

文章编号:1007-2780(2018)10-0857-07

基于液晶相控阵的光束偏转控制方法研究

王春阳¹, 李兰婷², 史红伟^{3*}, 牛启凤⁴

(长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:液晶相控阵作为一种新型的可编程相位调制器件,可实现小角度范围内的光束偏转。但由于液晶相控阵制作工艺难度大、且受温度及大气扰动等影响,使得光束偏转系统实际偏转角与预期偏转角之间存在一定误差。为了提高液晶相控阵光束偏转精度,本文提出了一种基于分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器的光束偏转闭环控制回路。CCD 作为探测元件,接收待测物体漫反射回来的光。采用斜射式三角测量法,计算预期偏转角与实际偏转角的偏转误差。将误差信号输入到分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器,控制器生成控制信号传给被控对象液晶相控阵,最终实现光束精确偏转。经仿真实验和性能分析,系统阶跃响应测试经过 2 步迭代达到稳定输出状态,闭环带宽为 7.67 rad/s,对幅值为 1、频率为 1 的正弦扰动信号系统抑制比为 -18.06 dB。验证了分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制算法能够快速地抑制扰动和噪声,且扰动抑制效果好,稳定性高。

关键词:液晶相控阵;光束偏转;分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制

中图分类号: TN209 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183310.0857

Beam deflection control method based on liquid crystal phased array

WANG Chun-yang¹, LI Lan-ting², SHI Hong-wei^{3*}, NIU Qi-feng⁴

(School of Electronic and Information Engineering,
Changchun University of science and technology, Changchun 130022, China)

Abstract: As a novel programmable phase modulation device, the liquid crystal phased array can realize beam deflection in a small angle range. However, due to the influence of manufacturing process, temperature and atmospheric disturbances, there is a certain error between the actual and the expected deflection angle of the beam deflection system. In order to make beam deflection more accurate, this paper proposes a closed-loop control loop for beam deflection based on fractional-order-controller. As the detection element, CCD receives the light diffusely reflected from measured object, adopting oblique triangulation to calculate the deflection error between the expected and the actual deflection angle. Then the error signal is transmitted to controller, the generated control signal will be sent to the controlled object-liquid crystal phased array, to achieve accurate beam deflection. Through simulation experiments and performance analysis, the system step response test reach a steady output state after two iterations. The closed-loop bandwidth is 7.67 rad/s, the suppression ratio of the

收稿日期:2018-05-17;修订日期:2018-07-05.

基金项目:国防基础科研计划项目(No.JCKY-2016411C006)

Supported by National Defense Basic Scientific Research Project(No.JCKY-2016411C006)

* 通信联系人, E-mail: qitiand@qq.com

sinusoidal disturbance signal system with amplitude 1 and frequency 1 is -18.06 dB. It is verified that the fractional-order-control algorithm can quickly suppress the disturbance and noise, furtherly, the disturbance suppression effect is good and the stability is high.

Key words: liquid crystal phased array; beam deflection; fractional-order-controller; control

1 引言

液晶相控阵是一种高分辨率、高精度、可编程控制的新型非机械光束偏转控制器件,其实现光束控制的思想源于微波相控阵雷达^[1]。通过对液晶相控阵各阵元施加不同的电压,使每个阵元产生不同的相位延迟,进而改变入射光波的波前相位,经过波束合成后改变入射光波的传播方向。与传统机械光束控制技术相比,液晶相控阵具有体积小、重量轻、精度高、速度快、功耗低、无机械惯量等优点,因此在激光雷达、激光通信、光信息处理、自适应光学、生物医学成像等领域具有广泛的应用前景^[2-3]。

基于液晶相控阵的光束偏转可实现一定范围内的小角度偏转,但由于液晶相控阵制造工艺难度大,导致液晶盒厚度不均匀,液晶电极宽度与理想值存在偏差;且电极受温度影响,产生热胀冷缩的现象,电极宽度随之变化,使实际偏转角与预期偏转角存在误差。为了使光束偏转更加精确,采用 CCD 等反馈元件构成闭环控制系统。基于经典 PID 闭环控制算法的闭环控制系统稳定性好,但系统跟踪带宽很低。为了减少迭代次数和单步迭代时间以提高系统跟踪带宽,本文提出了一种基于分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制的光束偏转闭环控制回路。分数 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 阶控制器是传统整数化 PID 控制器的广义化形式,相比于整数化 PID 控制器,分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器在系统灵活性、鲁棒性以及总体控制性能等方面有很大提升^[4]。经过仿真验证,分数阶闭环控制系统能够快速稳定地抑制扰动和噪声,实现光束偏转角度精确控制。

2 系统组成及原理

2.1 系统组成

基于液晶相控阵的光束偏转系统组成如图 1 所示,包括激光器、1/4 波片、偏振片、液晶相控阵、CCD 和 PC 端。激光器发出的线偏光经过 1/4

波片形成圆偏光^[5],圆偏光经过偏振片产生与液晶相控阵的光轴方向相同的线偏光,再经过液晶相控阵实现光束偏转,通过对液晶相控阵施加不同的电压从而实现不同角度偏转。CCD 作为信息接收模块,接收待测物体漫反射回来的光,经过数据采集,将光斑位置与 CCD 中心的差值进行处理,应用激光三角测距原理计算得到实际光束偏转角度。

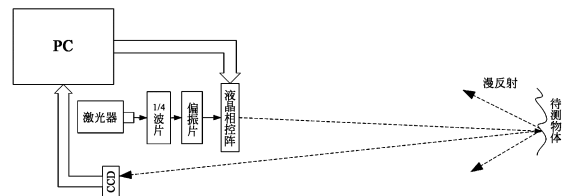


图 1 光束偏转系统结构图

Fig.1 Structure of Beam deflection system

2.2 光束偏转原理

液晶相控阵光束偏转是基于闪耀光栅模型实现的,闪耀光栅模型如图 2 所示,其刻槽面与光栅面不平行,两者之间有一夹角称为闪耀角。从而使单个刻槽面(相当于单缝)衍射的中央极大和诸槽面间(缝间)干涉零级主极大分开,将光能量从干涉零级主极大,即零级光谱,转移并集中到某一级光谱上去,实现该级光谱的闪耀^[6]。图中, i 为光束入射角, a 为槽面宽度, d 为光栅常数。

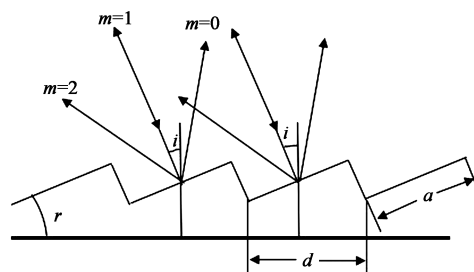


图 2 闪耀光栅

Fig.2 Shining grating

液晶相控阵主要由电极与液晶盒组成。单个液晶盒由透明的导电电极和夹在液晶电极间的液晶材料组成,单个液晶盒就是一个液晶相控单元,

每个液晶盒电极电压独立可控。当入射光通过液晶时,入射光在液晶会产生双折射效应。根据液晶的各向异性,e光折射率为

$$n_e(\theta_z) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}}, \quad (1)$$

其中, θ_z 为液晶指向矢的倾角, n_o, n_e 分别为液晶中寻常光和非寻常光的折射率。通过控制加载到各个电极上的相控电压,来调节液晶分子的双折射率^[7]。入射光透过不同双折射率的液晶会产生不同的相位延迟,从而控制相邻电极出射光束之间的相位差,使出射光在设定方向上产生彼此加强的干涉,从而在该方向上得到高强度的光束能量,实现光束偏转^[8]。

图3为液晶相控阵原理图,由液晶相控阵原理可知,光束偏转角公式为

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\phi \cdot \lambda}{2\pi d}\right), \quad (2)$$

其中: ϕ 表示相邻电极之间的相位差, d 表示单个电极宽度,电极宽度一定时,通过改变相邻电极之间的相位差,即可实现光束偏转。然而现实中 d 和 ϕ 受到各种因素的影响而偏离理想值,使偏转角度 ϕ 产生误差。

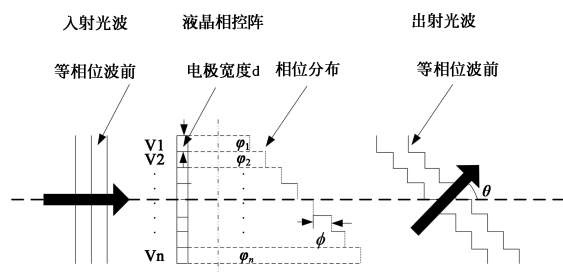


图3 液晶相控阵原理图

Fig.3 Principle of liquid crystal phased array

2.3 偏转角度测量方法

由于受到大气扰动和液晶相控阵器件本身的影响,实际光束偏转角度与预期偏转角之间存在误差,因此采用激光三角法计算实际光束偏转角度^[9]。CCD将采集到的数据传给PC控制器进行处理,得到光束偏转误差,通过分数阶控制算法控制光束偏转更加精准。

三角测量法基本原理如下,激光以一定的角度照射到待测物体上,在物体表面发生漫反射,在接收端用成像系统对激光漫反射回来的光进行汇聚成像,便于光斑位置信息采集。本文采用凸透

镜对光线进行汇聚,汇聚后的光斑成像在CCD上,入射光、反射光与CCD上光斑与视场中心的偏差值构成一个三角形,利用几何三角关系计算所需数据^[10]。按入射光与待测物体表面法线的角度关系,测量方法分为斜射式和直射式两种,当入射光束与被测物体表面法线为不垂直关系时,该入射方式称为斜射式。

考虑到激光不一定垂直照射被测物体,本文采用斜射式三角测量法。角度测量示意图如图4所示,用汇聚透镜将漫反射回来的光进行汇聚,使光斑在CCD上的成像更加明显,便于数据采集和处理。透镜的焦距 f 已知,通过测量可得到偏移量 d ,中心矩 L ,利用三角几何关系可以求出实际光束偏转角。大致计算过程如下:在CCD检测器与透镜间的三角形中因为已知 d 和 f ,所以可以求出实际偏转光束与CCD检测器的夹角 R ;在由实际偏转光束、漫反射光束、漫反射光斑与激光器的间距构成的三角形中,根据余弦定理可求出实际偏转光束的长度和漫反射光束的长度,再由该三角形中的三边长度即可求出实际光束偏转角。

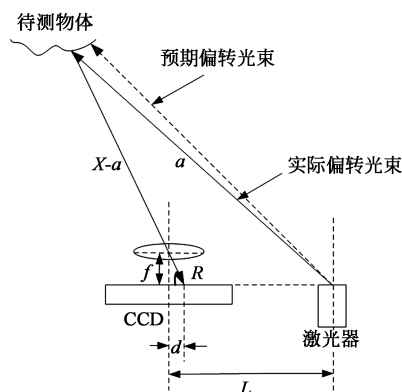


图4 角度测量示意图

Fig.4 Angle measurement diagram

3 光束偏转闭环控制系统

基于液晶相控阵搭建光束偏转闭环控制系统,控制系统原理图如图5所示,主要包括控制器、控制执行单元、探测单元^[11],其中控制器采用分数阶控制,液晶相控阵为控制执行单元,CCD相机为探测单元。CCD通过采集漫反射回来的光信号,将光斑位置与CCD视场中心的偏差值反馈给PC端控制器,通过PC端控制输出电压,系

统的输入信号为通过电压控制加载到液晶相控阵的光束偏转角。将输入信号与探测信号的误差送到控制器,生成控制信号传送到被控对象液晶相控阵,CCD 探测被控对象输出,形成闭环系统^[12]。其中,扰动信号为光波在大气传输中的随机扰动。

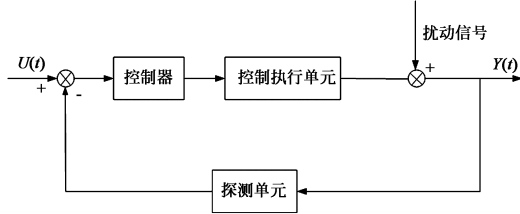


图 5 光束偏转控制系统原理图

Fig.5 Beam deflection control system schematic

液晶相控阵光束偏转过程不同于快速反射镜这类机械式光束偏转器,它是一个截变的过程,但并非光束偏转过程不需要时间。其响应可以定性地视作控制系统中的一阶惯性环节。且驱动电路会因数据传输而产生延时,所以带驱动电路的液晶相控阵作为被控对象可以等效为一个一阶惯性环节与延迟环节之积。其中一阶惯性环节主要由液晶分子的弛豫特性引起,延迟环节包括了控制器到驱动器数据传输及驱动器到液晶电极数据传输两部分。液晶相控阵光束偏转器的传递函数可以表示为:

$$G_1(s) = \frac{1}{1+T_1s} e^{-T_2s}, \quad (3)$$

其中 T_1 与液晶分子弛豫特性相关, T_2 代表了液晶相控阵光束偏转器总的延迟。

采用 CCD 作为探测元件的闭环控制系统存在检测延迟,这种延迟对闭环控制系统的影响很大,主要包括 CCD 脱靶量的延迟、CCD 积分时间、图像采样及处理时间,其中 CCD 脱靶量的延迟是必须要考虑的,它对控制回路的闭环带宽和性能有非常大的影响^[13]。CCD 的传递函数取为

$$H(s) e^{-T_3s}, \quad (4)$$

其中, T_3 表示脱靶量的延迟。

参考杜升平的应用于空间光通信的液晶光束偏转技术研究这篇论文,液晶光束偏转系统开环特性拟合为

$$G = \frac{5.6}{1+0.025s} e^{-0.11s}, \quad (5)$$

其中, T_1 、 T_2 、 T_3 分别取值为 0.025、0.1、0.01^[14]。

光波在大气中传播时,受大气湍流的影响,空气折射率发生随机变化,导致波面的振幅和相位发生随机起伏变化,从而导致光强闪烁、波面畸变、到达角起伏等。在湍流大气中,大气的各项参数如温度、风速、气压等都是随机变量,很难采用模型精确模拟大气扰动^[15]。我们用高斯白噪声加低通滤波器近似模拟大气湍流的随机扰动。低通滤波器模型为

$$\frac{1}{s+a}, \quad (6)$$

其中: a 决定了扰动带宽。相对于液晶相控阵,大气扰动变化较慢,可视为低频扰动,本文实验中取 $a=0.01$ 。

由于分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器比整数阶 PID 控制器多了两个整定参数 λ 和 μ , 相比传统的整数阶 PID 有更广的调节范围,通过选择适当的控制器参数,可以更好地调节控制系统的动态特性,通过控制液晶相控阵的光束偏转角,实现对出射光束进行动态稳定的跟踪^[16]。图 6 为分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 闭环控制系统的基本结构图。

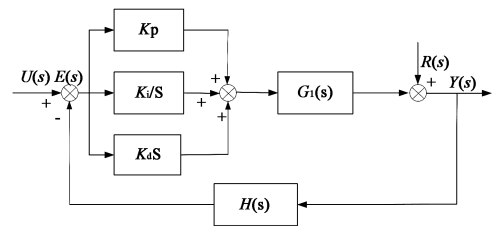


图 6 光束偏转控制系统结构图

Fig.6 Structure of beam deflection control system

图中 $U(s)$ 为加载到液晶相控阵的系统预期光束偏转角, $E(s)$ 为系统预期光束偏转角与实际偏转角的误差,通过分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器,将控制角度数据传送给液晶相控阵,经过液晶相控阵的光束通过漫反射在 CCD 上产生新的光斑。从而计算出实际光束偏转角。

4 仿真实验及分析

为验证分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制算法对光束偏转闭环控制系统的控制效果,使用 MATLAB 对控制算法进行建模仿真,通过仿真验证对扰动的抑制和跟踪精度的优劣。图 7 为 Simulink 仿真框图。

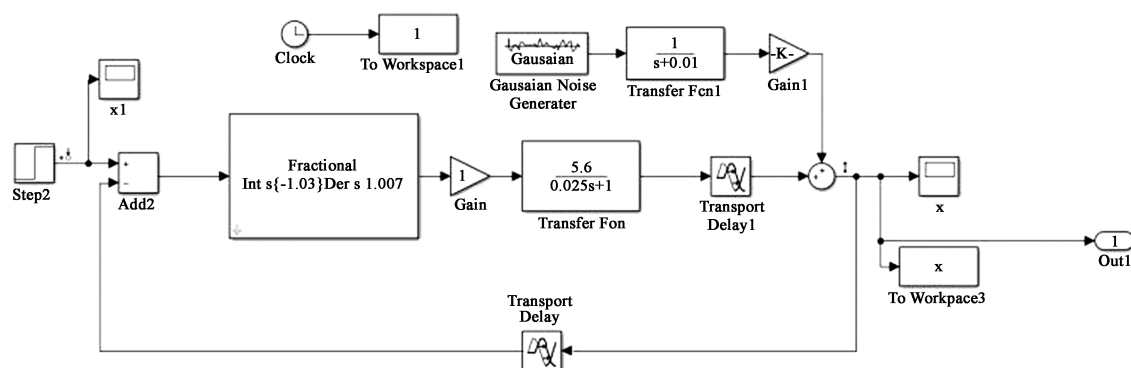


图 7 Simulink 仿真框图

Fig.7 Simulation block diagram

4.1 阶跃响应测试

通常用阶跃响应曲线来描述系统的动态性能,当取控制系统参数 $K_p=0.05$, $K_i=1.5$, $K_d=0$, $\lambda=-1.03$, $\mu=1.007$ 时,得到系统单位阶跃响应曲线如图 8 所示,从阶跃曲线可以看出,系统阶跃响应快、稳定性好。

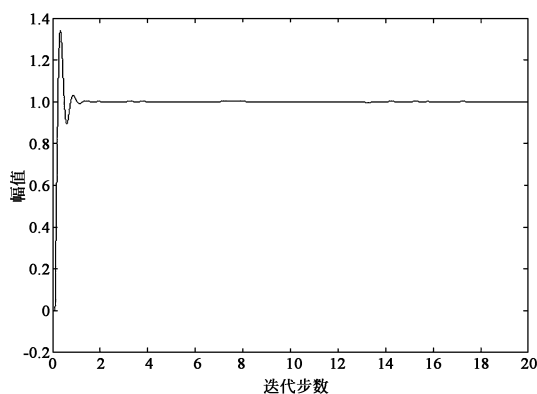


图 8 阶跃响应曲线

Fig.8 Step response curve

4.2 系统闭环带宽测试

由于系统会受到扰动和噪声等非线性因素的影响,控制系统在选择带宽时需要综合考虑各种输入信号的频率范围及其对系统性能的影响,应使系统对输入信号具有良好的跟踪能力和对扰动信号具有较强的抑制能力。由带宽定义可知,闭环系统幅频特性曲线下降到 -3 dB 时对应的频率称为带宽频率。由图 9 所示的伯德图可看出闭环系统幅频特性曲线下降到 -3 dB 时对应的频率为 7.67 rad/s,则系统的闭环带宽为 7.67 rad/s。

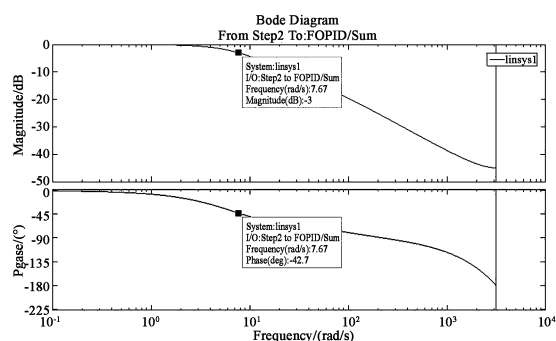


图 9 伯德图

Fig.9 Bode diagram

4.3 系统扰动抑制测试

将输入信号置零,通过在控制器与被控对象之间加入正弦扰动信号来测试系统对扰动信号的抑制能力。加入正弦扰动信号 $R = \sin(N)$,测试结果如图 10 所示,两条曲线分别表示输出信号和扰动信号。抑制后的振幅为 0.125 ,所以系统抑制比为 -18.06 dB。

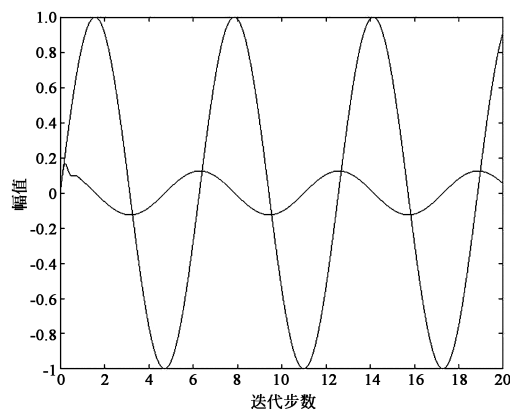


图 10 扰动信号和输出信号曲线

Fig.10 Disturbance signal and output signal curve

5 总 结

通过对液晶相控阵光束偏转系统进行分析可知,液晶相控阵受到器件本身及外界大气扰动等影响,实际光束偏转角与预期偏转角存在一定偏差。本文提出了一种光束偏转控制回路控制精度方法,通过搭建闭环控制系统模型,将 CCD 作为信号接收

单元,应用激光三角法得到光束偏转角误差,提出运用分数阶 $PI^{\alpha}D^{\alpha}$ 控制算法控制光束偏转控制系统,并对该控制回路进行了仿真验证和性能分析,仿真结果表明,采用分数阶 $PI^{\alpha}D^{\alpha}$ 控制算法能够快速稳定的抑制扰动和噪声,实现光束偏转角度精确控制。阶跃响应测试经过 2 步迭代达到稳定输出状态,系统闭环带宽为 7.67 rad/s,对幅值为 1、频率为 1 的正弦扰动信号系统抑制比为 -18.06 dB。

参 考 文 献:

- [1] KURIHARAA M, HASHIMOTOB N. Liquid crystal optics for laser beam modulation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6374: 63470D
- [2] HANDS P I W, TATAKOVA S A, KIRBY A K, *et al.* Modal liquid crystal devices in optical tweezing: 3D control and oscillating potential wells [J]. *Optics Express*, 2006, 14(10): 4525-4537.
- [3] 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.
KONG L J, ZHU Y, SONG Y, *et al.* A beam steering approach of liquid crystal phased array based on nonperiodic blazed grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0123001. (in Chinese)
- [4] 梁涛年.分数阶 PID 控制器及参数不确定分数阶系统稳定域分析[D].西安:西安电子科技大学,2011.
LIANG T N. Fractional order PID controllers and analysis of stability region for fractional order systems with uncertain parameters [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [5] 汪相如,贺晓娟,方琳,等.傅立叶 1/4 波片法检测液晶光学相控阵移相量的精度分析[J].*液晶与显示*,2017,32(1): 7-12.
WANG X R, HE X X, FANG L, *et al.* Precision analysis on the phase delay measurement method of Fourier quarter-wave-plate on liquid crystal optical phased array [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2017, 32(1): 7-12. (in Chinese)
- [6] 郝道银,谈恒英.工程光学[M].北京:机械工业出版社,2006:362-363.
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 362-363. (in Chinese)
- [7] 乔天元.液晶相控阵成像激光雷达精度的研究 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
QIAO T Y. Research on accuracy of liquid-crystal optical phased array imaging laser radar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [8] 刘伯岭,张健,吴丽莹.液晶空间光调制器的纯相位调制特性研究 [J].*光学精密工程*,2006,14(2):213-217.
LIU B H, ZHANG J, WU L Y. Research of the phase-only modulation characterization of a liquid crystal spatial light modulator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(2): 213-217. (in Chinese)
- [9] 章大勇,吴文启,吴美平.机载激光雷达系统标定方法 [J].*光学精密工程*,2009,17(11):2806-2813.
ZHANG D Y, WU W Q, WU M P. Calibration technology of airborne lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(11): 2806-2813. (in Chinese)
- [10] 冯金城.高精度实时激光三角测距系统设计 [D].南京:南京理工大学,2008.
FENG J C. The design of a real-time and high-precision laser triangulation system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [11] 许剑华,汪相如,黄子强,等.基于液晶光学相控阵的空间激光通信 PID 跟踪方法 [J].*激光与光电子学进展*,2017, 54(2):021202.
XU J H, WANG X R, HUANG Z Q, *et al.* PID tracking method of space laser communication based on liquid crystal optical phased array [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2017, 54(2): 021202. (in Chinese)
- [12] 肖文奔.基于液晶光学相控阵的光束偏转控制技术研究 [D].成都:中国科学院大学,2013.
XIAO W B. Research on beam deflection control technology based on liquid crystal optical phased array [D].

- Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [13] TANG T, HUANG Y M, LIU S Y, *et al.* Acceleration feedback of a CCD-based tracking loop for fast steering mirror [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(1): 013001.
- [14] 杜升平.应用于空间光通信的液晶光束偏转技术研究 [D]. 成都:中国科学院大学,2017.
DU S P. Research on liquid crystal beam deflection for space optical communication [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [15] 高振兴.复杂大气扰动下大型飞机飞行实时仿真建模研究 [D]. 南京:南京航空航天大学,2009.
GAO Z X. Research on real-time flight simulation of large aircraft in complex atmospheric disturbance [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [16] ELLIS G.控制系统设计指南 [M]. 刘君华,汤晓君,译,3 版. 北京:电子工业出版社,2006.
ELLIS G. *Control System Design Guide* [M]. LIU J H, TANG X J, trans. 3rd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2006. (in Chinese)

作者简介:王春阳(1964—),女,吉林长春人,教授,博士生导师,2013 年于吉林大学获工学博士学位。主要从事光电检测与信息处理技术、激光相控阵雷达技术等方面的研究。E-mail: wangchunyang19@cust.edu.cn.com
史红伟(1978—),男,河北石家庄人,博士,讲师,2003 年于东北电力学院获学士学位,2007 年于吉林大学获硕士学位,2012 年于吉林大学获博士学位。主要从事阵列信号处理、先进控制技术等方面研究。E-mail: qitiand@qq.com