

激光通信系统中快速反射镜控制技术研究

张兴亮*, 王 威, 吴佳彬

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要: 为满足激光通信系统跟踪精度的要求,采用快速反射镜系统作为精跟踪控制核心。选用大行程、高分辨率、高带宽的音圈电机驱动快速反射镜,对音圈电机控制方法进行了研究。首先,定性分析了快速反射镜系统的组成及工作原理。然后,根据音圈电机的等效电路模型进行建模分析,得到快速反射镜的传递函数模型。最后,介绍了模拟控制器的设计原理,给出了比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)电路、位置检测电路以及功率放大电路的具体设计。实验结果表明,设计的快速反射镜的角分辨率为 $1\ \mu\text{rad}$,重复定位精度为 $3\ \mu\text{rad}$,闭环带宽($-3\ \text{dB}$)为 $300\ \text{Hz}@1\ \text{mrad}$,满足激光通信系统稳定可靠、精度高、抗干扰能力强等要求。

关键词: 激光通信; 快速反射镜; 音圈电机; 模拟控制

中图分类号: TP273 **文章编号:** 1001-5868(2021)02-0289-06

Research on Fast Steering Mirror Control Technology of Laser Communication System

ZHANG Xingliang, WANG Wei, WU Jiabin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, CHN)

Abstract: In order to meet the tracking accuracy requirements of the laser communication system, a fast steering mirror system is used as the core of fine tracking control, and a voice coil motor with large stroke, high resolution and high bandwidth is selected to drive the fast steering mirror, and the control method of voice coil motor is studied. Firstly, the composition and working principle of the fast steering mirror system is analyzed. Then, modeling analysis is performed according to the equivalent circuit model of the voice coil motor, and the transfer function model of the fast reflector is obtained. Finally, the design principle of the analog controller, the proportional-integral-derivative (PID) circuit, the position detection circuit and the power amplifier circuit are introduced. The experimental results show that the angular resolution of the fast steering mirror is $1\ \mu\text{rad}$, the repeated positioning accuracy is $3\ \mu\text{rad}$, and the closed-loop bandwidth ($-3\ \text{dB}$) is $300\ \text{Hz}@1\ \text{mrad}$, which can meet the requirements of laser communication system for stability, reliability, high precision, and strong anti-interference ability.

Key words: laser communication; fast steering mirror; voice coil motor; analog control

0 引言

激光通信具有通信容量大、功耗低、保密性好、抗电磁干扰能力强等优点,在民用以及国防领域有着广泛的应用前景^[1-3]。大气激光通信系统主要由

大气信道、光发送机、光接收机、光学天线、电发送机、电接收机、终端设备、电源等组成^[4]。

激光通信系统要求发射端光束必须精确地对准接收端以建立光通道,然而,由于受诸多客观因素,如平台震动、大气散射、湍流等影响,容易导致激光光束偏离目标,甚至造成通信链路中断。为解决这

收稿日期:2021-02-02.

* 通信作者:张兴亮 E-mail: zxliang1987@163.com

一问题,在激光通信接收端采用捕获、瞄准和跟踪(Acquisition Tracking and Pointing, APT)系统以保证两通信端机的光束能够精确对准,确保通信链路的可靠性^[5]。因此,APT系统为激光通信中最为关键的部分之一,在APT系统中,快速反射镜安装在光源与接收端之间,通过控制反射镜的偏转进而调整光束传播方向以弥补激光通信中激光光束的偏移量,控制快速反射镜偏转的硬件为快速反射镜控制器^[6-7]。为满足快速反射镜大行程、高分辨率、高带宽等要求,选用音圈电机驱动快速反射镜,因此,要求控制器具有电压输入范围宽、精度控制高、闭环带宽高等特点,对控制器的要求非常高。

1 快速反射镜控制技术现状

快速反射镜系统主要由基座、反射镜、支撑结构、驱动元件、位置检测元件和控制器等6部分组成^[8-9]。支撑结构起到支点的作用,使反射镜只有绕两工作轴的转动自由度;当入射在反射镜上的光束发生一定角度的偏转时,位置检测元件探测反射镜偏转的角度信息,并把反射镜的位置信息反馈给控制器,经控制器算法解算后再放大,继而由驱动元件控制反射镜偏转,直到反射镜反射光束的偏移量被完全校正为止。位置检测元件与快速反射镜的控制器构成闭环系统,以提高快速反射镜的控制精度。

快速反射镜的性能除了与驱动元件、机械结构、反馈元件等有关外,还取决于采用的控制方法。快速反射镜的控制带宽主要受采样频率和结构谐振频率的限制。

高速运动的反射镜产生的反作用力传递到系统底座上会造成结构谐振,导致机械谐振的频率比较低,严重限制快速反射镜的控制带宽。国外的快速反射镜在设计时普遍采用消除反作用力结构来减轻谐振的影响,例如通过质量补偿块来平衡高速运动的反射镜的反作用力,从而达到减弱或消除较为严重的结构谐振的目的。然而受到技术水平和制造工艺的限制,国内生产的快速反射镜的结构谐振频率普遍较低,为控制系统设计带来了很大的困难,限制了快速反射镜的性能^[10-11]。

目前快速反射镜控制技术主要有数字控制和模拟控制两种方法。随着数字信号处理芯片性能的大幅提升,数字控制技术受到一些研究人员的青睐,例如,Ball Aerospace & Technologies公司专门为自

己的快速反射镜开发了数字控制器产品^[12]。相比模拟控制器,数字控制器可以方便地通过软件实现复杂的控制要求,调试灵活。但数字控制器中采样保持、数字信号处理等延迟因素会造成快速反射镜相位滞后,严重限制了控制带宽。若通过提高采样频率的方法来减小相位滞后,则会导致量化噪声增大。

模拟控制器具有体积小、重量轻的特点^[13],基于模拟控制器的快速反射镜具有系统集成度高、质量轻、响应速度快、控制带宽高等优点,因此本文针对模拟控制器展开研究。

2 快速反射镜控制系统设计

2.1 快速反射镜控制系统原理

图1给出了快速反射镜控制系统原理框图,其主要包括模拟控制器、功率放大电路、音圈电机、快速反射镜和四象限探测器等5部分。快速反射镜控制系统的工作原理是:四象限探测器^[14]测量得到的快速反射镜的角位置信号,与给定的位置信号一起经模拟控制器处理得到输出电压,经驱动电路放大后驱动音圈电机控制快速反射镜转动,从而实现位置闭环控制。

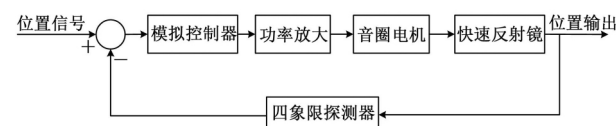


图1 快速反射镜控制系统原理框图

快速反射镜镜面的倾斜偏转由音圈电机推挽驱动来实现。快速反射镜为双轴结构,采用四个音圈电机控制其二维偏转,每个方向采用两个音圈电机进行驱动控制,这种方法受力均匀,使快速反射镜具有很高的工作稳定性和可靠性,同时,在两个方向上的运动不存在耦合,便于实现系统的闭环控制。

本文所研究的快速反射镜由课题组自主研发,将音圈电机作为驱动元件,四象限探测器作为反馈元件。该反射镜采用柔性传动结构,反射镜直径为50.8 mm,行程可达 $\pm 1.5^\circ$,外形尺寸为57 mm $\times$ 57 mm $\times$ 63 mm,重量为470 g。

2.2 快速反射镜建模分析

音圈电机因其结构类似于扬声器的线圈而得名,具有高精度、高频响的特点,广泛应用于高精度伺服定位系统^[15-16]。音圈电机简化等效电路如图2所示。

根据基尔霍夫定律可得音圈电机的电压平衡方程：

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + E \quad (1)$$

$$E = K_e \omega_m \quad (2)$$

其中, U 为电源电压, R 为电枢电阻, L 为电枢电感, i 为流经线圈的电流, E 为电机的反电动势, K_e 为反电动势系数, ω_m 为电机转速。联立式(1)和(2), 得到:

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + K_e \omega_m \quad (3)$$

分析音圈电机的工作力矩可知, 音圈电机的输出转矩等于负载转动惯量形成的力矩与克服粘性摩擦力矩的和。根据牛顿运动定律, 得到音圈电机的力矩平衡方程:

$$T = K_t i \quad (4)$$

$$T = J_T \omega'_m + f_m \omega_m \quad (5)$$

其中, T 为音圈电机的输出转矩, K_t 为电机的转矩系数, J_T 为负载转动惯量, f_m 为粘性摩擦系数, f_m 一般可忽略不计。联立式(4)和(5), 得到:

$$J_T \omega'_m = K_t i \quad (6)$$

对式(3)和(6)进行拉普拉斯变换得到:

$$U(s) = R \cdot I(s) + s \cdot L \cdot I(s) + K_e \cdot \omega_m(s) \quad (7)$$

$$s \cdot J_T \cdot \omega_m(s) = K_t \cdot I(s) \quad (8)$$

联立式(7)和(8), 消去 $I(s)$ 得到输入电压到快速反射镜转速的传递函数:

$$\frac{\omega_m(s)}{U(s)} = \frac{K_t}{s J_T (sL + R) + K_t K_e} \quad (9)$$

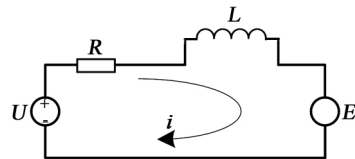


图2 音圈电机的简化等效电路

由于快速反射镜反馈元件测量的是角度位置, 设 θ 为相对平衡位置的转角, 对式(9)乘 $1/s$ 便得到输入电压到快速反射镜角度位置的传递函数 $G(s)$:

$$G(s) = \frac{\theta_m(s)}{U(s)} = \frac{K_t}{s(s J_T (sL + R) + K_t K_e)} \quad (10)$$

分析式(10)可知, 快速反射镜的传递函数的分子为常数, 分母为三阶多项式。可得到基于音圈电机的快速反射镜控制流程, 如图3所示。

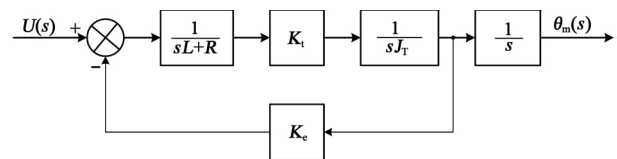


图3 控制流程图

2.3 控制器具体设计

2.3.1 模拟控制器原理设计

设快速反射镜的运动方向为 X, Y , 驱动快速反射镜运动的电机为 A 轴电机和 B 轴电机。控制器原理如图4所示。

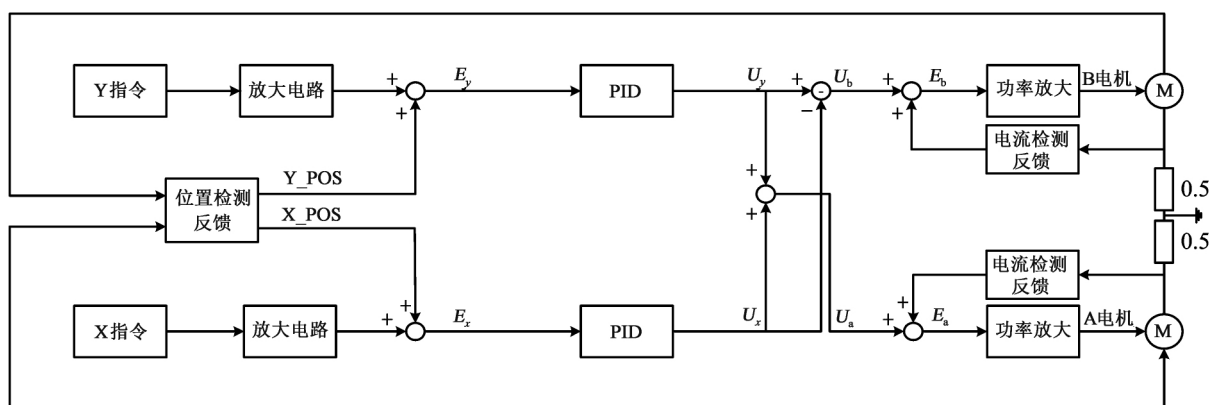


图4 控制器原理图

控制器采用电流环和位置环的双闭环控制, 当驱动器外部指令信号(Y_CMD/X_CMD)发生变化, 如 Y_CMD 变化, Y_CMD 经过放大进行解算, 与位置反馈电压信号解算出的 Y_POS 相加, 得到误差

信号 E_y , E_y 经 PID 电路调解放大后得到信号 U_y 。 X 方向变化时, 同理得到调制信号 U_x 。

X, Y 方向的调制信号与用于驱动 A, B 电机的调制信号存在如下关系:

$$U_b = U_y - U_x \quad (11)$$

$$U_a = U_y + U_x \quad (12)$$

式(11)和(12)与四象限探测的解算关系相关。 U_b 与B电机的电流反馈相加得到功率驱动芯片的输入信号 E_b ,经功率放大后驱动B电机; U_a 与A电机的电流反馈相加得到功率驱动芯片的输入信号 E_a ,经放大后驱动A电机。

2.3.2 PID 控制电路设计

控制器的输出为带有控制算法的信号,该控制算法使快速反射镜的位置误差信号达到最小,以达到提高整个跟踪系统精度的目的。PID 作为经典控制理论中的重要算法,因其稳定性和可靠性高等优点,在控制领域被广泛使用。具体实现电路如图 5 所示。

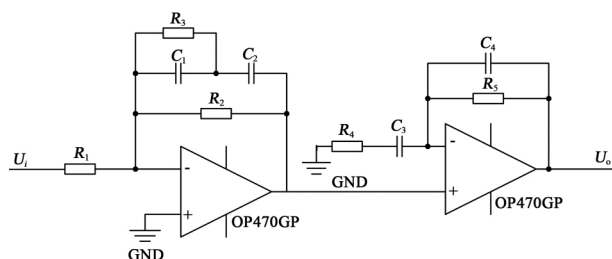


图 5 PID 控制电路

综合考虑电路的噪声、漂移、稳定性等因素, PID 电路中通过型号为 OP470GP 的低噪声运算放大器搭配电阻电容实现,选择两级级联的方法实现 PID 电路设计,其优势在于两级参数调节互相独立,第一级电路以比例积分为主,满足系统的性能指标,第二级电路增加一个微分设计,增加系统响应速度,降低系统的超调范围,进而实现高精度跟踪要求。

2.3.3 位置检测电路设计

位置检测电路设计如图 6 所示;A+/A-、B+/B-为模拟控制器接收到的经过四象限探测器解算的 A 轴电机位置信号和 B 轴电机位置信号,轴位置信号进入控制器后首先对齐低通滤波去耦合处理,继而通过运算放大器 AD620 进行比例运算,得到的两个轴运算信号经过进一步的加法运算得到 Y 方向位置信号 Y_POS;经过进一步的减法运算得到 X 方向位置信号 X_POS。

2.3.4 功率放大电路设计

常用的音圈电机的功率放大器有两种:基于开关器件的 PWM 功率放大器以及基于模拟运放的线性功率放大器。线性功率放大器具有响应速度快、电流纹波小的特点,并且其电流环带宽很大,本

实验中采用基于模拟运放的线性功率放大电路,电路如图 7 所示。电路中 U_b 表示经过运算后得到的位置误差信号, I_{sense} 表示经过运算后得到的电机电流信号,两个信号叠加后通过高压大电流运放 OPA2544T 反向放大后驱动电机;电路中的 CR7/CR8 起到电压钳位的作用。

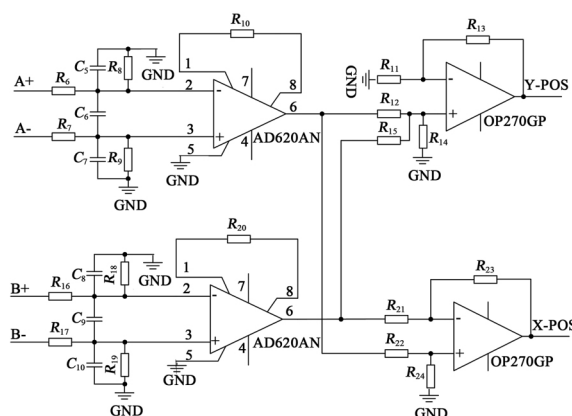


图 6 位置检测电路

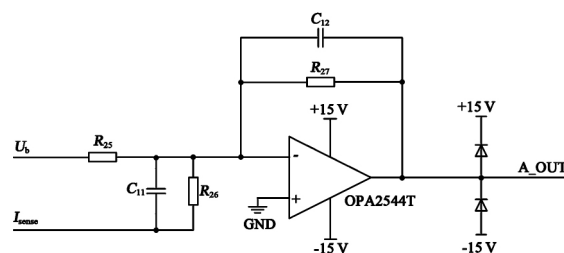
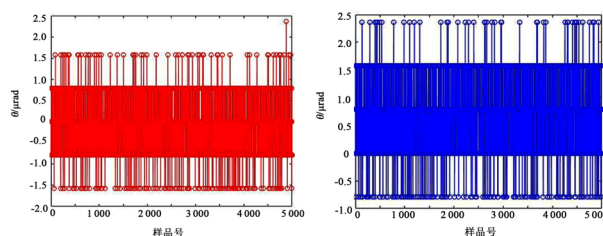


图 7 功率放大电路

3 测试实验与结果

3.1 分辨率测试

对快速反射镜的分辨率进行测试,得到如图 8 所示的测试结果,图 8(a)所示为 X 方向的分辨率测试数据,图 8(b)所示为 Y 方向的分辨率测试数据。通过计算分析得到分辨率的均方根值约为 $1 \mu\text{rad}$ 。



(a) X 方向 (b) Y 方向

图 8 反射镜分辨率测试数据

3.2 系统测试

3.2.1 超调量测试

超调量是在阶跃输入作用下,被调量的瞬时最

大偏差值与稳态值之比,是分析系统动态性能的重要指标。越大的超调量使得系统偏离规定的状态越远,在本控制器设计中,要求系统超调量最大值为 20%。在一定阶跃输入下对系统超调量进行测试,得到如图 9 所示数据,经计算系统的超调量为 12.5%,满足系统设计指标。

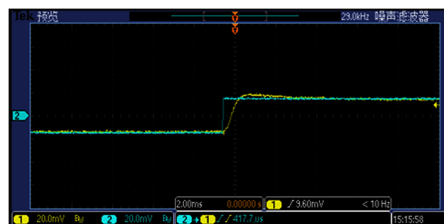
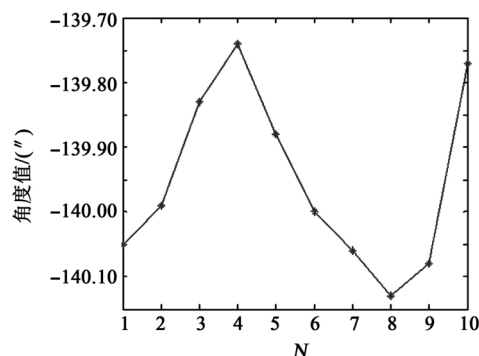


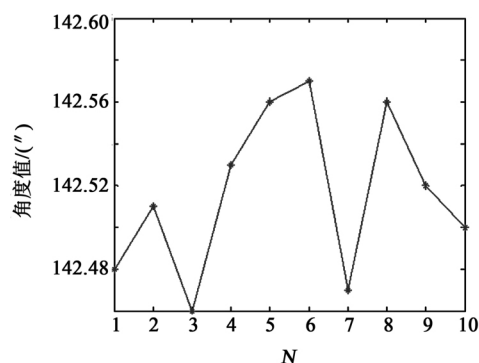
图 9 超调量测试结果

3.2.2 重复定位精度测试

采用光电自准直仪对快速反射镜进行重复定位精度测试,得到 X 轴峰峰值角度如图 10(a)所示,Y 轴峰峰值角度如图 10(b)所示。



(a) X 轴测试数据



(b) Y 轴测试数据

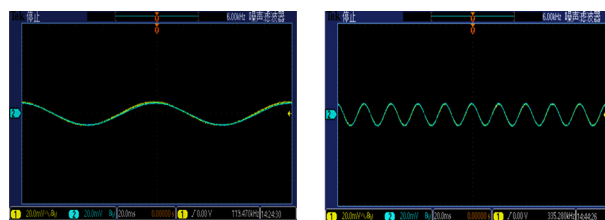
图 10 重复定位精度测试数据

通过分析实验数据,X 轴峰峰值角度为 0.350° ,约 $1.75 \mu\text{rad}$;Y 轴峰峰值角度为 0.250° ,约 $1.25 \mu\text{rad}$;系统重复定位精度为 $3 \mu\text{rad}$ 。

3.2.3 跟踪指标测试

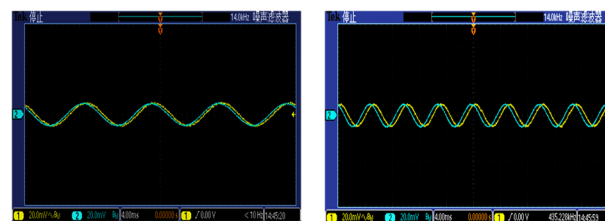
测试系统在不同频率、不同幅值正弦输入信号

下的闭环特性。示波器 2 通道为输入信号,1 通道为位置输出测试信号。图 11~13 所示分别为 20、50 和 100 mV 正弦电压、不同频率下的测试数据。



(a) 20 mV, 10 Hz

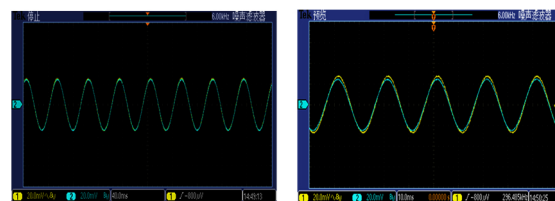
(b) 20 mV, 50 Hz



(c) 20 mV, 100 Hz

(d) 20 mV, 200 Hz

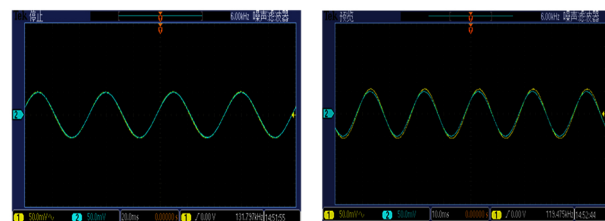
图 11 20 mV 正弦电压、不同频率下的测试结果



(a) 50 mV, 20 Hz

(b) 50 mV, 50 Hz

图 12 50 mV 正弦电压、不同频率下的测试结果



(a) 100 mV, 20 Hz

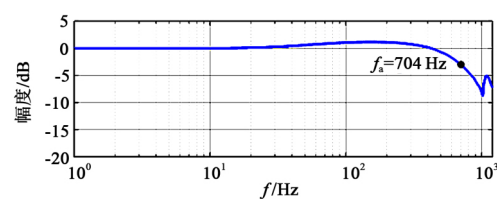
(b) 100 mV, 50 Hz

图 13 100 mV 正弦电压、不同频率下的测试结果

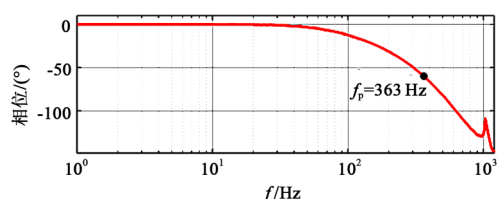
分析以上实验数据可知,在低输入电压、低工作频率条件下系统的跟踪性能非常好,随着频率的增加,系统的响应出现一定的超调和延时响应,这种现象在一定程度内是允许的。

对系统的幅频响应和相频响应进行测试分析,得到快速反射镜 X 方向波特图如图 14 所示,Y 方向波特图如图 15 所示。

经过测试分析,得到该控制器的几个主要指标:角分辨率为 $1 \mu\text{rad}$,重复定位精度为 $3 \mu\text{rad}$,闭环带宽(-3 dB)为 $300 \text{ Hz}@1 \text{ mrad}$ 。

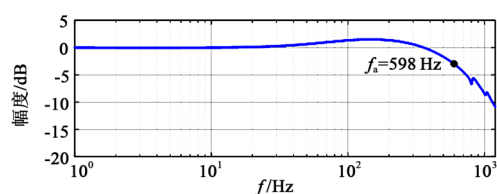


(a) 幅频响应

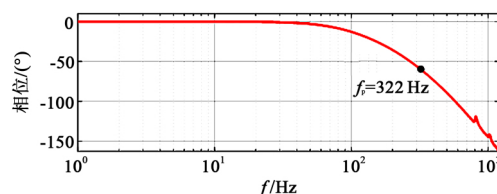


(b) 相频响应

图 14 X 方向波特图



(a) 幅频响应



(b) 相频响应

图 15 Y 方向波特图

4 结论

本文以提高激光通信系统跟踪精度为目的,依托实验室自主研发的快速反射镜系统,对音圈电机控制方法进行研究。定性分析了快速反射镜系统的组成及工作原理,根据音圈电机的等效电路模型进行建模分析,介绍了控制器的设计原理,给出了 PID 控制电路、位置检测电路以及功率放大电路的具体设计,同时进行了实验数据分析。结果表明,该快速反射镜的角分辨率为 $1 \mu\text{rad}$,重复定位精度为 $3 \mu\text{rad}$,闭环带宽(-3 dB)为 $300 \text{ Hz}@1 \text{ mrad}$ 。

参考文献:

- [1] 高世杰, 吴佳彬, 刘永凯, 等. 微小卫星激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学, 2020, 13(6): 1171-1181.
Gao Shijie, Wu Jiabin, Liu Yongkai, et al. Development status and trend of micro-satellite laser communication systems[J]. Chinese Optics, 2020, 13(6): 1171-1181.
- [2] 高铎瑞, 李天伦, 孙悦, 等. 空间激光通信最新进展与发展

趋势[J]. 中国光学, 2018, 11(6): 901-913.

- Gao Duorui, Li Tianlun, Sun Yue, et al. Latest developments and trends of space laser communication[J]. Chinese Optics, 2018, 11(6): 901-913.
- [3] 董全睿, 陈涛, 高世杰, 等. 星载激光通信技术研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(6): 1260-1270.
Dong Quanrui, Chen Tao, Gao Shijie, et al. Progress of research on satellite-borne laser communication technology[J]. Chinese Optics, 2019, 12(6): 1260-1270.
- [4] 倪迎雪, 伞晓刚, 高世杰, 等. 激光通信 APT 系统中快速反射镜研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(2): 140-147.
Ni Yingxue, San Xiaogang, Gao Shijie, et al. Research of fast steering mirror in laser communication APT system[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(2): 140-147.
- [5] 高世杰, 盛磊, 吴志勇, 等. 大气激光通信光斑图像的快速复原与实时检测[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2393-2399.
Gao Shijie, Sheng Lei, Wu Zhiyong, et al. Rapid restoration and real-time detection on spot image of atmospheric laser communication[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(8): 2393-2399.
- [6] Cho M, Corredor A, Dribusch C, et al. Performance prediction of the fast steering secondary mirror for the giant magellan telescope[J]. Proc. SPIE, 2012, 8444: 84424.
- [7] Dunham E, Collins P, Reinacher A, et al. SOFIA image motion compensation[J]. Proc. SPIE, 2010, 7735: 77355X.
- [8] 林俊兰. 基于模拟电路的快速反射镜控制技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
Lin Junlan. The study of control technologies base on analog circuits for fast steering mirror[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [9] 孙崇尚. 基于快速反射镜的高精度宽频带扫描像移补偿技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
Sun Chongshang. Research on the scanning image motion compensation technology based on fast steering mirrors with high precision and wide frequency range[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [10] 赵磊, 王明歆, 刘小强, 等. 快速反射镜驱动形式对伺服带宽的影响[J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 393-401.
Zhao Lei, Wang Mingxin, Liu Xiaoqiang, et al. Influence of driving forms on servo bandwidth in fast steering mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(2): 393-401.
- [11] 陈国真, 徐斯强, 刘品宽. 大行程快速反射镜的结构设计及带宽特性[J]. 光学精密工程, 2020, 28(1): 90-102.
Chen Guozhen, Xu Siqiang, Liu Pinkuan. Structural design and bandwidth characteristic of a fast steering mirror with large travel range[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(1): 90-102.

(下转第 300 页)

译码性能。综合考虑译码性能和复杂度,FSCLF 译码算法为中短码长情况下的极化码译码提供了一种具有参考价值的译码算法。

参考文献:

- [1] 李小文, 李文彬. 一种简化的极化码串行消除列表译码算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2019, 31(4): 488-494.
Li Xiaowen, Li Wenbin. A simplified successive cancellation list decoding algorithm for polar codes [J]. J. of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2019, 31(4): 488-494.
- [2] 徐旻子. 面向 5G 的极化码编译码技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
Xu Minzi. Research on encoding and decoding technology of polar codes based on 5G [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technol., 2018.
- [3] Afisiadis O, Balatsoukasstimming A, Burg A, et al. A low-complexity improved successive cancellation decoder for polar codes [C]// Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers, 2014: 2116-2120.
- [4] Ercan F, Condo C, Hashemi S A, et al. Partitioned

successive-cancellation flip decoding of polar codes[C]// 2018 IEEE Inter. Conf. on Communications (ICC), 2018: 1-6.

- [5] Chandesaris L, Savin V, Declercq D, et al. Dynamic-SC flip decoding of polar codes[J]. IEEE Trans. on Communications, 2018, 66(6): 2333-2345.
- [6] Ercan F, Condo C, Gross W J. Improved bit-flipping algorithm for successive cancellation decoding of polar codes [J]. IEEE Trans. on Communications, 2019, 67(1): 61-72.
- [7] Niu K, Chen K. CRC-aided decoding of polar codes[J]. IEEE Communications Lett., 2012, 16(10): 1668-1671.
- [8] Y Yongrun, P Zhiwen, L Nan, et al. Successive cancellation list bit-flip decoder for polar codes [C]// 2018 10th IEEE Inter. Conf. on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2018: 1-6.
- [9] Cheng F, Liu A, Zhang Y, et al. Bit-flip algorithm for successive cancellation list decoder of polar codes [J]. IEEE Access, 2019, 7: 58346-58352.

作者简介:

袁建国(1968—),男,重庆市人,工学博士,教授,硕士生导师,主要从事通信系统中 LDPC 码与极化码编译码技术以及 OFDM 技术等方面的研究。

(上接第 294 页)

- [12] 王福超, 王昱棠, 田大鹏. 音圈快速反射镜的完全跟踪控制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 1997-2006.
Wang Fuchao, Wang Yutang, Tian Dapeng. Perfect tracking control for fast-steering mirror driven by voice coil motor[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(9): 1997-2006.
- [13] 黄 浦, 杨秀丽, 修吉宏, 等. 音圈致动快速反射镜的降阶自抗扰控制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1365-1374.
Huang Pu, Yang Xiuli, Xiu Jihong, et al. Reduced-order active disturbance rejection control of fast steering mirror driven by VCA[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(6): 1365-1374.
- [14] 王正玺, 张 葆, 李贤涛, 等. 快速反射镜在像移补偿中的应用[J]. 中国光学, 2020, 13(1): 95-105.
Wang Zhengxi, Zhang Bao, Li Xiantao, et al. Application of fast steering mirror in image motion compensation[J]. Chinese Optics, 2020, 13(1): 95-105.
- [15] Gutierrez H L, Gaines J D, Newman M R. Line-of-sight stabilization and back scanning using a fast steering mirror and blended rate sensors [C]// Infotech @ Aerospace, American Institute of Aeronautics and Astronautics, St. Louis, Missouri, 2011: 1-8.
- [16] Marshalek R G. Laser communication requirements drive cost-effective solutions[J]. 1999 Inter. Symp. on Advanced

Radio Technologies, 1999: 1-99.

- [17] 吴佳彬, 陈云善, 高世杰, 等. 高精度近红外光斑位置检测模型研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 717001-717001(7).
Wu Jiabin, Chen Yunshan, Gao Shijie, et al. High precision spot position detection model for the near infrared light [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(7): 717001-717001(7).
- [18] Guo H, Wang D, Xu J. Research on a high-frequency response direct drive valve system based on voice coil motor [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2013, 28(5): 2483-2492.
- [19] Oboe R, Marcassa F, Capretta P, et al. Realization of a hard disk drive head servo-positioning system with a voltage-driven voice-coil motor[J]. Microsystem Technologies, 2003, 9: 271-281.

作者简介:

张兴亮(1986—),男,吉林农安人,博士,副研究员,主要从事脉冲功率技术及电机驱动技术方向的研究;

王 威(1978—),男,河南驻马店人,博士,研究员,主要从事空间电磁干扰抑制技术方向研究。