

基于液晶光学相控阵的空间激光通信 PID 跟踪方法

许剑华¹, 汪相如^{2*}, 黄子强¹, 吴亮³, 张天一¹, 谭庆贵⁴, 吴双红², 邱琪², 谢文⁵

¹电子科技大学电子科学技术研究院, 四川 成都 610054;

²电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054;

³电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054;

⁴空间电子信息技术研究院, 陕西 西安 710000;

⁵东莞市迪文数字技术有限公司, 广东 东莞 523808

摘要 液晶光学相控阵具备非机械光束偏转能力, 将其应用到空间激光通信捕跟系统中, 能够实现快速、灵活、多用户的接入。提出了一种基于液晶光学相控阵的快速跟踪方法, 该方法采用电荷耦合器件(CCD)作为信标光探测器, 比例积分微分(PID)闭环控制算法生成光束指向角控制点数据, 实现对入射光束的捷变偏转, 指向捕跟探测器中心, 达到跟踪的目的。通过理论仿真可知 PID 闭环控制系统能够抑制高斯白噪声, 跟踪精度小于 $6.5 \mu\text{rad}$ 。实验验证, 经过 10 ms 左右的调整, 系统进入稳定跟踪状态, 跟踪精度小于 $12.6 \mu\text{rad}$ 。

关键词 测量; 空间激光通信; 捕获; 跟踪; 液晶光学相控阵; 比例积分微分控制

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.021202

PID Tracking Method of Space Laser Communication Based on Liquid Crystal Optical Phased Array

Xu Jianhua¹, Wang Xiangru², Huang Ziqiang¹, Wu Liang³, Zhang Tianyi¹,
Tan Qinggui⁴, Wu Shuanghong², Qiu Qi², Xie Wen⁵

¹ *Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;*

² *School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;*

³ *School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;*

⁴ *CAST-Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an, Shaanxi 710000, China;*

⁵ *Dongguan Devine Digital Technology Co., Ltd. Dongguan, Guangdong 523808, China*

Abstract The liquid crystal optical phased array, which has the ability of deflecting non-mechanical beam, can be applied to space laser communications acquisition-tracking system to realize fast, flexible, and multiple-user access. A fast-tracking method based on liquid crystal optical phased array is presented, and the method uses charge coupled device (CCD) as a beacon light detector. Proportional integral differentiation (PID) closed-loop control algorithm is used to generate beam angle of direction control point data. Agile deflection of the incident light beam can be achieved, which points to the center of the acquisition-tracking detector, thus the purpose of tracking is achieved. The theoretical simulation shows that PID closed-loop control system can suppress Gaussian white noise and the

收稿日期: 2016-07-21; 收到修改稿日期: 2016-09-06

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(61405029)、国家自然科学基金重大研究计划(91438108)、国防重点实验室基金、上海航天科技创新基金(SAST2015087)、广东省公益研究与能力建设专项(2015A010104001)

作者简介: 许剑华(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事液晶相控阵、图像处理方面的研究。E-mail: jhxu_org@163.com

导师简介: 黄子强(1956—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事液晶及光电子等方面的研究。E-mail: zqhuang@uestc.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: xiangruwang@uestc.edu.cn

tracking accuracy is less than $6.5 \mu\text{rad}$. Experimental results show that after around 10 ms adjustment, the system enters the state of steady tracking, and the tracking accuracy is less than $12.6 \mu\text{rad}$.

Key words measurement; space laser communications; acquisition; track; liquid crystal optical phased array; proportion integration differentiation control

OCIS codes 120.6085; 280.3420; 060.4510; 040.1520

1 引言

在空间激光通信系统中,传统机械式捕获、跟踪和瞄准(ATP)系统体积庞大、重量大、功耗大。非机械式光束偏转方案是当前的研究热点,实现途径包括:电光相控、声光衍射和微机电系统等^[1-4]。其中电光相控方案中,实现电控光学移相的方法包含:一阶非线性、二阶非线性、半导体载流子注入、液晶分子转动极化等。前三者响应时间为纳秒量级,但驱动电压达到近千伏,同时,目前光束发散角一般为毫弧度量级,不利于远距离空间通信传输^[5-7];声光偏转的响应时间是微秒量级,光束偏转范围较大,但是扫描角分辨率较低^[5];采用液晶材料实现的光学相控光束项目技术具备工作电压低、随机可编程、百万级像素、偏转精度高等优点,由于回程区、电极间距等因素对效率有较大的影响,近几年来对液晶光学相控阵(LCOPA)的效率和控制方式有较多的研究进展^[8-10]。

由于机械式的空间激光通信系统研究起步较早,国内外对机械式的 ATP 已经有成熟的技术方案^[11]。基于液晶光学相控阵的空间激光通信是当前非机械式 ATP 技术研究的一个主要热点,其相关技术还不够成熟,基于此的 ATP 技术目前尚未有成熟的方案发表。在闭环跟踪阶段,液晶相控阵的捷变特性促使系统传递函数相比传统机械转台,有更好的频率响应特性,不存在阻尼振荡。比例积分微分(PID)控制是一种线性控制系统,其中 P 代表比例控制器, I 代表积分控制器, D 代表微分控制器,它不需要精确的控制系统数学模型,有较强的灵活性和适应性,而且 PID 控制器的结构典型,程序设计简单,实现容易,参数调整方便。本文基于自主研制的液晶光学相控阵器件,结合图像处理技术和 PID 控制算法,建立闭环控制模型,将通过光斑与电荷耦合器件(CCD)中心的像素差值作为到达角的评价指标,通过理论仿真, PID 闭环控制系统能够抑制空气扰动和 CCD 采样引入的高斯白噪声,同时能够在不影响精度的前提下快速地收敛。经过实验验证,收敛次数在 10 次左右,稳定时间为 10 ms 左右,跟踪精度达到 $12.6051 \mu\text{rad}$ 。

2 系统组成与相控阵原理

2.1 系统组成

空间激光通信系统模型包含了两个终端,终端 A 和终端 B,如图 1 所示。简单起见,假设终端 A 完成激光发射功能,终端 B 完成相控阵 PID 跟踪理论的验证。

终端 A 包含激光器、偏振分光棱镜(PBS)、液晶光学相控阵及其波束控制器。终端 B 包含液晶光学相控阵、透镜、CCD、数据处理单元(MCU)。其中,液晶光学相控阵用于角度的偏转,同时液晶光学相控阵是偏

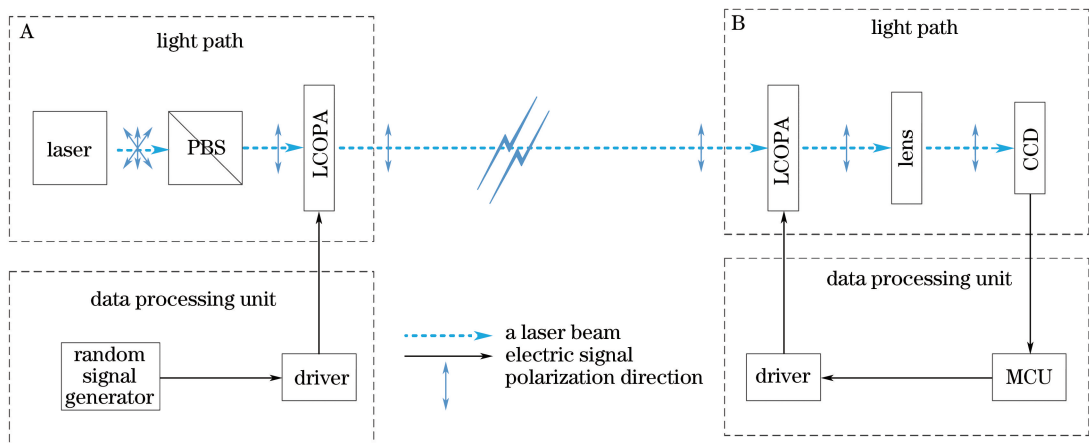


图 1 基于液晶光学相控阵的跟踪系统框图

Fig. 1 Block diagram of tracking system based on LCOPA

振敏感型器件,所以需要通过 PBS 产生偏振光。采用的 CCD 是 720 pixel 的工业摄像机,傅里叶透镜焦距为 500 mm。数据处理单元对 CCD 进行图像数据采集及处理,同时生成波控数据加载到液晶光学相控阵。

对于终端 A 来说,激光器的输出光束经过 PBS,得到 P 偏振方向的光束,光束垂直进入液晶相控阵,并且液晶光学相控阵的光轴方向和入射光偏振方向一致,因此偏振光的传输方向发生角度偏转,其中偏转角度由液晶光学相控阵的波控数据来决定。

对于终端 B 来说,来自终端 A 的激光光束经过液晶光学相控阵,由于液晶光学相控阵的光轴方向和入射光偏振方向一致,因此偏振光的传输方向发生角度偏转,其中偏转角度由 B 中液晶光学相控阵决定,光束进入透镜并到达焦平面处的 CCD 探测器,转换成电信号并传给数据和信号处理模块。

终端 B 的工作流程:

- 1) 采集信标光,获取主瓣光斑的质心;
- 2) 通过将质心坐标与 CCD 中心的差值带入到 PID 闭环控制算法中进行迭代计算,生成要控制的角度值;
- 3) 将生成的控制角度值发送到液晶光学相控阵;
- 4) 重复上述的步骤。

2.2 液晶光学相控波束偏转

液晶光学相控阵核心模块示意图如图 2 所示。液晶材料是器件对入射激光实现移相的工作介质,填充在上下两个石英基板之间,同时上基板靠近液晶层由阵列透明电极组成,电极宽度为 a ,间隔为 b ;阵列电极的每一个电极均和对应的驱动芯片输出相连,实现驱动电压的加载;器件下基板是由整片透明电极组成,是液晶移相器件的公共电极。通过阵列电极所加载的驱动信号和 COM 信号,在液晶层内构成光束的移相器阵列。

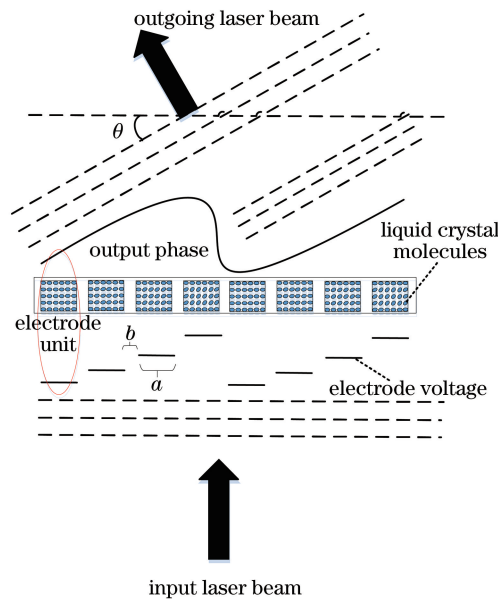


图 2 液晶光学相控阵工作原理示意图

Fig. 2 Working principle diagram of LCOPA

当给予阵列电极加载恰当的电压信号,经过相控阵输出的光束将发生一定角度的偏转,其中控制偏转角度 θ_s 是由波控算法来决定,典型的技术波控算法有 2 种^[12]:周期性闪耀光栅和非周期性闪耀光栅。由于周期性闪耀光栅方案无法实现连续步进位的切换,不适合用于跟踪环路应用中,采用非周期性闪耀光栅算法作为核心波控方法。

根据非周期光栅法^[12],第 i 根电极所对应的相位调制量 ϕ_i 为

$$\phi_i = f_{\text{rem}}(i \cdot k_0 d \sin \theta_s, 2\pi), \quad (1)$$

式中 θ_s 为波束控制偏转角度, k_0 为入射激光的真空波数, d 为光栅电极周期 ($d = a + b$), $f_{\text{rem}}(x, 2\pi)$ 表示 x 对 2π 取余操作。根据计算得到的相位 ϕ_i ,通过查找液晶器件的相位延迟量随电压的变化曲线就能得到相应电极要加载的电压 V_i ,如图 3^[13]所示。

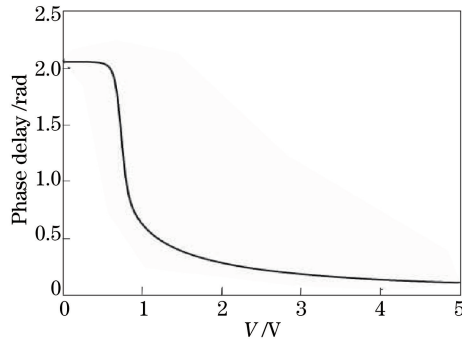


图3 相位延迟量随电压的变化曲线

Fig. 3 Curve of relation between phase delay amount and voltage

假定终端 B 的光学系统中各元器件已经经过系统矫正,所有光轴保持共轴。从终端 A 发射的光束经过远距离传输后,入射到终端 B 的相控阵天线,如图 4 所示。入射光束与系统光轴的夹角,即到达角为 α ,假设相控阵当前波束控制角度为 θ_s ,通过相控阵后,光束发生偏转,以一定角度 β 入射到傅里叶透镜上。当光束到达角 α 较小时,满足

$$\alpha = \theta_s + \beta. \quad (2)$$

入射光束经过焦距为 f 的傅里叶透镜的空间频谱变换作用,在放置于焦平面上的 CCD 靶面上产生光斑,其中光斑中心位置为 x_c ,系统光轴中心为 x_0 ,因此,根据质心算法可得

$$\beta = \frac{x_c - x_0}{f}. \quad (3)$$

当终端 B 处于等待终端 A 的接入时,即 B 处于凝视 A 的状态时候,光学相控阵施加的偏转角度 θ_s 为 0,入射光经过透镜后,其主瓣光斑未必处于 CCD 视场的正中心,通过其中心位置 x_c 和系统光轴中心为 x_0 ,通过(2)~(3)式能够计算得到光束到达角 α 。

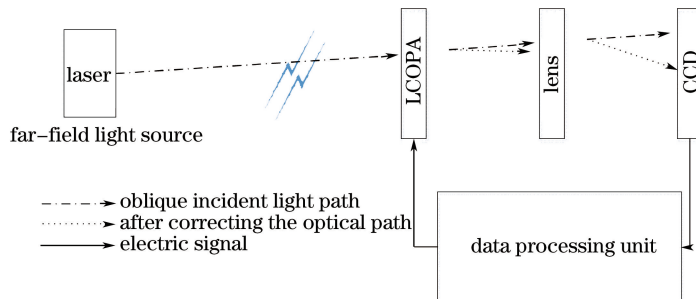


图4 液晶光学相控阵波束偏转系统

Fig. 4 Beam deflection system of LCOPA

随后将液晶光学相控阵的控制角 θ_s 加载为对应的 α 角,即 $\theta_s = \alpha$,此时入射光路得到如图 2 所示的光路校正,根据(2)式,则得到入射角度 $\beta = 0$,即校正后的光路垂直于透镜,主瓣光斑落在 CCD 视场的中心。

但是,在实际通信链路建立和保持过程中,由于光束到达角 α 受到终端 A 的公转、终端 B 本身的自转等影响,终端 A 和终端 B 之间处于相互运动状态。采用基于 PID 控制理论的跟踪方法能够实现系统对目标的动态稳定的跟踪,其中,积分项 I 能够分别累积跟踪误差,提高跟踪精度,微分项 D 能够进行趋势预测防止过调和欠调。

3 跟踪控制回路和 PID 跟踪算法

3.1 闭环控制系统中栅瓣的处理

由于液晶光学相控阵的效率问题,在远场的 CCD 中采集到的光斑并不止一个,会存在多个栅瓣,同时每个栅瓣边上会有相应的旁瓣,但是由于旁瓣的能量都比较弱,容易处理,故不考虑。图 5 为远场的光斑分布图(删除了旁瓣),从图中可以看出,存在多个光斑且能量都比较大,但是可以保证的是主瓣光斑的能量最高。

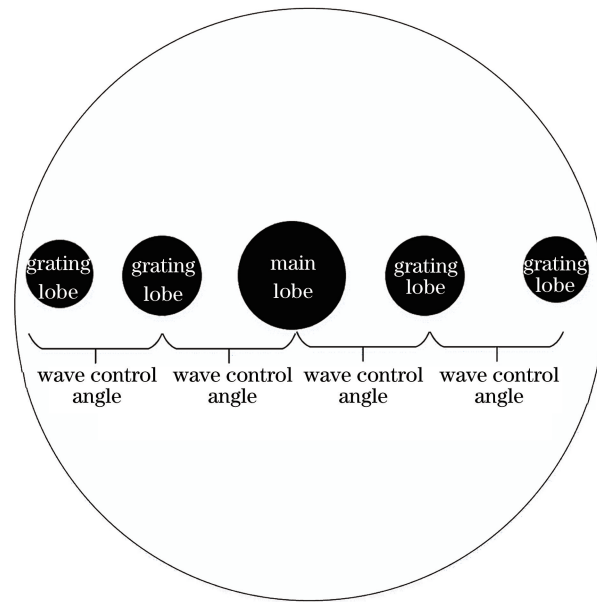


图 5 远场衍射光斑图

Fig. 5 Sketch of far-field diffraction pattern

通过提取每个光斑,然后计算每个光斑的能量,将能量最大的光斑作为主瓣光斑。

3.2 跟踪控制回路

跟踪回路是捕跟系统中的核心部分,通过跟踪回路的高频抑制能力,能够将以随机角度入射到终端 B 的光束校正为垂直入射到跟踪传感器上。相比传统机械式跟踪回路,本系统存在两个重要特点:

- 1) 系统的控制单元是液晶相控阵,其具备立即响应能力(捷变特性),等效于一个比例元件,其传递函数为常数;
- 2) 系统的输入信号 $\beta(t)$ 是经过相控阵之后的光束相对于 CCD 光轴的角度信息 β ,而不是终端 B 的光束到达角。

因此,系统的控制回路框图如图 6 所示,控制环路的输入信号是入射到 CCD 的角度 β ,通过对比上一时刻反馈的入射角度 $O_{ut}(t)$,经过 CCD 对其角度信息的采集,得到了期望控制的光束方向与实际方向的角度差值。

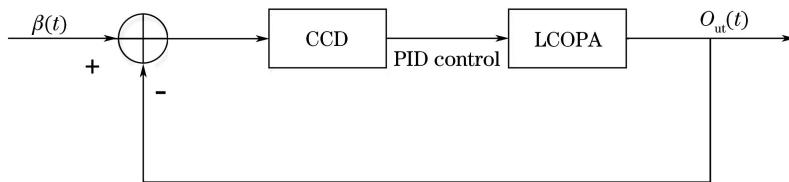


图 6 控制回路框图

Fig. 6 Block diagram of control loop

在控制系统中液晶光学相控阵等效于一个比例元件,且其传递函数为常数 $G_{lcopa} = k_{lcopa} = 1$, CCD 可看作一个放大和延迟环节,延迟是由图像建立时间、图像传递和图像处理的时间累积而成,系统中帧率为 1000 frame/s,故其传递函数可以表示为

$$G(s)_{ccd} = k_{ccd} \cdot \exp(-0.001s) \approx \frac{0.32}{0.001s + 1} \quad (4)$$

于是系统总的传递函数为

$$G_{ft} = \frac{G_{lcopa}(s)G_{ccd}(s)}{1 + G_{lcopa}(s)G_{ccd}(s)} = \frac{1}{0.001s + 1.32} \quad (5)$$

3.3 PID 跟踪算法

PID 算法^[14]是控制理论的重要算法之一,控制液晶相控阵的偏转角度,能够实现对 A 终端发射的光束进行动态稳定地跟踪。图 7 为 PID 的基本结构图。

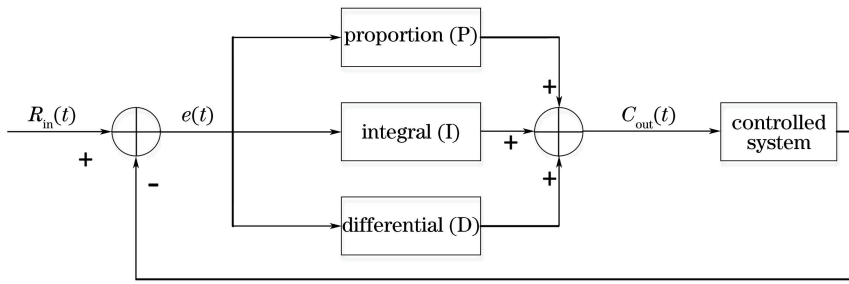


图 7 PID 系统结构图

Fig. 7 Structure chart of PID system

图 7 中, $R_{in}(t)$ 是系统期望控制的角度, $e(t)$ 是实际控制的角度与期望控制角度的差值, 通过求和作用, 得到控制量(控制的角度) $C_{out}(t)$, 将其作为控制单元液晶光学相控阵的控制角度数据, 入射光束在 CCD 上产生新的光斑, 从而计算出对应的角度 β ; 将其反馈给系统 $R_{in}(t)$ 。

系统将 CCD 获取的入射激光在整个靶面采集的主瓣光斑与 CCD 中心的像素差值作为 PID 的评价参数, 液晶光学相控阵作为被控制系统。系统中液晶光学相控阵的 PID 算法的计算公式为

$$e(t) = r - 640, \quad (6)$$

$$C_{out}(t) = P \cdot e(t) + I \cdot \sum_{t=0}^{\infty} e(t) + D \cdot \sum_{k=1}^{\infty} [e(k) - e(k-1)], \quad (7)$$

式中 x 为 CCD 采集到的主瓣光斑在 CCD 中的横向像素坐标, 640 为系统采用的 CCD 中心横向坐标。 $C_{out}(t)$ 为输出到液晶光学相控阵系统中的控制角度, P、I、D 分别为与系统相关的比例、积分、微分参数。

通过将主瓣光斑与 CCD 中心的像素差值作为到达角的评价指标, 可以省去计算到达角的过程。这样既减少了系统的计算量, 又提高了系统的稳定性, 排除了额外的噪声误差。

闭环捕跟系统的整体流程为:

- 1) 在液晶光学相控阵未加波控数据时, 对 e 光无偏转;
- 2) 此时光线经过透镜, 经透镜聚焦后, 入射到 CCD 上;
- 3) 对 CCD 上采集的图像进行处理, 通过计算光斑的质心与 CCD 中心的像素差值 $e(t)$, 经过 PID 算法计算得到 $C_{out}(t)$, 将 $C_{out}(t)$ 的值发送给液晶光学相控阵控制系统(见图 7 液晶光学相控阵波束偏转系统);
- 4) 系统会在 3) 中持续执行直到主瓣光斑处于 CCD 中心时, 系统便进入动态稳定跟踪状态。

3.4 数值模拟

通过模拟到达角的变化, 可以对系统的跟踪性能进行仿真验证, 得到对 PID 闭环系统的性能评估。闭环系统的阶跃响应如图 8 所示。

从图 8 中可知, 系统的阶跃响应的超调量为 19%, 峰值时间小于一个采样周期, 调节时间约为 12 个采

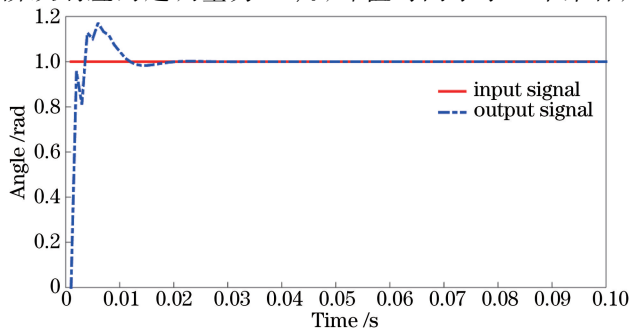


图 8 闭环系统阶跃响应

Fig. 8 Step response of closed loop system

样周期。图 9 中为显示方便将采样率降为 100。如图 9 所示,其等效的输入为 1 Hz 的正弦波,信号幅值为 $2000 \mu\text{rad}$ 。图 10 为 PID 的跟踪误差,从上述两幅图中可以看出,系统的延时非常小且系统的跟踪峰值误差在 $6.539 \mu\text{rad}$ 以内,其精度已经高于液晶光学相控阵的精度。

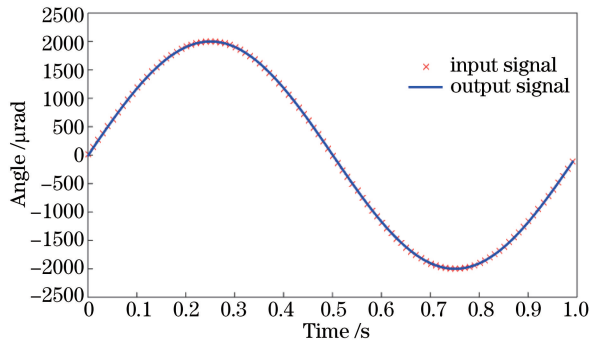


图 9 PID 的系统输出及原始信号

Fig. 9 PID system output and the original signal

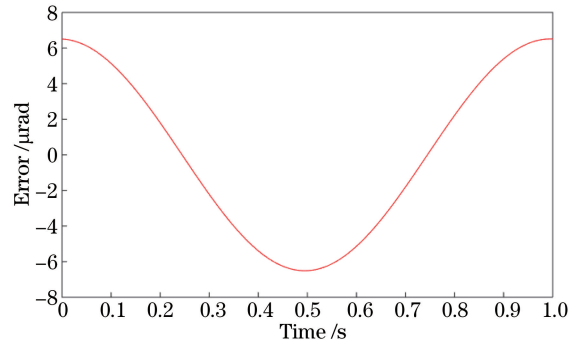


图 10 控制的误差信号

Fig. 10 Controlled error signal

在液晶光学相控阵的捕获跟踪系统中,由于不存在机械器件,其主要的噪声来源为空气扰动和 CCD 的采样噪声和采样量化噪声,而这样的噪声可以当作白噪声进行处理。通过将图 9 中的输入信号加入均值为 0,方差为 $100 \mu\text{rad}$ 的白噪声作为系统的输入,得到 PID 系统的跟踪误差如图 10 所示。对比图 11 与图 10 可以看出,大部分的噪声都被抑制了,噪声以跟踪误差的形式被过滤了,经过计算可知最高的抑制比可以达到 93%。

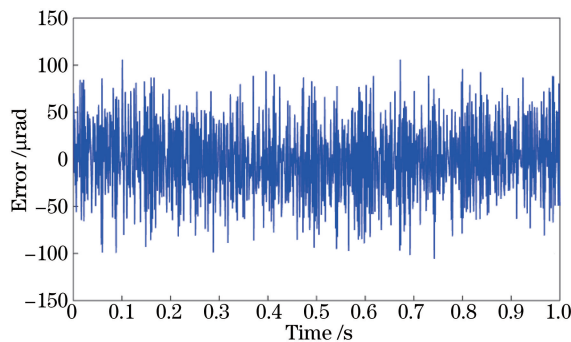


图 11 带噪声及不带噪声输入的误差曲线

Fig. 11 Error curve with and without noise input

4 实 验

本实验基于 1064 nm 波长的 YAG 固体激光器,一维液晶光学相控阵的电极数量为 1920,液晶光学相控阵的偏转步进为 $10 \mu\text{rad}$,响应时间为 1 ms 以内,透镜的口径为 50 mm ,焦距为 500 mm 。实验采集了 10 组实验数据进行了系统性能分析,实验数据只包含 X 轴方向的跟踪数据,如表 1 所示(为 5 次采集的平均结果)。

选用 4 组离 CCD 中心较远或者较近的实验数据进行收敛速度的分析(圆圈代表迭代后的结果位置,红线为 CCD 的中心,横向像素坐标 640),数据分析结果如图 10 所示。

从表 1 和图 12 可以看出,整个系统相对稳定,每次都可以在 10 次左右的调整次数范围内将系统的跟踪稳定下来,从响应时间上来看,捕获跟踪的时间在 10 ms 左右。图 13 和图 14 为第 9 次实验中调整前和捕获跟踪调整后 CCD 采集的光斑图。

表 1 实验数据
Table 1 Experimental data

Times	Original coordinates	Adjust times	Angle of each adjustment / μrad
1	861	9	-111.71875, -271.09375, -316.25, -304.6875, -282.8125, -275, -271.875, -271.875, -275
2	1258	10	-453.1, -835.9, -1005.4, -1029.6, -1000, -975, -962.5, -961.7, -964.1, -965.6
3	1044	10	-254.6, -739, -650, -675, -657.8, -639, -630.3, -628.5, -629.6, -631.2
4	341	10	200.384.3, 478.9, 497.6, 485.4, 470.1, 467.1, 464.2, 465.6, 467.1
5	229	12	270.3, 591.4, 675, 678.1, 660.9, 645.3, 639.8, 641, 640.625, 640.4, 643.7, 642.1
6	1042	10	-242.9, -510.7, -1207.5, -670.7, -655.1, -636.7, -627.8, -625.1, -627.1, -628.1
7	1092	11	-219.3, -536.5, -713.2, -756.2, -739, -717.5, -706.2, -703.1, -704.8, -705.4, -706.2
8	146	10	212.5, 567.1, 769, 821.8, 808.5, 721.8, 739.0, 760.6, 771.8, 775
9	337	12	278.1, 446, 507.8, 504.6, 485.9, 474.2, 472.6, 471.0, 471.8, 474.2, 472.6, 473.4
10	1269	11	-517.9, -886.7, -938.2, -1041.2, -1017.9, -995.3, -984.3, -981.2, -981.2, -981.2, -640

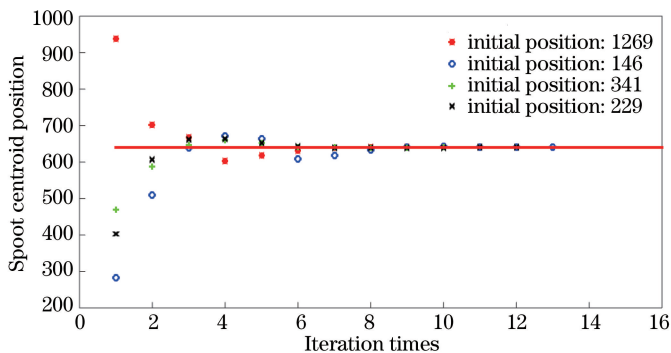


图 12 4 组实验数据收敛图

Fig. 12 Convergence graph of four groups of experimental data

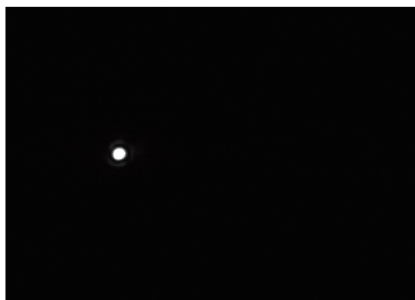


图 13 初始坐标(337,360)时的光斑

Fig. 13 Initial position of beam spot at (337, 360)

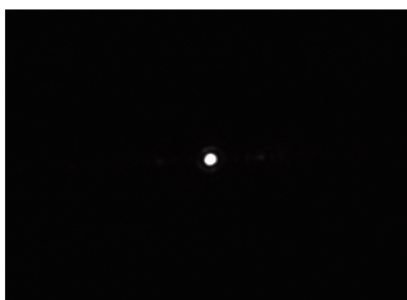


图 14 捕跟系统调整后的光斑坐标为(640,360)

Fig. 14 Beam spot position at (640, 360) after adjustment by acquisition and tracking system

5 结 论

对基于液晶光学相控阵的快速跟踪方法进行了理论仿真及实验验证,得益于液晶光学相控阵的捷变特性,闭环控制系统结构的传递函数为一个一阶函数,不容易引起自激震荡。从理论仿真和实验结果中可以看出,采用PID闭环算法,可以高精度、快速、稳定地对信标光进行捕获跟踪,同时对空气扰动和CCD采样引入的高斯白噪声也有很强的抑制。在验证实验中,10 ms左右就可以使系统稳定,同时跟踪精度小于12.6 μrad 。

参 考 文 献

- [1] Cochran R W, Vassar R H. Fast-steering mirrors in optical control systems[C]. SPIE, 1990, 1303: 245-251.
- [2] Mcmanamon P F, Bos P J, Escuti M J, *et al.* A review of phased array steering for narrow-band electro optical systems [C]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(6): 1078-1096.
- [3] McManamon P. An overview of optical phased array technology and status[C]. SPIE, 2005, 5947: 594701.
- [4] Aoki K, Kuroda H, Yashima S, *et al.* Wide and fine pointing mechanism with flexible supports for optical intersatellite communications[C]. SPIE, 1999, 3615: 222-229.
- [5] Wen Tao, Wei Jibo, Ma Dongtang, *et al.* A novel method of increase acousto-optic deflector spatial resolution[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(12): 1631-1635.
温涛, 魏急波, 马东堂, 等. 提高声光偏转器空间分辨率的方法研究[J]. 中国激光, 2005, 32(12): 1631-1635.
- [6] Ninomiya Y. Ultrahigh resolving electrooptic prism array light deflectors[J]. IEEE J Quantum Elect, 1973, 9(8): 791-795.
- [7] Nikulin V V, Bouzoubaa M, Skormin V A, *et al.* Modeling of an acousto-optic laser beam steering system intended for satellite communication[J]. Opt Eng, 2001, 40(10): 2208-2214.
- [8] Zhao Xiangjie, Liu Cangli, Zhang Dayong, *et al.* Optimized analysis of diffraction efficiency for liquid crystal optical phased array[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1123002.
赵祥杰, 刘仓理, 张大勇, 等. 液晶相控阵衍射效率的优化分析[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1123002.
- [9] Zou Yongchao, Zhou Pu, Si Lei, *et al.* Theoretical study on beam steering efficiency of liquid crystal optical phased array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(6): 061402.
邹永超, 周朴, 司磊, 等. 液晶光学相控阵光束偏转效率研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(6): 061402.
- [10] Yan Aimin, Zhi Yanan, Sun Jianfeng, *et al.* Recent development of optical phased array scanning technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 102801.
闫爱民, 职亚楠, 孙建锋, 等. 光学相控阵扫描技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 102801.
- [11] McManamon P F, Dorschner T A, Corkum D L, *et al.* Optical phased array technology[J]. P IEEE, 1996, 84(2): 268-298.
- [12] Kong Lingjiang, Zhu Ying, Song Yan, *et al.* A beam steering approach of liquid crystal phased array based on nonperiodic blazed grating[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0123001.
孔令讲, 朱颖, 宋艳, 等. 基于非周期闪耀光栅的液晶相控阵波控方法研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0123001.
- [13] Mou Fangdi, Li Jun, Huang Ziqiang. Molecule directors two-dimensional distribution simulation and characteristics research of liquid-crystal blazed grating[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2013, 28(1): 76-81.
牟芳氏, 李君, 黄子强. 液晶闪耀光栅中的指向矢二维分布与特性研究[J]. 液晶与显示, 2013, 28(1): 76-81.
- [14] Franklin G F, Powell J D, Workman M L. Digital control of dynamic systems[M]. Menlo Park: Addison-wesley, 1998.