$	Positive	Stationary
5	$x = y = 0$	Stationary	Stationary
6	$x > 0, y = 0$	Negative	Stationary
7	$x < 0, y < 0$	Positive	Positive
8	$x = 0, y < 0$	Stationary	Positive
9	$x > 0, y < 0$	Negative	Positive

形式^[15]。

设离散系统为

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + hu, |u| \leq r \end{cases} \quad (1)$$

式中： h 为跟踪微分器的步长，又称计算跟新周期；二阶微分 $u = \ddot{x}_1$ ；“速度因子” r 为最大的加速度。将电机设定的角度信号看作输入信号 $x(t)$ ，则 x_1 就是实际的角度信号， x_2 就是电机速度信号，则电机的实际离散系统可表示为

$$\begin{cases} x_1(t+h) = x_1(t) + hx_2(t) \\ x_2(t+h) = x_2(t) + hu, |u| \leq r \end{cases} \quad (2)$$

以角度信号为例，式(2)所示的含义为：以某一速度运动的电机对某一角度位置施加一个持续的加速度 u ，在满足 $|u| \leq r$ 的条件下能使电机在最短时间内达到参考速度值。

令 $u = f_{st}(x_1, x_2, r, h)$ ，其中 $f_{st}(x_1, x_2, r, h)$ 称为“快速控制最优综合函数”。文献[15]给出了它的表达式，即

$$\begin{cases} d = rh \\ d_0 = dh \\ y = x_1 + hx_2 \\ a_0 = (d^2 + 8r|y|)^{\frac{1}{2}} \\ a = \begin{cases} x_2 + (a_0 - d)/2, |y| > d_0 \\ x_2 + y/h, |y| \leq d_0 \end{cases} \\ f_{st} = - \begin{cases} ra/d, |a| \leq d \\ r \cdot \text{sgn}(a), |a| > d \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

在实际应用时，进一步推导可得详细的快速控制最优综合函数 f_{re} 为

$$\begin{cases} y = x_1 + hx_2 \\ k = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{8|y|}{h^2 r}} \right) \\ s = \text{sign}(y) \\ f_{re} = \begin{cases} -r \cdot \text{sat} \left(x_2 + \frac{y}{h}, hr \right), |y| \leq h^2 r \\ r \cdot \text{sat} \left[\left(1 - \frac{k}{2} \right) s - \frac{x_1 + khx_2}{(k-1)h^2 r}, 1 \right], |y| > h^2 r \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

在水下无线光动态通信中要求捕获光斑时电机速度不能突变，同时为了满足电机运行频率与负载力矩之间的确定关系（以避免失步现象），需要限制电机的最大速度，而跟踪微分器本身没有这一参数。因此，对式(3)中的 f_{st} 函数进行拓展，加入最大限制速度 ρ 以保持速度变化的连续性，即

$$u = f_{st}(x_1, x_2, h, r, \rho) \quad (5)$$

当跟踪微分器预测下一时刻速度超过最大限制速度时，根据式(1)中的第2个方程计算新的加速度，即

$$u = \frac{\rho \text{sgn}(x_2) - x_2}{h} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)可得

$$\begin{cases} y = x_1 + hx_2 \\ k = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{8|y|}{h^2 r}} \right) \\ s = \text{sign}(y) \\ u' = \begin{cases} - \left(x_2 + \frac{y}{h}, hr \right), |y| \leq h^2 r \\ \left[\left(1 - \frac{k}{2} \right) s - \frac{x_1 + khx_2}{(k-1)h^2 r}, 1 \right], |y| > h^2 r \end{cases} \\ u = r \cdot \text{sat}(u') \\ f_{re} = \begin{cases} \text{sat} \left[\frac{\rho \text{sgn}(x_2) - x_2}{h}, -r, r \right], x_2 + hu > \rho \\ u, x_2 + hu \leq \rho \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式(2)、(7)即为本文跟踪微分器实现步进电机加速减速控制的理论模型，其在每个固定的步长 h 内运行跟踪微分器，计算输出给电机的脉冲周期，通过脉冲周期的变化实现电机速度的变化。其算法流程如图3所示。

3.3 电机自适应加速减速实现粗、精跟踪策略

在水下无线光动态通信中跟踪光斑目标时，随着系统对光斑目标位置的校正，目标脱靶量会随之变小，若电机保持恒速运转，当目标校正至屏幕中心时，由于惯性电机将继续按照之前的方向运转，此时将导致电机超调，目标会再次脱靶^[16]。因而，电机需要能够根据

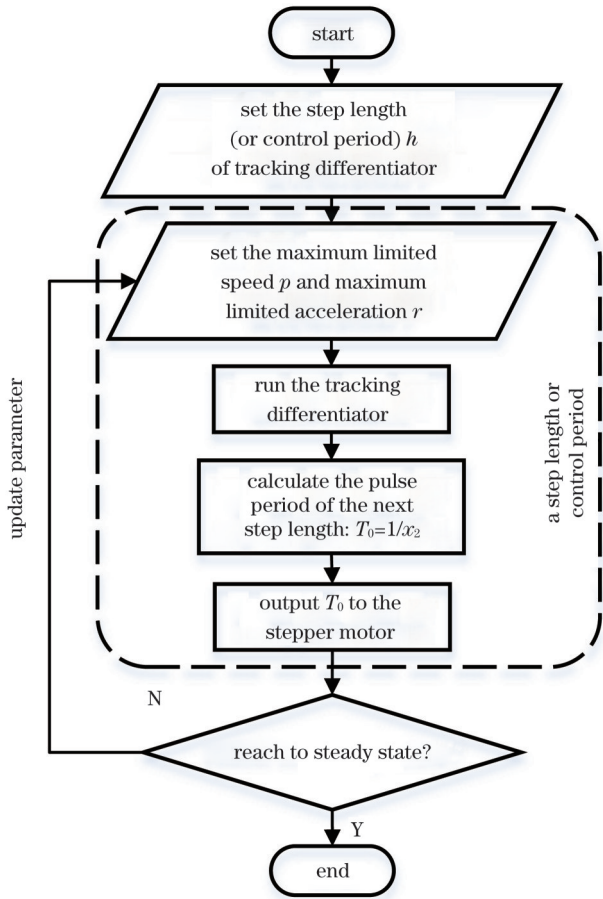


图 3 跟踪微分器控制电机加减速算法的流程图

Fig. 3 Flow chart for tracking differentiator controlling motor acceleration and deceleration algorithm

脱靶量的变化自适应地加减速。利用 3.2 节所述的电机自适应加减速控制技术,笔者设计了水下无线光动态通信光轴的粗、精跟踪策略,使电机分区域自适应地加减速运行,在短时间内迅速捕获并跟踪目标光斑,从而提高水下无线光动态通信的建链速率和鲁棒性。其算法原理介绍如下:

电机角速度对电机电压的传递函数^[17]为

$$\frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{K_T}{K_e K_T + sJ(R + sL)}, \quad (8)$$

式中: ω 为电机角速度; U 为电枢电压平均值; K_T 为电机电磁力矩系数; K_e 为电机反电动势系数; J 为转动惯量; R 为电机电枢的总电感; L 为电机电枢的总电阻。根据该函数可将显示控件分为高速粗跟踪区域、变速区域、低速精跟踪区域。屏幕分辨率为 2560 pixel × 1600 pixel, 设 x 轴方向 $-290 \sim +290$ pixel、 y 轴方向 $-150 \sim +150$ pixel 的矩形区域为精跟踪区域,从中心区域边缘到 x 轴方向 ± 580 pixel、 y 轴方向 ± 300 pixel 的环形区域为变速区域,变速区域的外部区域为粗跟踪区域,如图 4 所示。

当电机运行至相应区域时,通过改变最大限制速度 p 这一参数,即可使电机迅速平滑稳定而不突变地改变至相应区域的速度值。由于电机运行时存在摩擦损耗,因此当电机运行至精跟踪区域时,若方位电机脱靶量低于屏幕像素的 5%、俯仰电机脱靶量低于屏幕像素的 4%,其运行速度会逐渐降至 0,使目标坐标校正至屏幕中心,而不易出现超调。

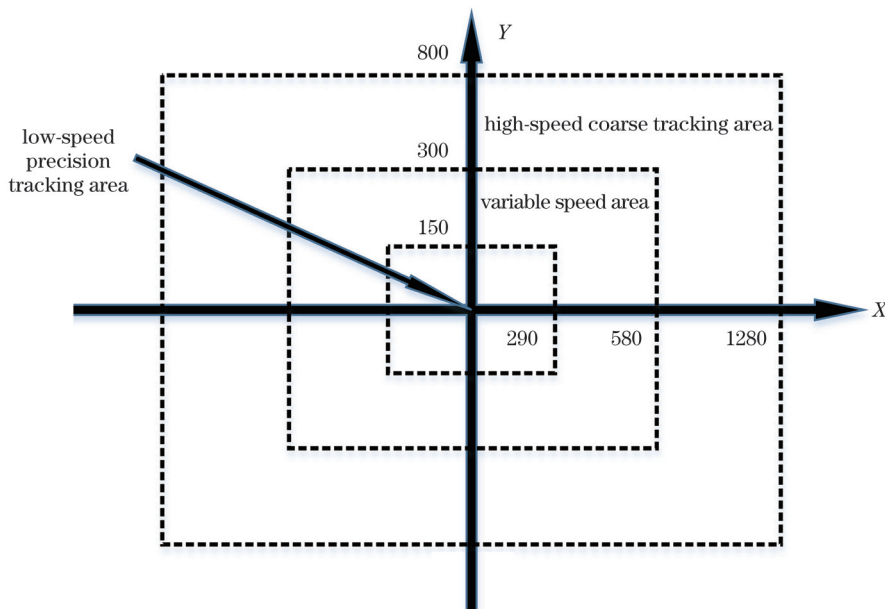


图 4 电机加减速区域分布

Fig. 4 Motor acceleration and deceleration areas distribution

4 实验测试

开展仿真验证、室内测试以及水下激光光斑的捕获跟踪实验,对系统性能指标进行综合测试。在仿真

验证中对系统的原理进行验证,并在 LabVIEW 和 Proteus 联合仿真平台上完成性能测试。室内模拟在大气环境下的实验平台上进行,对系统的捕获时间、跟踪精度等性能指标进行测试。在水下激光光斑捕获跟

踪实验中对经过水箱的激光光斑进行跟踪测试。

4.1 仿真验证

搭建如图 5 所示的上位机和下位机仿真系统。上位机 LabVIEW 实现电机状态显示以及控制面板的设计,下位机以 Proteus 为平台搭建以 AT89C51 芯片为核心的伺服控制步进电机控制电路仿真系统。上下位机之间通过一对虚拟串口实现通信^[18], LabVIEW 接收到脱靶量信息后通过虚拟串口传输至单片机,单片机运行跟踪微分器和粗精跟踪算法,通过改变脉冲频率实现对电机的控制,并在 LabVIEW 中实时显示电机的工作状态,模拟水下无线光动态通信光斑的捕获、对准、跟踪。

LabVIEW 给定任意值的方位和俯仰脱靶量,仿真验证结果如图 6 所示,电机运行状态如表 2 所示。

仿真得到的运行过程中方位、俯仰电机的转速曲线如图 7 所示。接收到脱靶量信息之后,方位、俯仰电机分别从 0 开始反转、正转,并在 0.5 s 内迅速提升至高速粗跟踪挡(50 r/min 左右);在 2 s 和 3 s 时刻,脱靶

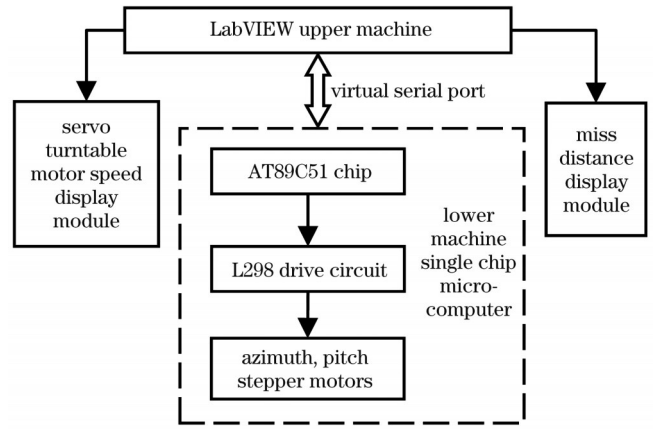


图 5 仿真系统原理图

Fig. 5 Schematic diagram of simulation system

量进一步减小,到达变速区域时,两电机稳定减速至 12.5 r/min;在 4 s 和 5 s 时刻,脱靶量达到精跟踪区域,电机再次减速至 7.1 r/min;在 8 s 时刻,电机逐渐停止运行并依靠惯性将目标光斑移至显示控件的中心位置。

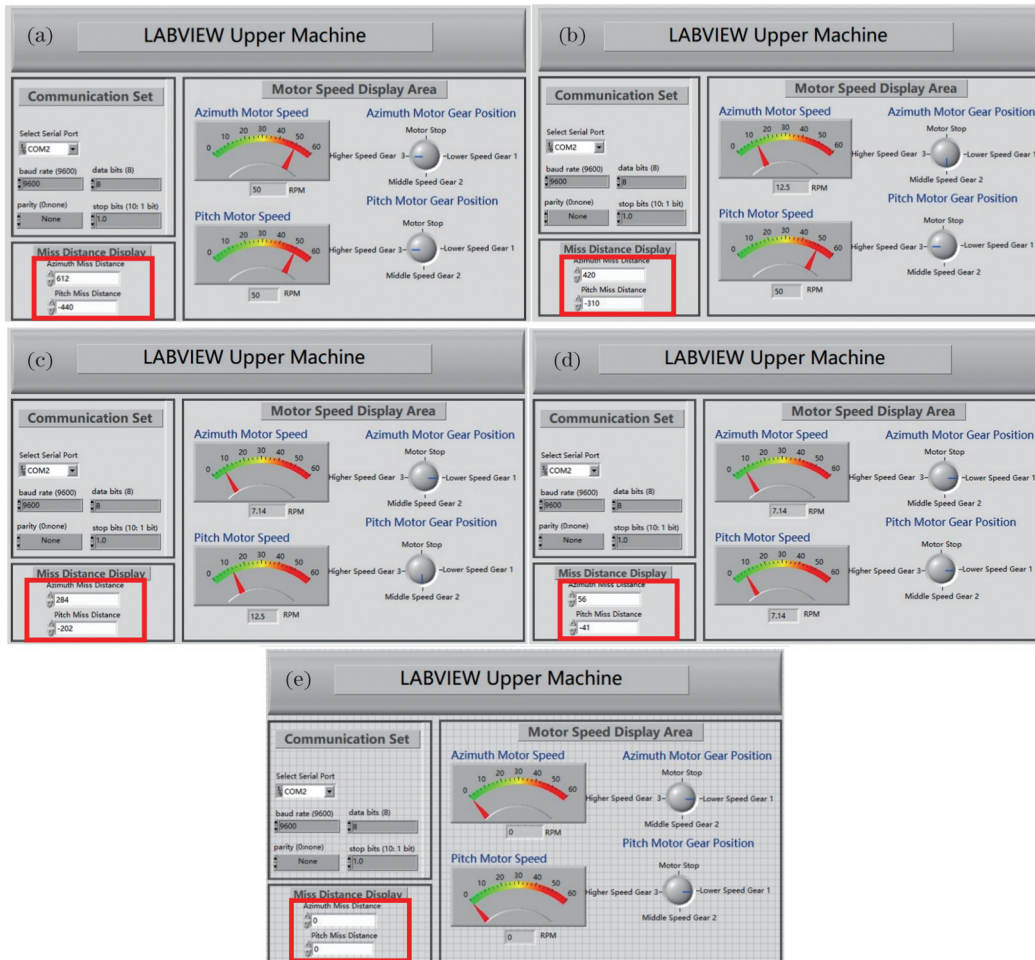


图 6 脱靶量处于不同范围时 LabVIEW 显示的电机速度及挡位。(a)脱靶量为(612 pixel, -440 pixel);(b)脱靶量为(420 pixel, -310 pixel);(c)脱靶量为(284 pixel, -202 pixel);(d)脱靶量为(56 pixel, -41 pixel);(e)脱靶量为(0 pixel, 0 pixel)

Fig. 6 Speed and gear position displayed in LabVIEW of motor in different miss distances. (a) Miss distance is (612 pixel, -440 pixel); (b) miss distance is (420 pixel, -310 pixel); (c) miss distance is (284 pixel, -202 pixel); (d) miss distance is (56 pixel, -41 pixel); (e) miss distance is (0 pixel, 0 pixel)

表 2 脱靶量处于不同范围时电机的运行方向、速度及挡位

Table 2 Direction, speed, and gear position of the motors in different miss distances

Miss distance	Motor	Tracking area	Running speed / ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	Motor direction
(612 pixel, -440 pixel)	Azimuth	High-speed coarse tracking area	50	Negative
	Pitch	High-speed coarse tracking area	50	Positive
(420 pixel, -310 pixel)	Azimuth	Variable speed area	12.5	Negative
	Pitch	High-speed coarse tracking area	50	Positive
(284 pixel, -202 pixel)	Azimuth	Low-speed precision tracking area	7.14	Negative
	Pitch	Variable speed area	12.5	Positive
(56 pixel, -41 pixel)	Azimuth	Low-speed precision tracking area	7.14	Negative
	Pitch	Low-speed precision tracking area	7.14	Positive
(0 pixel, 0 pixel)	Azimuth	Stationary	0	Stationary
	Pitch	Stationary	0	Stationary

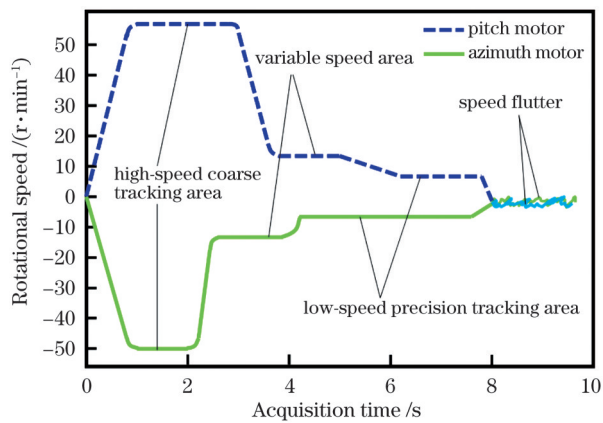


图 7 仿真测试中方位、俯仰电机的转速曲线

Fig. 7 Rotational speed curves of azimuth and pitch motors in the simulation test

综上,模拟光斑在不同位置时,电机自适应地加减速实现粗、精跟踪,同时电机加减速前后稳定运行未失步,尽管电机脱靶量达到零后会出现小幅度的速度颤振但总体可控,验证了伺服控制系统与跟踪微分器实现电机加减速策略的可行性。

4.2 室内测试

搭建如图 8 所示的实验测试装置。采用 450 nm 激光二极管作为发射光源;选用深圳市清华视讯电子科技有限公司生产的 TH-M900HDRCXJG-GZLJ 二维伺服转台,其在水平方向可 360°无限位旋转,俯仰旋转范围为 $-45^{\circ} \sim 90^{\circ}$,可实现 $0.01 \sim 45 (^{\circ})/s$ 的线性旋转变速。转台搭载 G2020-GS-I 型高帧频、全局快门 CMOS 相机,用于完成大视场范围内通信光斑的扫描捕获。

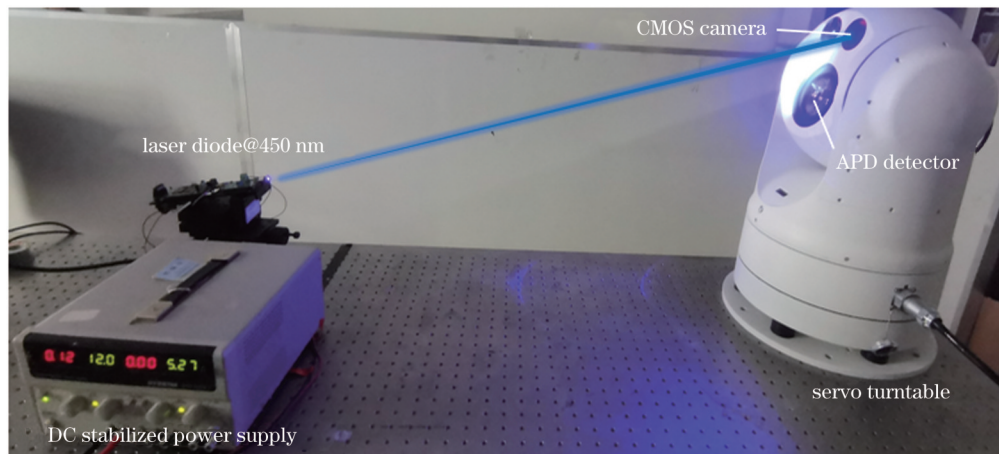


图 8 室内性能测试实验装置

Fig. 8 Indoor performance test experimental device

图 9 为实验测试时 4 个不同方位目标光斑捕获前后相机接收视场的对比。不同位置光斑对应的方位、俯仰脱靶量绝对值随光斑捕获时间变化的曲线如图 10、11 所示。实验测试结果表明系统最快可在 4 s 内完成目标光斑的捕获与跟踪,方位电机跟踪精度为 0.08 mrad ,俯仰电机跟踪精度为 0.27 mrad ,满足跟踪

指标要求。

以图 9(g)~(h) 处的光斑为例,实验过程中方位、俯仰电机的转速突变曲线如图 12 所示。分析表明,电机先后经过高速粗跟踪区域、变速区域、低速精跟踪区域,变速前后稳定运行,验证了本文所提算法的可行性,可将本系统应用于水下无线光动态通信。

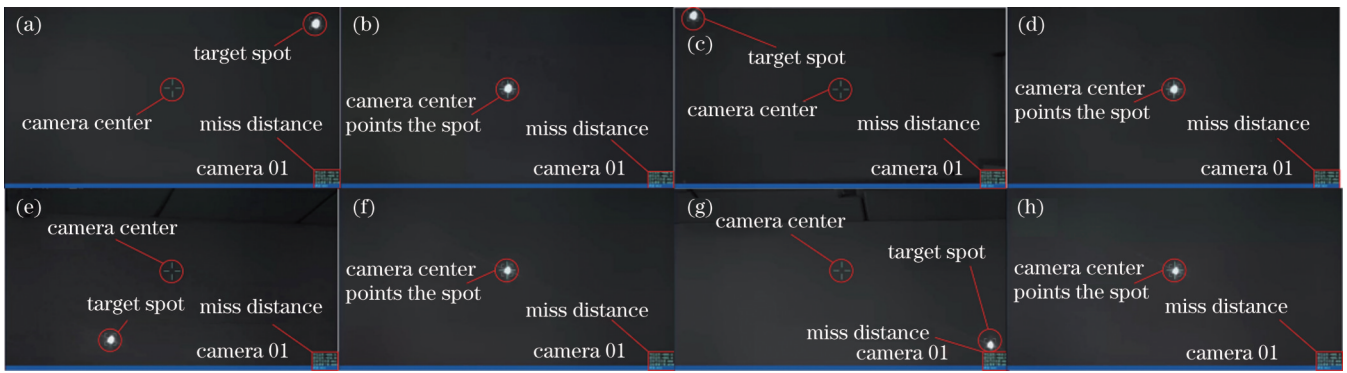


图 9 不同方位目标光斑捕获前后相机接收视场的对比。(a)~(b)右上视场;(c)~(d)左上视场;(e)~(f)左下视场;(g)~(h)右下视场
Fig. 9 Comparison of the camera's field-of-view before and after the target spot acquisition in different directions. (a)~(b) Upper right field-of-view; (c)~(d) upper left field-of-view; (e)~(f) lower left field-of-view; (g)~(h) lower right field-of-view

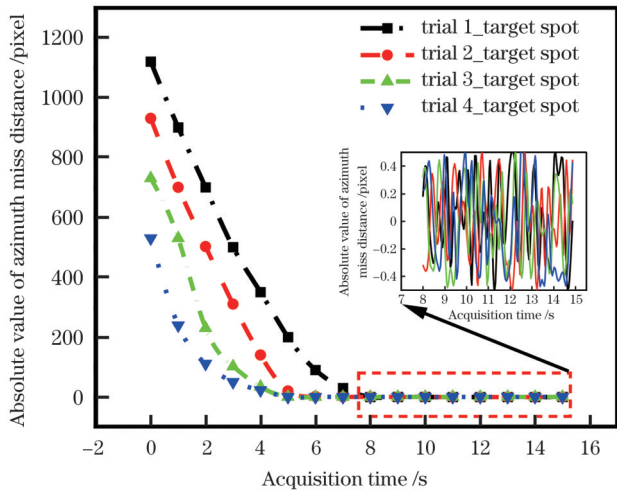


图 10 不同位置光斑的方位脱靶量绝对值随光斑捕获时间变化的曲线
Fig. 10 Absolute value of the azimuth miss distance of the spot at different positions changes with the spot acquisition time

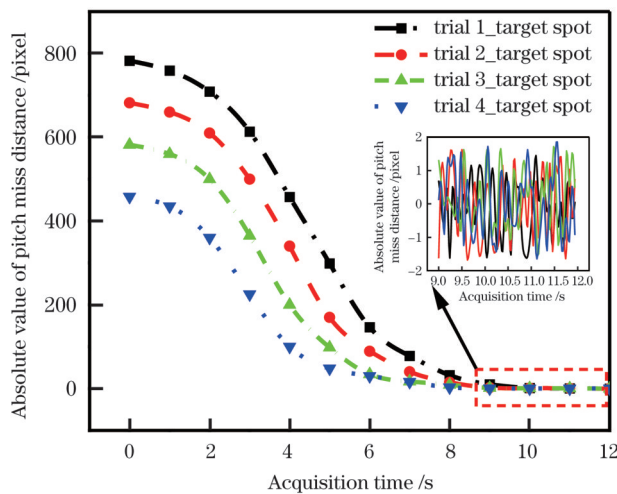


图 11 不同位置光斑的俯仰脱靶量绝对值随光斑捕获时间变化的曲线
Fig. 11 Absolute value of the pitch miss distance of the spot at different positions changes with the spot acquisition time

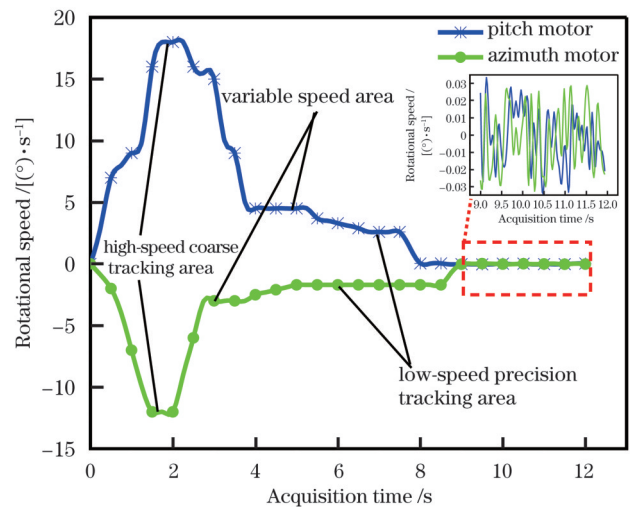


图 12 室内测试方位、俯仰电机转速突变曲线
Fig. 12 Speed mutation curves of azimuth and pitch motors in indoor test

4.3 水下激光光斑捕获跟踪实验

搭建如图 13 所示的水下激光光斑捕获跟踪实验装置, 450 nm 激光源置于另一二维伺服转台上, 光束经 1 m 长水槽后到达伺服控制系统, 之后被 CMOS 相机接收。在水箱中施加扰动模拟湍流等水下环境, 相同起始位置处目标光斑的方位脱靶量绝对值和俯仰脱靶量绝对值在水箱施加扰动前后的变化如图 14 所示。实验结果表明: 施加扰动前, 系统可在 8 s 内捕获目标光斑, 捕获时间较室内测试时有所增加; 施加扰动后, 光斑受水体散射、折射的影响, 处于动态的变化状态, 系统可在 9 s 内完成目标光斑的捕获与跟踪, 捕获时间较施加扰动前增加。数据分析表明, 水箱施加扰动前伺服控制系统的跟踪精度为 0.6 mrad, 施加扰动后跟踪精度为 2 mrad, 误差较室内测试有所增大但满足指标要求。

将光源搭载在另一二维转台上, 当系统对准目标光斑后, 控制转台运动, 模拟实际海洋环境水下节点的运动, 测试系统的跟踪效果。实验结果表明, 系统捕获概率优于 99%, 光斑移动速度在水平方向不超过 18 (°)/s

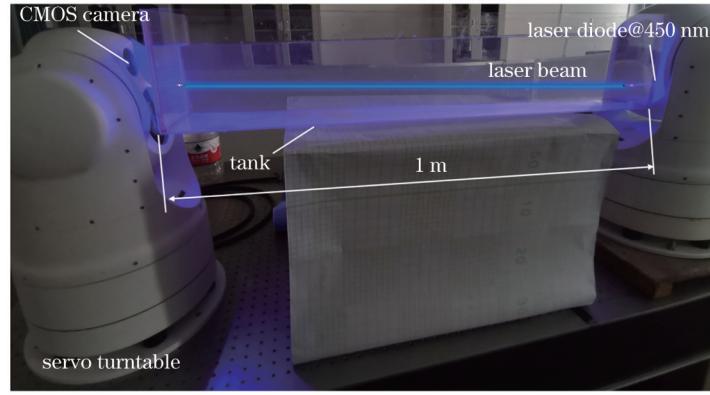


图 13 水下激光光斑捕获跟踪实验装置

Fig. 13 Underwater laser spot acquisition and tracking experimental device

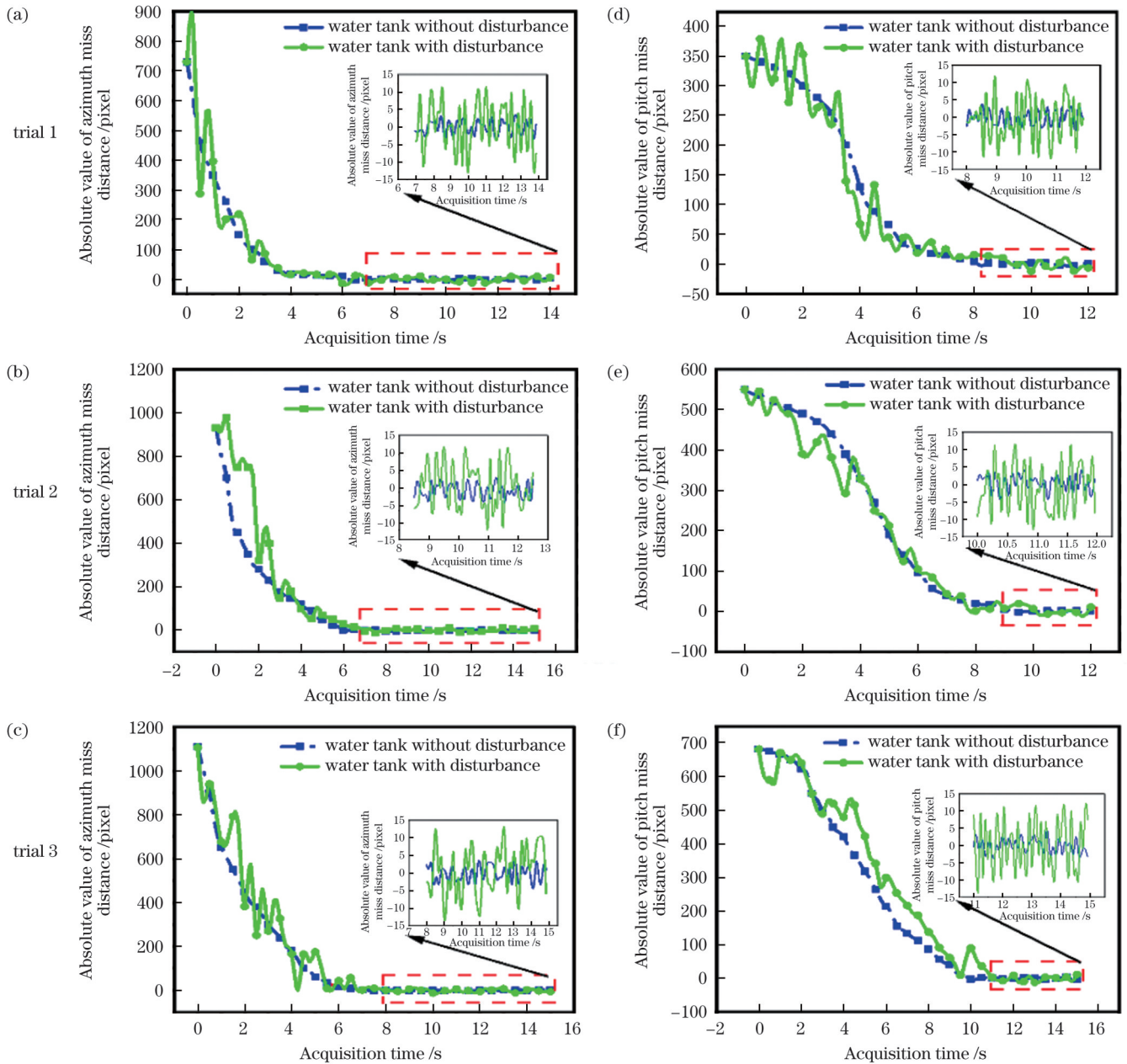


图 14 水箱施加扰动前后目标光斑的方位、俯仰脱靶量变化曲线。(a)~(c)方位脱靶量;(d)~(f)俯仰脱靶量

Fig. 14 Curve of target spot azimuth/pitch miss distance before and after disturbance of water tank. (a)~(c) Azimuth miss distance; (d)~(f) pitch miss distance

且在垂直方向不超过 $12(^{\circ})/s$ 时, 可以通过伺服控制稳定跟踪, 否则跟踪会失败。

5 结 论

本文对水下无线光动态通信中的目标光斑捕获、跟踪伺服控制系统进行了研究。相较于结构复杂精密、体积庞大、价格昂贵的传统 APT 系统, 本设计可满足水下无线光通信系统的轻小型化设计需求。此外, 进行了仿真验证、室内测试以及水下激光光斑捕获跟踪实验, 实验结果证明所设计的伺服控制系统可以满足性能指标要求, 为后续开展水下无线光动态通信技术研究奠定了基础。在下一步的研究中, 笔者拟将通信模块加载到本文伺服控制系统中形成级联, 测试完整的水下无线光动态通信功能, 同时将进行外场测试, 以进一步检验各种动态因素下系统的可靠性和稳定性。

参 考 文 献

- [1] 孟立新. 机载激光通信中捕获与跟踪技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
Meng L X. Research on acquisition and tracking technology in airborne laser communication[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [2] 石佳, 黄爱萍, 陶林伟. 深度学习辅助水下光通信信道估计和信号检测[J]. 中国激光, 2022, 49(17): 1706004.
Shi J, Huang A P, Tao L W. Deep learning aided channel estimation and signal detection for underwater optical communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(17): 1706004.
- [3] 任庭瑞, 于笑楠, 佟首峰, 等. 基于数字信号处理的高灵敏度水下光通信收发机设计与评估[J]. 中国激光, 2022, 49(4): 0406005.
Ren T R, Yu X N, Tong S F, et al. Design and evaluation of high-sensitivity underwater optical communication transceiver based on digital signal processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 0406005.
- [4] 王毅凡, 周密, 宋志慧. 水下无线通信技术发展研究[J]. 通信技术, 2014, 47(6): 589-594.
Wang Y F, Zhou M, Song Z H. Development of underwater wireless communication technology[J]. Communications Technology, 2014, 47(6): 589-594.
- [5] Williams A J, Laycock L L, Griffith M S, et al. Acquisition and tracking for underwater optical communications[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10437: 1043707.
- [6] Huang X, Yang F, Song J. Hybrid LD and LED-based underwater optical communication: state-of-the-art, opportunities, challenges, and trends[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(10): 100002.
- [7] Lin J M, Du Z H, Yu C Y, et al. Machine-vision-based acquisition, pointing, and tracking system for underwater wireless optical communications[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(5): 050604.
- [8] 赵馨, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305005.
Zhao X, Song Y S, Tong S F, et al. Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3): 0305005.
- [9] 郑祖想. 水下无线光通信捕跟瞄(APT)系统的研究与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
Zheng Z X. Research and implementation of underwater wireless optical communication (APT) system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [10] Austin D. Generate stepper-motor speed profiles in real time[J]. Embedded Systems Programming, 2005, 18(1): 28-30, 32-35.
- [11] Siripala P J, Sekercioglu Y A. A generalised solution for generating stepper motor speed profiles in real time[J]. Mechatronics, 2013, 23(5): 541-547.
- [12] Wang B J, Liu Q X, Zhou L, et al. Velocity profile algorithm realization on FPGA for stepper motor controller[C]//2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), August 8-10, 2011, Dengleng. New York: IEEE Press, 2011: 6072-6075.
- [13] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
Han J Q. Auto-disturbances-rejection controller and its applications [J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.
- [14] 张航宁, 李文新, 梁绪. 基于跟踪微分器的步进电机自适应速度曲线设计[J]. 空间控制技术与应用, 2022, 48(2): 88-95.
Zhang H N, Li W X, Liang X. Design of adaptive speed profile of stepper motor based on tracking differentiator[J]. Aerospace Control and Application, 2022, 48(2): 88-95.
- [15] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
Han J Q. From PID technique to active disturbances rejection control technique[J]. Basic Automation, 2002, 9(3): 13-18.
- [16] 邓新禹. 水下激光通信光电跟踪控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
Deng X Y. Research on photoelectric tracking control system of underwater laser communication[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [17] 阮毅, 陈伯时. 电力拖动自动控制系统: 运动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 1-90, 261-272.
Ruan Y, Chen B S. Electric drive automatic control system: motion control system[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 1-90, 261-272.
- [18] 汤佳明, 安伟. 基于 LABVIEW 的上位机串口通信程序设计[J]. 电子设计工程, 2018, 26(11): 86-90.
Tang J M, An W. Design of serial port communication program for host computer based on LABVIEW[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(11): 86-90.

Design of an Acquisition and Tracking System for Underwater Optical Dynamic Communication Based on Servo Control

Liu Xu, Zhong Fangru, Ma Xinning, Zhang Peng*

National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract

Objective Laser acquisition, pointing, and tracking (APT) technology is prevalent in the realm of space optical communication,

servicing platforms such as inter-satellites, satellite-ground, airborne, and ship-borne. By fusing coarse and fine tracking, it is possible to achieve picometer-scale, high-probability, swift, and accurate dynamic space-optical communications. However, the application of APT in underwater wireless optical communication remains underreported. This limited application stems from the APT system's intricate, precise, sizable, and costly nature, which challenges the minimalist design needs of underwater wireless optical communication systems. Additionally, the underwater channel's resistance, pressure, and environmental adaptability factors compromise the servo control system's precision and pose engineering challenges. These challenges curtail the expansion and application of APT technology in underwater wireless optical communication. Thus, harnessing APT technology to enhance the stability and reliability of communication links by capturing and tracking the optical axis emerges as a promising avenue in underwater wireless optical communication's future. Consequently, there's a pressing need to devise a servo control system that's both cost-effective and straightforward, catering specifically to the dynamic underwater wireless optical communication's acquisition and tracking demands.

Methods In this study, we first considered the basic concept of space optical communication acquisition, pointing, and tracking technology. Based on this, we proposed a set of acquisition and tracking systems grounded in servo control for underwater wireless optical dynamic communication. Subsequently, we studied key technologies, including the servo control system architecture, composition model, and motor control algorithm. For the servo control system we proposed, a tracking differentiator was introduced within the active disturbance rejection control algorithm to manage the motor's acceleration and deceleration. Furthermore, we proposed a coarse and precise tracking strategy that utilized motor acceleration and deceleration control technology. Ultimately, we discussed the acquisition time, tracking accuracy, and acquisition probability of the servo control system we proposed, drawing insights from both simulations and actual indoor and underwater experiments.

Results and Discussions In the simulation experiment, the upper computer receives miss distance information and transmits it to the lower computer via the virtual serial port, controlling the motor. The upper computer displays the motor's working state in real-time on the upper computer (Fig. 5) and simulates the spot capture and tracking of underwater wireless optical dynamic communication. When the simulated spot occupies a different position, the motor adaptively accelerates and decelerates, achieving both coarse and precision tracking. The motor operates stably before and after acceleration and deceleration, without missteps (Table 2, Fig. 7). The feasibility of the servo control system and tracking differentiator in executing motor acceleration and deceleration algorithm strategies is confirmed. In the indoor experiment, results indicate that the system captures and tracks the target spot within 4 s at its fastest rate. The azimuth motor's tracking accuracy is 0.08 mrad (Fig. 10) and that of the pitch motor's is 0.27 mrad (Fig. 11), aligning with tracking index requirements. The speed mutation curve for the azimuth and pitch motors during the experiment (Fig. 12) reveals that the motor navigates via high-speed coarse tracking, variable-speed, and then low-speed precision tracking phases. The consistent operation surrounding the variable speed affirms the algorithm's feasibility, suggesting this system's potential for underwater wireless optical dynamic communications. The underwater experiment reveals that the system captures the target spot in 8 s before disturbance, which is more than the acquisition time of the indoor system. Post-disturbance, the spot experiences interference from water body scattering and refraction, showing a dynamic state. The system completes target spot capture and tracking within 10 s, a duration extended from its pre-disturbance counterpart. Data analysis highlights a 0.6 mrad tracking accuracy for the servo control system before introducing disturbance to the water tank and a 2 mrad accuracy post-disturbance (Fig. 14). Additionally, experiments demonstrate a capture probability surpassing 99% for the system. If the spot's moving speed falls below the specified range in both horizontal and vertical directions, then the servo control stabilizes tracking; otherwise, the tracking fails.

Conclusions In this study, we examine an acquisition and tracking servo control system for an underwater wireless optical dynamic communication system. We design a servo control system architecture and explore its constitute and control algorithm. We propose a control algorithm based on a tracking differentiator to achieve motor acceleration and deceleration. Concurrently, we employ motor acceleration and deceleration technology to implement a coarse and precise tracking strategy for the underwater wireless optical dynamic communication optical axis. We conduct simulation verifications, indoor tests, and underwater laser spot acquisition and tracking experiments. The underwater laser spot acquisition and tracking experiment reveals that the system's acquisition probability exceeds 99%, with an acquisition time of less than 10 s. The tracking accuracy, both before and after the water tank disturbance, registers at 0.6 mrad and 2 mrad, respectively. This experiment demonstrates that the designed servo control system aligns with the performance index requirements, setting the stage for further research into underwater wireless optical dynamic communication technology.

Key words oceanic optics; acquisition tracking; tracking differentiator; servo control; tracking accuracy